

***Contribución a las tecnologías de fabricación aditiva para la obtención de piezas multimaterial, combinando la impresión 3D por máscara con la impresión funcional mediante sistemas InkJet***

**- VOLUMEN 1 -**



Doctorando: **Asier Muguruza Blanco**

Director: **Dr. Joaquim Minguella i Canela**

Codirector: **Dr. Jordi Bonada Bo**



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

**Escola Tècnica Superior d'Enginyeria  
Industrial de Barcelona**



A mi madre ...





# Volumen 1

<b>1.1. RESUMEN / RESUM / SUMMARY</b>	<b>VII</b>
<b>1.2. OBJETIVO DE LA TESIS</b>	<b>XIII</b>
1.2.1. Contexto y motivación.....	XIII
1.2.2. Objetivos generales de la presente tesis .....	XVI
1.2.3. Objetivos específicos .....	XVII
<b>1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS</b>	<b>XVIII</b>
<b>1.4. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>1</b>
1.4.1. Tecnología de Cerámica.....	5
1.4.1.1. Circuitos híbridos.....	6
1.4.1.2. Tecnología de capa gruesa o thick film .....	7
1.4.1.3. Tecnología cerámica multicapa.....	9
1.4.2. Tecnologías aditivas 3D.....	17
1.4.2.1. Introducción.....	17
1.4.2.2. Algunas particularidades de los métodos de fabricación aditivos en comparación a los métodos convencionales.....	18
1.4.2.3. Procesos de fabricación aditiva .....	20
1.4.2.4. Ventajas .....	45
1.4.2.5. Limitaciones .....	49
1.4.2.6. Fabricación aditiva híbrida.....	52
1.4.3. Tecnologías de impresión 2D .....	56
1.4.3.1. Clasificación de las impresoras .....	58
1.4.3.2. Reseña histórica de la tecnología Inkjet .....	61
1.4.3.3. Principios de impresión, tecnología Inkjet DOD por piezoeléctricos .....	71
1.4.3.4. Del píxel al vóxel .....	91
1.4.3.5. Reproducción física de objetos tridimensionales a partir de archivos digitales en formato de mapa de bits .....	104
1.4.3.6. Aplicaciones de la tecnología PIJ dentro del printing electronics.....	112
1.4.3.7. Otras posibles aplicaciones de la tecnología PIJ.....	125
1.4.4. Tintas y materiales susceptibles a ser impresos .....	128
1.4.4.1. Componentes de tinta individuales.....	130

1.4.4.2. Tintas para sistemas Inkjet.....	134
1.4.4.3. Tintas funcionales .....	135
<b>2.1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>141</b>
2.1.1. Fluido como medio continuo .....	143
2.1.2. Parámetros adimensionales.....	146
<b>2.2. EYECCIÓN DE GOTAS A PARTIR DE CHORROS .....</b>	<b>149</b>
2.2.1. Conceptos generales y fundamentos.....	150
2.2.1.1. Ley de Tate .....	151
2.2.1.2. Inestabilidad de Plateau-Rayleigh .....	157
2.2.2. Tipo ruptura en función de la velocidad en chorros no excitados .....	169
2.2.3. Chorros excitados.....	171
2.2.3.1. Chorros excitados acústicamente .....	172
2.2.3.2. Chorros excitados eléctricamente .....	172
<b>2.3. GENERACIÓN DE GOTAS EN RÉGIMEN DE GOTEO .....</b>	<b>174</b>
2.3.1. Transición entre el goteo y la eyección .....	175
2.3.1.1. Inicio del régimen de goteo .....	177
2.3.1.2. Límite del goteo periódico inicio del perturbado.....	182
2.3.1.3. Límite del régimen de goteo caótico y transición al régimen de eyección .....	184
<b>2.4. GENERACIÓN DE GOTAS MEDIANTE CHORROS DE TINTA DISCRETOS (TECNOLOGÍA DE DOD POR PIEZOELÉCTRICOS) .....</b>	<b>189</b>
2.4.1. Funcionamiento de los sistemas Inkjet DOD por piezoeléctricos .....	190
2.4.1.1. Dinámica básica de un cabezal mono–nozzle de impresión DOD por piezoeléctricos (modelización con un grado de libertad).....	192
2.4.1.2. Consideraciones asociadas a la eyección de volúmenes discretos de fluido como consecuencia de la dinámica del cabezal mono-nozzle de impresión DOD por piezoeléctricos .....	207
2.4.2. Dinámica de un cabezal multi–nozzle de impresión DOD por piezoeléctricos .....	224
2.4.3. Modelización del comportamiento dinámico del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 utilizado en el sistema de impresión híbrido multimaterial desarrollado en la presente tesis .....	243
2.4.3.1. Cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610.....	244
2.4.3.2. Modelización del comportamiento hidrodinámico del fluido en el interior de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610 .....	256
2.4.3.3. Características de las señales de excitación y control, empleadas en la modelización.....	271

2.4.3.4. Características de las tintas o fluidos empleados en la modelización.....	274
2.4.3.5. Fenomenología asociada al control de la eyección de los volúmenes discretos de tinta, como consecuencia de la dinámica del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610.....	279
2.4.3.6. Respuesta hidrodinámica de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610 mediante la modelización del mismo como un sistema monodimensional hidro-acústico.....	281
2.4.3.7. Respuesta hidrodinámica de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610 mediante la modelización del mismo como un sistema monodimensional mecánico-hidro-acústico .....	284
<b>2.5. ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS _____</b>	<b>289</b>
2.5.1. Efecto piezoeléctrico.....	289
2.5.2. Clasificación, características y aplicaciones de los PZT.....	294
2.5.3. Sistemas de microbombeo basados en actuadores piezoeléctricos .....	297
2.5.3.1. Piezoeléctricos utilizados en sistemas de impresión Inkjet DOD.....	298
2.5.4. Modelización del efecto piezoeléctrico inverso en actuadores de sistemas Inkjet.....	302
2.5.4.1. Comportamiento a baja frecuencia.....	303
2.5.4.2. Comportamiento a alta frecuencia.....	307
2.5.4.3. Influencia de la temperatura en los efectos ferroeléctricos y piezoeléctricos.	308
2.5.5. Modelización del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 como un sistema Electro-Mecánico-Hidráulico-Acústico.....	311
2.5.5.1. Modelo totalmente acoplado en dos etapas de la respuesta hidrodinámica del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 interpretado como mono-nozzle.....	335
2.5.5.2. Modelización en dos etapas de la respuesta hidrodinámica del Cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 como un sistema acoplado multi-nozzle Electro-Mecánico-Hidráulico-Acústico.....	345
2.5.6. Planteamiento de un sistema Inkjet DOD accionados por piezoeléctricos del tipo bend multi-nozzle multimaterial. ....	346
<b>2.6. MODELIZACIÓN DE LA TRAYECTORIA Y COMPORTAMIENTO DE LAS GOTAS UNA VEZ EXPULSADAS _____</b>	<b>353</b>
2.6.1. Modelización de la trayectoria de las gotas .....	353
<b>2.7. MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE CONTACTO DE LAS GOTAS CON EL SUBSTRATO _____</b>	<b>368</b>
2.7.1.1. Conceptos básicos .....	369
2.7.1.2. Ecuación de Young-Laplace.....	373
2.7.1.3. Ecuación de Young-Laplace en gravedad.....	374

2.7.1.4. Ecuación de Young (Mojabilidad).....	375
2.7.1.5. Capilaridad, adhesión, Cohesión y coeficiente de expansión.....	377
2.7.1.6. Ecuación generalizada de Young (tensión de línea) .....	381
<b>2.7.2. Mojado de superficies sólidas reales.....</b>	<b>383</b>
2.7.2.1. Multiplicidad del ángulo de contacto.....	385
2.7.2.2. Histéresis del ángulo de contacto.....	387
2.7.2.3. Ecuaciones de Cassie y Wenzel .....	390
2.7.2.4. Ecuación de Cassie-Baxter .....	391
<b>2.7.3. Modelización del proceso de contacto de las gotas con el substrato .....</b>	<b>394</b>
2.7.3.1. Fluidos susceptibles a ser impresos por sistemas Inkjet DOD .....	395
2.7.3.2. Deposición estable de las gotas.....	399
<b>2.7.4. Impacto y deposición de gotas milimétricas.....</b>	<b>402</b>
<b>2.7.5. Impacto y deposición de gotas de dimensiones reducidas (Sistemas Inkjet DOD).....</b>	<b>411</b>
<b>2.7.6. Reproducción de líneas y patrones de forma estable, mediante la deposición de gotas de dimensiones reducidas .....</b>	<b>413</b>
<b>2.8. SOLIDIFICACIÓN DE LAS GOTAS Y FORMACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DEL MATERIAL FUNCIONAL .....</b>	<b>429</b>
2.8.1. Efecto de la mancha de café en tintas funcionales (suspensiones).....	429
2.8.2. Conductividad eléctrica de las líneas y patrones estables reproducidos mediante la deposición secuenciada de un tren de gotas cuyo material funcional constituye una suspensión altamente cargada de nanopartículas de plata .....	437
<b>2.9. SISTEMA DE IMPRESIÓN INKJET UTILIZADO EN EL EQUIPO NHIBRID32D .....</b>	<b>449</b>
2.9.1. Algoritmo para el tratamiento de imágenes.....	450
2.9.2. Algoritmo de reproducción.....	452
<b>2.10. SISTEMAS DE REPRODUCCIÓN TRIDIMENSIONALES Y MULTIMATERIALES BASADOS EN LOS SISTEMAS INKJET .....</b>	<b>459</b>
<b>2.11. LISTADO DE FIGURAS DEL VOLUMEN 1 .....</b>	<b>475</b>
<b>2.12. LISTADO DE TABLAS DEL VOLUMEN 1 .....</b>	<b>509</b>
<b>2.13. REFERENCIAS DEL VOLUMEN 1 .....</b>	<b>511</b>

# Capítulo 1

## 1.1. RESUMEN / RESUM / SUMMARY

### Resumen

En las tres últimas décadas, se ha producido una transición hacia lo digital en todos los ámbitos y las fábricas no han sido ajenas a este fenómeno. Éstas han ido incorporando sistemas de Diseño Asistido por Computación (del inglés: Computer-Aided Design (CAD)) o softwares de Fabricación Asistida por Computador (Computer-Aided Manufacturing: CAM), de ingeniería asistida por ordenador (Computer-Aided-Engineering: CAE) así como autómatas, robots, y sistemas de control en tiempo real, etc., o la modelización y recreación virtual de procesos o de fábricas enteras con softwares de simulación.

Todos estos avances han permitido procesar a gran velocidad ingentes cantidades de datos y manejar sistemas mecánicos, superando los límites conocidos de fiabilidad y precisión. Sin embargo, los procesos de fabricación, aunque asistidos por controles avanzados siguen siendo mayoritariamente tradicionales.

Estos métodos tradicionales se enfrentan a limitaciones, ya no de control, sino físicas, como la imposibilidad de realizar geometrías complejas. Situación que bloquea la creatividad y constituyen una barrera, muchas veces infranqueable, al desarrollo de nuevos productos de alto valor añadido o con nuevas funcionalidades.

Las tecnologías de fabricación aditiva, aprovechando el conocimiento de la era digital, permiten superar dichas limitaciones y suponen una auténtica revolución respecto a los procesos tradicionales de fabricación, al permitir construir las piezas mediante la consolidación capa a capa de un material, en lugar de arrancarlo (mecanizado, troquelado,...), o conformarlo con ayuda de utillajes y moldes (fundición, inyección, plegado,...).

La fabricación aditiva permite reducir la distancia entre lo concebible y lo realizable, desde un punto geométrico confiere a los diseñadores una gran libertad y con ello abre un nuevo campo para explotación de la individualidad de los consumidores (la personalización), por otro lado, también permite al diseñador pasar de un objeto digital a uno real de forma sencilla, planteando una desconexión casi total entre el diseño de un objeto y su fabricación. Por ende, tiene el potencial de esbozar un futuro donde los centros productivos existen; deslocalizados, trabajando en red, y que de forma colaborativa multiplican medios y recursos, reduciendo desplazamientos, retrasos y residuos. Afín de proveer los productos

que, de forma virtual se almacenan como pedidos, es decir, necesidades que la sociedad del conocimiento o de la información, solicita.

La fabricación por adición de material es una tecnología que, en comparación con otras se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo y está llamada a liderar los cambios que ya empiezan a cristalizarse en la industria. Sus limitaciones ahora mismo condicionadas por el estado de la técnica actual no radican en el proceso, sino en los materiales uno de sus puntos débiles, así como su coste y productividad. De manera que, pese a ello existen sobrados evidencias que indican que nos encontramos en los primeros días de posiblemente uno de los catalizadores de los cambios que están por venir, y en los cuales se sustentará el funcionamiento del mundo en los próximos años. Los ordenadores han cambiado nuestras vidas, al igual que Internet, ahora es el turno de la fabricación digital en todas sus formas y la fabricación aditiva es una de ellas.

En los últimos años, podemos ver que entre 2002 y 2004 surgieron los primeros fab-labs; en 2004 aparecieron al mismo tiempo Facebook, Arduino y RepRap; en 2005 nació YouTube; Twitter en 2006..., toda una serie de acontecimientos secuenciados que están relacionados de una u otra forma con el hecho de tener acceso a nuevas herramientas que nos han permitido pasar a convertirnos tanto en productores como consumidores y tanto de contenido digital como ahora, de objetos y dispositivos que tienen una vida en el mundo físico. En este aspecto el término prosumer debe ser traído a colación.

En la actualidad la fabricación aditiva es un foco de atención en toda Europa. Los principales programas de financiación europeos en I+D tienen diferentes convocatorias abiertas en este tipo de tecnología, demostrando así el gran potencial e interés que suscita. En este aspecto este trabajo de investigación, nace fruto de la necesidad del entramado industrial barcelonés por satisfacer las nuevas demandas de la sociedad de la información en la fabricación de componentes eléctricos y electrónicos, afín de mantener su consolidada presencia en el ámbito del diseño, desarrollo e implementación de aplicaciones cerámicas multicapa. Concretamente es una consecuencia del proyecto Nhibrid32D.

La presente tesis nace fruto de las problemáticas a las que se tuvo que hacer frente en el desarrollo del proyecto Nhibrid32D, en ella se aborda el diseño, desarrollo y construcción de un sistema de fabricación aditiva híbrido multimaterial, fundamentado en la combinación de las tecnologías DLP (Digital Light Processing) junto con la deposición por chorro de tinta (Inkjet) de materiales funcionales. Sin embargo, se centra y profundiza en éste último y extrapolándose bajo los conceptos del Polyjet y mediante la aplicación de cabezales Inkjet del tipo bend accionados por piezoeléctricos, se exploran nuevas posibles aplicaciones en donde conferir a los elementos reproducidos nuevas de propiedades y funcionalidades, afín de incrementar su interacción con el usuario.

## Resum

En les tres últimes dècades, s'ha produït una transició cap al digital en tots els àmbits i les fàbriques no han estat alienes a aquest fenomen. Aquestes han anat incorporant sistemes de Disseny Assistit per Computació (De l'anglès: Computer-Aided Design (CAD)) o programaris de Fabricació Assistida per Computador (Computer-Aided Manufacturing: CAM), d'enginyeria assistida per ordinador (Computer-Aided-Engineering: CAE) així com autòmats, robots, i sistemes de control en temps real, etc., o la modelització i recreació virtual de processos o de fàbriques senceres amb programaris de simulació.

Tots aquests avanços han permès processar a gran velocitat ingents quantitats de dades i manejar sistemes mecànics, superant els límits coneguts de fiabilitat i precisió. No obstant això, els processos de fabricació, encara que assistits per controls avançats segueixen sent majoritàriament tradicionals.

Aquests mètodes tradicionals s'enfronten a limitacions, ja no de control, sinó físiques, com la impossibilitat de realitzar geometries complexes. Situació que bloqueja la creativitat i constitueixen una barrera, moltes vegades infranquejable, al desenvolupament de nous productes d'alt valor afegit o amb noves funcionalitats.

Les tecnologies de fabricació additiva, aprofitant el coneixement de l'era digital, permeten superar aquestes limitacions i suposen una autèntica revolució respecte als processos tradicionals de fabricació, en permetre construir les peces mitjançant la consolidació capa a capa d'un material, en lloc d'arrencar-ho (mecanitzat, encunyat,...), o conformar-ho amb ajuda d'utilitatges i motlles (fosa, injecció, plegat,...).

La fabricació additiva permet reduir la distància entre el concebible i el realitzable, des d'un punt geomètric confereix als dissenyadors una gran llibertat i amb això obre un nou camp per a explotació de la individualitat dels consumidors (la personalització), d'altra banda, també permet al dissenyador passar d'un objecte digital a un real de forma senzilla, plantejant una desconexió gairebé total entre el disseny d'un objecte i la seva fabricació. Per tant, té el potencial d'esbossar un futur on els centres productius existeixen; deslocalitzats, treballant en xarxa, i que de forma col·laborativa multipliquen mitjans i recursos, reduint desplaçaments, retards i residus. Afí de proveir els productes que, de forma virtual s'emmagatzemen com a comandes, és a dir, necessitats que la societat del coneixement o de la informació, sol·licita.

La fabricació per addició de material és una tecnologia que, en comparació d'unes altres es troba en les seves primeres etapes de desenvolupament i està cridada a liderar els canvis que ja comencen a cristal·litzar-se en la indústria. Les seves limitacions ara mateix condicionades per l'estat de la tècnica actual no radiquen en el procés, sinó en els materials un dels seus punts febles, així com el seu cost i productivitat. De manera que, malgrat això existeixen sobrats evidències que indiquen que ens trobem en els primers dies de possiblement un dels catalitzadors dels canvis que estan per venir, i en els quals se

sustentarà el funcionament del món en els propers anys. Els ordinadors han canviat les nostres vides, igual que Internet, ara és el torn de la fabricació digital en totes les seves formes i la fabricació additiva és una d'elles.

En els últims anys, podem veure que entre 2002 i 2004 van sorgir els primers fab-labs; en 2004 van aparèixer al mateix temps Facebook, Arduino i RepRap; en 2005 va néixer YouTube; Twitter en 2006..., tot un seguit de esdeveniments seqüenciats que estan relacionats d'una o una altra forma amb el fet de tenir accés a noves eines que ens han permetent passar a convertir-nos tant en productors com a consumidors i tant de contingut digital com ara, d'objectes i dispositius que tenen una vida al món físic. En aquest aspecte el terme prosumer ha de ser portat a col·lació.

En l'actualitat la fabricació additiva és un focus d'atenció en tota Europa. Els principals programes de finançament europeus en R+D tenen diferents convocatòries obertes en aquest tipus de tecnologia, demostrant així el gran potencial i interès que suscita. En aquest aspecte aquest treball de recerca, neix fruit de la necessitat de l'entramat industrial barceloní per satisfer les noves demandes de la societat de la informació en la fabricació de components elèctrics i electrònics, afí de mantenir la seva consolidada presència en l'àmbit del disseny, desenvolupament i implementació d'aplicacions ceràmiques multicapa. Concretament és una conseqüència del projecte Nhibrid32D.

La present tesi neix fruit de les problemàtiques a les que es va haver de fer front en el desenvolupament del projecte Nhibrid32D, en ella s'aborda el disseny, desenvolupament i construcció d'un sistema de fabricació additiva híbrid multimaterial, fonamentat en la combinació de les tecnologies DLP (Digital Light Processing) juntament amb la deposició per raig de tinta (Inkjet) de materials funcionals. No obstant això, se centra i aprofundeix en aquest últim i extrapolant-se sota els conceptes del Polyjet i mitjançant l'aplicació de capçals a raig de tinta del tipus bend accionats per piezoelèctrics, s'exploren noves possibles aplicacions en on conferir als elements reproduïts noves propietats i funcionalitats, afí d'incrementar la seva interacció amb l'usuari.



## Summary

In the last three decades, there has been a digitalization in all areas and factories have not been exempt from of this phenomenon. These have been incorporating Computer Assisted Design (CAD) systems or Computer Assisted Manufacturing (CAM) software, computer-aided engineering (CAE) as well as automata, robots, and real-time control systems, etc., or the modelling and virtual recreation of processes or entire factories with simulation software.

All these advances have allowed us to process huge amounts of data at high speed and operate mechanical systems exceeding the known limits of reliability and precision. However, manufacturing processes, although assisted by advanced controls, are still mostly traditional.

These traditional methods face limitations, not control related, but physical, such as the impossibility of making complex geometries. These situations block creativity and constitute a barrier, often impassable, to the development of new products with high added value or with new functionalities.

The technologies of additive manufacturing, taking advantage of the knowledge of the digital age, overcome these limitations and represent a real revolution with respect to traditional manufacturing processes, allowing to build the pieces by consolidating a material layer by layer, instead of cutting it (machining, die-cutting, ...) or conforming it with the help of tools and moulds (casting, injection, bending, ...).

Additive manufacturing allows reducing the distance between the conceivable and the feasible, from a geometric point it gives the designers great freedom and thus opens a new field for exploitation of the individuality of the consumers (personalization). On the other hand, it also allows the designer to move from a digital object to a real one in a simple way, posing an almost total disconnection between the design of an object and its manufacture. Therefore, it has the potential to outline a future where productive centres exist, but they are relocated, working in a network, and collaboratively multiplying means and resources, reducing displacements, delays and waste. In order to provide the products that, in a virtual way, are stored as orders, that is, needs that the society of knowledge or information requests.

The manufacturing by addition of material is a technology that, in comparison with others, is in its early stages of development and is called to lead the changes that are already beginning to crystallize in the industry. Its limitations right now which are conditioned by the current state of the art do not lie in the process, but in the materials, one of its weak spots, as well as its cost and productivity. So, despite this, there is plenty of evidence that indicates that we are in the early days of possibly one of the catalyst of the changes that are to come, and which will sustain the functioning of the world in the coming years. Computers have changed our lives, as well as the Internet, and now it is the turn of digital manufacturing in all its forms; and Additive Manufacturing is one of them.

In recent years, we can see that between 2002 and 2004, the first fab-labs emerged; in 2004, Facebook, Arduino and RepRap appeared at the same time; in 2005 YouTube was born; Twitter in 2006 ... A whole series of sequenced events that are related in one way or another to having access to new tools that have allowed us to become both producers and consumers, and in both digital content and now, objects and devices that have life in the physical world. In this aspect, the term prosumer must be brought up.

At present, Additive Manufacturing is a focus of attention throughout Europe. The main European funding programs in R & D have different open calls in this type of technology, demonstrating the great potential and interest that it raises. In this aspect, this research work arises as the result of the need of the industrial network of Barcelona to meet the new demands of the information society in the manufacture of electrical and electronic components, in order to maintain its consolidated presence in the field of design, development and implementation of multilayer ceramic applications. Specifically, it is a consequence of the project Nhibrid32D.

This thesis deals with the design, development and construction of a multimaterial hybrid Additive Manufacturing system, based on the combination of DLP (Digital Light Processing) technologies together with the ink jet deposition (Inkjet) of functional materials, deepening in the latter and extrapolating under the concepts of the Polyjet, its new possible applications by means of the use of Inkjet heads of the bend type powered by piezoelectric. Those applications are explored in order to confer new properties and functionalities to the reproduced elements, in order to increase their interaction with the user.

This thesis is the result of the problems that had to be faced in the development of the Nhibrid32D project, which addresses the design, development and construction of a multimaterial hybrid additive manufacturing system, based on the combination of DLP technologies (Digital Light Processing) together with the ink jet deposition (Inkjet) of functional materials. However, it focuses and delves into the latter, and extrapolated under the concepts of the Polyjet and through the application of Inkjet heads of the bend type powered by piezoelectric, new possible applications are explored in which to confer on the reproduced elements new properties and functionalities, related to increase their interaction with the user.

## 1.2. OBJETIVO DE LA TESIS

### 1.2.1. Contexto y motivación

La presente tesis nace fruto de las problemáticas a las que se tuvo que hacer frente en el desarrollo del proyecto Nhibrid32D, en el cual se aunó los esfuerzos de un grupo de investigadores de marcado carácter multidisciplinar. Éste proyecto de investigación del programa Retos Colaboración del Ministerio de Economía y Competitividad (Nhibrid32D: RTC-2015-3497-7), permitió a la Fundació CIM investigar en sistemas de fabricación aditiva híbridos con fines electrónicos, fundamentos de éste trabajo de investigación. Es por ello que para poder afrontar con éxito los objetivos que a continuación se enumeran es necesario definir los entes participantes y el papel que desempeñaron en dicho proyecto.

#### **FAE**

Francisco Albero, S.A. empresa fundada en el 1952 y focalizada en la fabricación de dispositivos electromecánicos para el sector automotriz, tanto para primer equipo como para recambio.

Tras décadas en la investigación y desarrollo tecnológico le ha permitido obtener un importante Know-How propio en donde cabe resaltar desarrollos en el campo de los materiales, las electrocerámicas y en los sensores de gases. Recientemente y fruto de esta constante actividad en I+D+i puso en marcha una Sala Blanca de procesado de Cerámicas Electrónicas, única en España y singular en el Sur de Europa.

Una de las tecnologías que posee FAE relacionada con las tareas a desarrolladas dentro del proyecto Nhibrid32D, es tecnología cerámica multicapa que, si bien existen algunos centros de investigación que han trabajado en esta tecnología en general se trata de una tecnología con muy poca experiencia en nuestro país, siendo FAE siendo la única empresa que la está explotando comercialmente en estos momentos.

#### Papel desempeñado por FAE en el proyecto Nhibrid32D.

El conocimiento avanzado fruto de años de experiencia en la tecnología de cosinterización cerámico de baja temperatura LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) aliado a la tecnología de caracterización que dispone FAE, hace que sea una empresa con capacidad de formular suspensiones tanto de materiales metálicos como materiales cerámicos, así como también en la adaptación de barbotinas para ser aplicadas en tape casting y serigrafía junto con la sinterización de las mismas. Además sus conocimientos en el empleo de resinas fotosensibles para el sellado y la protección de conectores fueron esenciales en la formulación de barbotinas para impresión por DLP.

## **FBG-UB**

La Fundació Bosch i Gimpera (FBG), creada en el año 1983, es el centro de transferencia de conocimiento, tecnología e innovación de la Universitat de Barcelona (UB), y tiene por objeto, entre otros, promover, promocionar y gestionar proyectos de investigación y servicios a las empresas y otras instituciones públicas o privadas.

En el proyecto Nhibrid32D a través de la Fundació Bosch i Gimpera el departamento de electrónica de la Universidad de Barcelona formo parte del equipo investigador.

### Papel desempeñado por FBG-UB en el proyecto Nhibrid32D.

A lo largo de estos años FBG-UB ha adquirido una gran experiencia en impresión 2D mediante Inkjet, y en el uso de tintas funcionales. Por este motivo FBG-UB fue junto con FAE encargado del desarrollo y formulación de tintas metálicas para el sistema Inkjet 2D, así como en el diseño y la caracterización de dispositivos electrónicos demostradores de la utilidad de esta innovación tecnológica.

Por otro lado, en diversos proyectos FBG-UB también ha participado en la caracterización de materiales cerámicos, y especialmente de LTCC, con lo cual ha adquirido una importante experiencia en este campo la cual fue útil en el desarrollo de dicho proyecto de colaboración.

## **FUNDACIÓ PRIVADA CENTRE CIM**

La Fundació CIM es una entidad adscrita a la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) diseñada para convertirse en un centro de innovación abierto en el ámbito de las tecnologías de la producción, aportando conocimientos de ingeniería y gestión de la tecnología en un entorno formativo de alto nivel.

La Fundació CIM tiene como misión institucional facilitar herramientas a las empresas y profesionales para que puedan crear y mejorar sus productos y procesos de fabricación, acercando puntos de vista y realidades (empresarial, universitaria, prescriptores, usuarios) con el fin de conseguir que el tejido productivo pueda lograr la máxima competencia tecnológica. Con este foco, la Fundació CIM genera tecnología de producto y proceso mediante la realización de proyectos de I+D+i.

### Papel desempeñado por centro CIM en el proyecto Nhibrid32D.

En este aspecto debido al elevado conocimiento del centro CIM en procesos de fabricación aditiva y en la construcción de equipos capaces de imprimir estructuras tridimensionales mediante diversas tecnologías y materiales, es en este punto donde se define el alcance del proyecto de investigación Nhibrid32D cuyo objetivo era el de aunar los distintos conocimientos multidisciplinares aportados tanto por FAE como por FBG-UB en la materialización de una máquina de fabricación aditiva híbrida multimaterial.

Por otro lado, además de la materialización de dicho equipo afín de verificar la viabilidad de esta tecnología, y con ella la fabricación de dispositivos electrónicos demostrativos. Se profundizó en las posibilidades de los sistemas híbridos multimateriales, gracias a la integración de la tecnología de impresión tridimensional DLP a un sistema de deposición de materiales Inkjet tema central de la presente tesis doctoral.

El marco en el que se ha desarrollado esta tesis doctoral es el siguiente:

- A. Bajo el paraguas de la impresión funcional, en donde la función del objeto reproducido antecede al modo o la técnica que sea utilizado en su reproducción. La impresión Inkjet se presenta como una de las técnicas de impresión digital más prometedoras y al ser una tecnología de deposición sin impacto puede ser utilizada sobre cualquier sustrato y tras los notables avances de las sustancias depositada, ha hecho que electrónica impresa se postule como la tecnología capaz de satisfacer los requisitos de precisión y resolución de la electrónica de bajo rendimiento, aportando flexibilidad a bajos costes.
- B. La tecnología de fabricación aditiva por otro lado, ofrece la posibilidad de fabricar componentes o piezas a partir de un archivo digital con geometrías imposibles por otro tipo de tecnologías convencionales y con menor intervención humana en el proceso. Ejemplos notorios de estas ventajas pueden ser observadas en sectores como el energético, aeronáutico, aeroespacial, donde piezas personalizadas y con topologías optimizadas ofrecen mejores ratios de resistencia/peso lo que conduce a importantes mejoras en los rendimientos energéticos.

Por otro parte, en la actualidad los materiales susceptibles a ser aplicados por las tecnologías aditivas suponen más una limitación que una ventaja, si bien su variedad y accesibilidad aumenta día a día, en comparación con las tecnologías convencionales las posibilidades son más bien escasas [1], y siendo los materiales curiosamente junto con la ilimitación geométrica, dos de las propiedades donde las tecnologías aditivas pueden ofrecer un salto evolutivo importante (geometrías prácticamente ilimitadas y mediante la combinación de múltiples materiales y en graduaciones distintas, la posibilidad de reproducir geometrías con materiales novedosos cuyas propiedades son diseñadas a voluntad).

- C. Finalmente, el tipo de aplicaciones que demanda la sociedad de la información (salud, transporte, seguridad, defensa, energía y comunicaciones) obliga a aunar sistemas digitales, analógicos, de radiofrecuencia y potencia que son difícilmente integrables en un único circuito monolítico de silicio. En la última década y para dar respuesta a esta problemática, ha aparecido el concepto "More than Moore", o de integración heterogénea (también denominada "System in Package"-SiP), como camino alternativo a la ley de Moore [2]. Por su versatilidad funcional (electromagnética, térmica, mecánica), de integración, procesado monolítico y coste, el LTCC es la tecnología mejor posicionada para dar respuesta a este reto y convertirse en la tecnología habilitadora de la integración heterogénea de sistemas electrónicos de altas prestaciones [3].
- D. Por último, a través de la tecnología LTCC en combinación con las tecnologías aditivas anteriores, presenta el potencial de alcanzar la integración heterogénea de sistemas electrónicos dentro de una estructura tridimensional las resoluciones alcanzadas en dichos procesos determinaran el nivel de integración y las prestaciones del objeto reproducido.

## 1.2.2. Objetivos generales de la presente tesis

El objetivo principal del presente trabajo de investigación es el contribuir al desarrollo de las tecnologías de fabricación aditiva para la obtención de piezas multimateriales. Mi participación en el desarrollo del proyecto Nhibrid32D me ha permitido estudiar e investigar principalmente sobre los sistemas de impresión Inkjet y en segundo lugar DLP, a pesar de que en esta tesis se aborda la integración de ambas en un sistema híbrido, está centrada en los sistemas de deposición de materiales de forma discreta y bajo demanda en régimen de eyección, es decir en sistemas Inkjet.

Los sistemas Inkjet por ser un método de impresión donde la deposición del material se realiza sin contacto, permite la reproducción de patrones de forma rápida y precisa sobre cualquier tipo de sustrato. Estos patrones pueden constituir: un punto, línea, carácter, circuito o imagen, o mediante la superposición de éstas una geometría tridimensional. Gracias a los notables avances de la sustancia impresa bajo el paraguas de la impresión funcional en esta tesis se busca dotar a las geometrías impresas con nuevas propiedades y funcionalidades más allá del carácter estructural del mismo, y en este sentido dotarles de circuitería.

Concretamente la pregunta que subyace en esta tesis es; si en un sistema de deposición de tinta (Inkjet) bidimensional, por lo general basados en la cuatricromía (CMYK del inglés: Cyan, Magenta, Yellow, Black) pueden reproducir una imagen cualquiera, a partir de un archivo digital y mediante de la combinación y graduación de 3 colores fundamentales (Cian, Magenta, amarillo) un número casi infinitos de tonalidades, en una reproducción tridimensional donde además de los colores tendríamos materiales, y teniendo en cuenta que interpretamos el mundo a través de nuestros sentidos (vista, olfato, oído, gusto y tacto) ¿Hasta qué punto podríamos reproducir geometrías tridimensionales con las propiedades que somos capaces de percibir, si partimos desde el inicio de múltiples materiales base combinables, y de ser así porque no con propiedades diseñadas a voluntad? extrapolar esta pregunta y con un sentido más pragmático, menos etéreo, ¿es posible dotar a los objetos reproducidos de una conexión al mundo digital y con ello relacionarnos con dichos objetos a un nivel más íntimo, más allá de su superficie y a través nuestros sentidos?.

La fabricación aditiva permite la reproducción a partir de un archivo digital de objetos tridimensionales personalizables, con una cierta ilimitación geométrica y con una relativamente baja intervención humana. Plantean una desconexión total entre el diseño del objeto y la fabricación del mismo, aunque extrañamente reduce la distancia entre lo concebible y lo realizable. Desde un punto de vista más amplio el desarrollo de estas técnicas tienen el potencial de; a partir del almacenamiento virtual de las piezas, la deslocalización del sistema productivo y a su vez, la unión en red de otros similares, suponiendo un avance sin precedentes en cuanto a cooperación, multiplicando los medios productivos disponibles. Permite la reducción de costes de transporte y manufactura,

pudiendo éstos incluso ser trasladados al usuario final, rompiendo las economías de escalas, reduciendo y en algunos casos hasta eliminado por completo las estrategias especulativas ante posibles escenarios por parte de las empresas, permitiendo el postponement en la cadena de suministros.

### **1.2.3. Objetivos específicos**

Para poder alcanzar estos objetivos generales a continuación se plantean cuatro objetivos parciales o específicos:

1. Analizar el estado del arte en el ámbito de la impresión funcional y de la fabricación aditiva, afín de captar claramente las líneas de investigación de interés que harían progresar la ciencia y la tecnología, proporcionando mejores herramientas para el desarrollo de futuros equipos y productos. Para ello se partirá del conocimiento actual en la impresión tridimensional, fabricación aditiva y los sistemas Inkjet, explorándose su aplicación en el mundo de la fabricación de componentes electrónicos. Finalmente, como un aspecto clave de la investigación se ahondará en la combinación de procesos aditivos con múltiples materiales.
2. Aportar un modelo que me permita a través de un sistema Inkjet DOD por piezoeléctricos y particularizado en los del tipo bend, reproducir líneas y patrones continuos desde un punto de vista eléctrico, sobre un sustrato mediante la deposición de gotas de una suspensión de nanopartículas de plata. El proyecto Nhibrid32D en este caso supuso el banco de ensayos para tal fin.
3. A partir del desarrollo e implementación del sistema de impresión híbrido multimaterial comentado anteriormente y que en este aspecto aparece como contexto de la tesis, capaz de combinar de forma novedosa la impresión 3D por medio de la tecnología DLP (Digital Light Processing) con un sistema de deposición de materiales Inkjet, idear y reproducir demostradores que validen la posibilidad de dotar éstos con nuevos atributos.
4. Debido a la versatilidad que ofrece en cuanto a aplicaciones y posibilidades, que ofrecen los sistemas Inkjet, se busca ahondar en los cimientos en los que se sustenta la impresión funcional y se planteará nuevas líneas de investigación y posibles aplicaciones.

## 1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo de investigación se encuentra dividido en 4 capítulos. En el primer capítulo se detallan los objetivos y las condiciones en las que se ha llevado a cabo la presente tesis doctoral seguida de un repaso del estado del arte. En este aspecto, se ha considerado oportuno puesto que deriva del proyecto Nhibrid32D anteriormente explicado, dividir el estado del arte en tres sub apartados: en el primero y de forma superficial se establecen las necesidades que llevaron al desarrollo de un sistema de impresión híbrido multimaterial a fin de reproducir componentes electrónicos cerámicos multicapa. En los siguientes apartados (segundo y tercero) se repasa el estado del arte de la fabricación aditiva y finalmente el estado de la impresión por tecnología Inkjet.

El segundo capítulo constituye uno de los apartados más importantes de la presente tesis en donde se exponen los fundamentos tenidos en cuenta en el control del sistema Inkjet desarrollado para el proyecto Nhibrid32D. El estudio e investigación llevada a cabo en este ámbito permite aplicar estas bases al futuro desarrollo de sistemas de deposición de materiales, fundamentados en la ruptura de chorros libres a voluntad y en régimen de eyección.

En el tercer capítulo se abordan algunas de las particularidades del sistema de impresión híbrido multimaterial desarrollado en el proyecto Nhibrid32D, de forma superficial y a modo de aportar contexto, así como también algunos de los requerimientos, especificaciones y configuración e integración de los sistemas, son expuestos en este capítulo.

Finalmente, en el cuarto capítulo se muestran algunas de las pruebas objetos, y piezas llevadas a cabo y reproducidos a través del equipo híbrido del proyecto de investigación Nhibrid32D.



## 1.4. ESTADO DEL ARTE

Nos encontramos en una época de grandes cambios, los hay quienes sostienen, que en realidad vivimos el fin de una era, que dará paso a otra que reinterpretará nuestra civilización a todos los niveles. Conceptos como “era o “sociedad postindustrial, de la información del conocimiento” o “sociedad digital” son algunos de los términos que cada día toman más protagonismo y que se han acuñado en el intento por identificar y entender el alcance de los cambios introducidos por el desarrollo de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC’s). Pero mientras el debate prosigue en el ámbito teórico, la realidad corre por delante y solo el tiempo dirá los nombre y términos que utilizaremos para definir lo que comenzamos a vivir.

Las máquinas, como evoluciones formales de las herramientas, han estado con nosotros desde el inicio del desarrollo cultural. Primero como extensiones de los seres humanos, y luego como artefactos independientes de la manipulación del hombre. Pero, a pesar de que las máquinas siempre han acompañado al hombre, éstas no se han relacionado de la misma manera a través del tiempo con él. De las divisiones hechas por el autor Alvin Toffler en su libro “la tercera ola”, a continuación se abordan los cuatro hitos o etapas claves en la historia que marcan un cambio en la trascendental en dicha relación.

Así pues atendiendo a dichos hitos, en una primera etapa el humano se relacionó de una manera simple y directa con sus herramientas, la relación “hombre-herramienta” se fundamentaba en la experiencia, a través del ensayo y el error, y la acumulación lenta de conocimientos para optimizar el uso de la energía humana en el desempeño de una función. La cocción de los alimentos en este sentido permitió la asimilación de nutrientes de una forma acelerada, que en definitiva potenció el desarrollo físico del hombre y con la invención del fuego la prolongación útil de las horas del día.

Posteriormente con el asentamiento del humano a través de la agricultura, se multiplicó las posibilidades de innovación y a su vez, lo hizo entrar en una segunda etapa histórica. Surgieron los establecimientos, con ello las aldeas, pueblos y finalmente las incipientes ciudades. Los registros históricos dan fe de la cantidad de innovaciones que surgieron a su paso en cuanto a mecanismos, ciencia, técnica y tecnología. Con la escritura, el progreso matemático, la aritmética, el álgebra, la trigonometría y el inicio de la documentación de los conocimientos, su reproducción evolucionó la técnica para dar pasó al método científico (fundamentada en la observación sistemática, la medición, la experimentación, la formulación, el análisis y la modificación de hipótesis) es decir, una filosofía basada en hechos matemáticos irrefutables. Por otra parte, las herramientas evolucionaron a máquinas (artilugios capaces de transformar una energía para realizar un trabajo). Y con el

renacimiento, la ilustración, la época de las luces, la industria y el comercio se empezó a cocer el caldo de cultivo de una tercera etapa de la historia, la revolución industrial.

Se llamó revolución porque, en efecto, transformó de una manera radical la forma en la que vivíamos, consumíamos, y percibíamos la existencia. Soportada en el modernismo, y con la idea de “progreso”, la revolución industrial explotó todo el potencial del capitalismo de producción, y asimismo, la cantidad de artilugios técnicos necesarios para la producción en masa de artículos de consumo masivo y con la democratización los productos, desaparece el artesano, aparece el concepto de trabajador funcional y la división sistémica de tareas en una secuencia de procesos con el fin de maximizar su eficiencia, entramos en el taylorismo y en consecuencia en el fordismo. Es decir, en aquel entonces como relata la historia, los seres humanos pasaron a ser repetidores de movimientos definidos, insertos en la cadena de montaje. En ese momento, la relación entre el hombre y la máquina se transformó, pasando de ser una relación directa y apoyada en el ensayo y en el error, a ser una relación mediada por el entrenamiento, y soportada por la repetición.

En el momento en que la revolución industrial empezó a producir objetos en masa, no solo se democratizó la técnica, sino que, a su vez, se democratizó la forma, pues todo objeto, aparte de su función utilitarista, posee una función comunicativa, soportada por dicha forma es decir, su superficie. En el inicio de la revolución industrial, las geometrías tenían poca o una importancia casi nula a la hora de su manufactura. Los objetos eran “feos”, carentes de formas que evocaran emociones positivas en los individuos (en aquel entonces la cualidad más importante de los objetos de consumo masivo era su función y su coste sin tener nada que ver con la belleza). El aumento de la competitividad y la necesidad de diferenciarse de los competidores al más propio estilo darwiniano, generó la democratización de la belleza como algunos lo llaman, sentando un precedente histórico que obligó, a reconstruir los productos de consumo masivo pensando en la forma en la que el usuario interactuaría con ellos, y cómo dicho usuario respondería ante los estímulos que dicho producto les produciría.

Aparecen términos como ergonomía (focalizada tanto en productos como en procesos), la relación humano-máquina-ambiente toma relevancia y con la producción en cadena, el concepto de elemento intercambiable que desencadenó en la estandarización. Pero mientras el diseño avanzaba en las configuraciones formales y funcionales de los objetos de consumo masivo, la tecnología avanzaba también a su ritmo, creando nuevos materiales, formas de generar energía y nuevas tecnologías de producción. Con la invención de los artilugios electrónicos como el transistor (que revolucionó el campo de la electrónica), un montón de nuevas herramientas se desarrollaron con el fin de alimentar al diseño y la fabricación de los objetos mejorando la relación hombre-máquina, entendiendo máquina ahora como un objeto no como un trasto usado en la industria. De hecho, el transistor, como aparato desarrollado en los años 50, fue la semilla de lo que puede considerarse como cuarta etapa de la historia de la humanidad.

Con el transistor, la electrónica procedió a miniaturizarse y se aumentó el flujo de información que a través de éstos artefactos ahora electrónicos, podían manejar. Con la evolución de los chips (miles de transistores en una placa de silicio), los microchips, los microprocesadores, el incipiente software y las ciencias de la computación, surgió una nueva forma de interacción hombre-máquina, la interacción basada en la lectura de estados, y soportada por el bagaje histórico de productos usados con anterioridad.

A partir de este punto nuestras capacidades se ven aceleradas vertiginosamente. La miniaturización de la electrónica aumentó la potencia computacional de los dispositivos electrónicos. Cosas que eran impensables a la fecha, dispositivos del tamaño de una habitación, con una potencia computacional que permitió enviar el hombre a la luna pasaron a estar disponible, formando parte de los hogares. Esa miniaturización y aumento en la potencia computacional de los artefactos, les dieron características que en el pasado no tenían, como controles predictivos, displays indicadores, cierto nivel de autonomía frente al hombre que las manipula, y la capacidad de seguir órdenes ya más intuitivas y cercanas al pensamiento humano. En este caso, la relación hombre-máquina se daba gracias a la cantidad de conocimientos almacenados en el subconsciente de los individuos, de productos similares en el pasado. Nos referimos a artefactos que emiten una gran cantidad de información para que el usuario tome las mejores decisiones frente a su uso.

Siguiendo esta cronología se hace cada vez más evidente que el hombre tiene una tendencia a humanizar el mundo que le rodea. Cuando un humano se relaciona con otro humano, aunque no hablen los mismos idiomas, pueden llegar a comunicarse con símbolos y signos rudimentarios, gracias a que ambos comparten la misma naturaleza biológica, y están unidos a un mismo legado genético que los hace muy cercanos entre sí. Por otro lado, para entender el mundo, el hombre utiliza sus sentidos, su raciocinio y su capacidad de deducir patrones de comportamiento, usándose a sí mismo como elemento patrón es decir, el hombre antropomorfiza el mundo para poder entenderlo, porque así se entiende a sí mismo y busca similitudes en el exterior que le permitan entender el entorno a partir de sus propias emociones. Si el hombre tiende a antropomorfizar el mundo, era de esperarse que lo hiciera con los objetos, y los dotara de sentimientos, les diera forma “humanoide” y, sobre todo, tratara de interactuar con ellos como si en realidad fueran cuasi-humanos (los autos, por ejemplo, son diseñados de acuerdo con sus funciones, pero ¿el frente, el morro, el frontal no tienen cierta similitud al rostro de un animal y no nos habla el GPS?).

Y esta panacea está lejos de ser conseguida debido a que, hasta la fecha, ha sido imposible dotar a las máquinas del sedimento cultural que comparten todos los seres humanos y algunos animales, por ser entes biológicos con características funcionales congruentes. Queremos objetos que claramente muestren como usarlos a través de su interfaz, que no necesiten instrucciones para ser usados, ni entrenamiento, y que, en la medida de lo posible, no sea necesario usar conocimientos adicionales para uso, salvo el bagaje

adquirido a través del tiempo y de la manipulación de objetos similares (buscamos una relación hombre-máquina más cercana, más íntima).

La miniaturización y avances en las ciencias electrónicas y computacionales aumentaron aún más capacidades a los artefactos modernos, ofreciéndonos la posibilidad de incluso de comunicarnos con ellos, dejarlos funcionando prácticamente sin la interacción humana, prediciendo las posibles decisiones del usuario, recibiendo órdenes en forma “natural”, interpretando las intenciones humanas y reaccionando de manera preventiva en caso de un error accidental... es decir, pasamos de una interacción hombre-máquina en la que se necesitaba el bagaje cultural de objetos similares, a una en la que la propia máquina interpreta al humano, y lo elimina de manera parcial del campo de decisiones. Evidentemente nos acercamos a la ciencia ficción pero estamos rodeados de ejemplos que avalan esta tendencia, en este sentido algunos ya se atreven a vislumbrar un futuro donde las máquinas integradas en nuestro organismo darán paso a un punto de inflexión en la humanidad; “la singularidad” punto en la historia donde la separación entre el hombre y la máquina se hace difusa, y partir de la cual sus relación se vuelve inseparable.

Volviendo al desarrollo histórico de dicha relación y dejando atrás este inciso, desde un punto de vista productivo, el fordismo evolucionó hacia el toyotismo y las filosofías orientales centradas en el trabajo combinado. Pero de una forma más flexible y ajustada, con estrategias especulativas más optimizadas, evolucionado de una concepción local del mundo, a una global, y cuyo carácter finito propicio la entrada de la ecología en el desarrollo de las actividades industriales, instando al desarrollo de políticas respetuosas con el medio ambiente. En consecuencia aparecen nuevos conceptos como; trazabilidad, versatilidad, reciclaje, ciclo de vida (termino asociado al uso de los productos desde su inicio hasta que superan su obsolescencia tecnológica).

Siguiendo ésta línea evolutiva anterior, en la secuencia de hitos hemos dejado al margen el desarrollo de las TIC's no por ser menos importante, sino debido a su trascendencia. Bajo este concepto se aúna las ciencias electrónicas y computacionales con las telecomunicaciones. La transmisión y recepción de señales, de información en general y más recientemente de forma inalámbrica, ha permitido la generación de un nuevo catalizador en el proceso de evolutivo de las capacidades humanas, el internet. Como conjunto descentralizado de redes de comunicación interconectadas y de alcance global, el internet se establece como un nuevo hito, permitiendo que en la relación máquina-máquina se delegue al humano tomando protagonismo solo en ciertas decisiones. En este aspecto recientemente ha surgido el término internet de las cosas que, como consecuencia del afán antropomorfizador del humano y de la necesidad de las empresas de diferenciar sus productos de otros homólogos, buscan a través de este concepto dotar a los objetos cotidianos de una conexión al mundo digital, aumentando la interacción con el usuario.

Lo que actualmente se pretende es evitar la necesidad de adiestramiento del hombre frente al artefacto, ya no solo se busca que los productos sean baratos, sino que sean bellos, adecuados al uso, sustituibles, respetuosos con el medio ambiente y desde hace poco se busca una mejor interacción con el humano, que los artefactos se comuniquen con nosotros a un nuevo nivel, si bien inicialmente esta relación era superficial a través de los sentidos (oído, gusto, tacto, olfato y vista) ahora se busca que esta interacción sea más directa, simple y sobre todo más íntima, y con los medios actuales existentes dotar a los artefactos de dicha capacidad mediante su vinculación con el mundo digital.

De manera que todas las tecnologías de manufactura se enfrentan al reto de conformar objetos, herramientas, artilugios, mecanismos y máquinas a partir de un archivo digital, por ejemplo almacenado en la nube y de la forma más desatendida posible. La fabricación aditiva en este sentido aporta deslocalización, y superadas las restricciones geométricas impuestas por la técnicas tradicionales, abre con ello la posibilidad de la explotación de la identidad individual del consumidores (la personalización) y con múltiples materiales combinados, que tras cumplir una función estructural puede llegar a ofrecer la posibilidad de que éstos puedan percibir, procesar, almacenar y transmitir información. La consecución de dichos objetivos supondría un salto cualitativo sin precedentes en las capacidades del humano sobre la materia.

#### **1.4.1. Tecnología de Cerámica**

Como ya se ha comentado la presente tesis doctoral surge de las problemáticas a las que se tuvo que hacer frente en el desarrollo del proyecto Nhibrid32D. Éste a su vez nace a raíz de las necesidades del entramado industrial barcelonés en la satisfacción de las nuevas demandas y retos que plantea el mundo automotor, en concreto en la fabricación de sensores y componentes electrónicos. Por este motivo, se consideró oportuno comenzar el estado del arte del presente documento aunque de forma superficial, por las necesidades que motivo a dicha empresa en aunar un grupo de investigadores de marcado carácter multidisciplinar a investigar en las aplicaciones de las técnicas aditivas en el desarrollo de dispositivos electrónicos cerámicos multicapa. En este aspecto, la tecnología capa gruesa se establece como el método por excelencia en la fabricación de muchos de estos componentes que al verse expuestos a condiciones extremas recurren al uso de cerámicas por sus excepcionales características para su fabricación, como son: alta estabilidad y resistencia a la corrosión, a la temperatura, al desgaste, alta densidad y dureza, excelente biocompatibilidad y propiedades aislantes eléctricas y térmicas, etc.

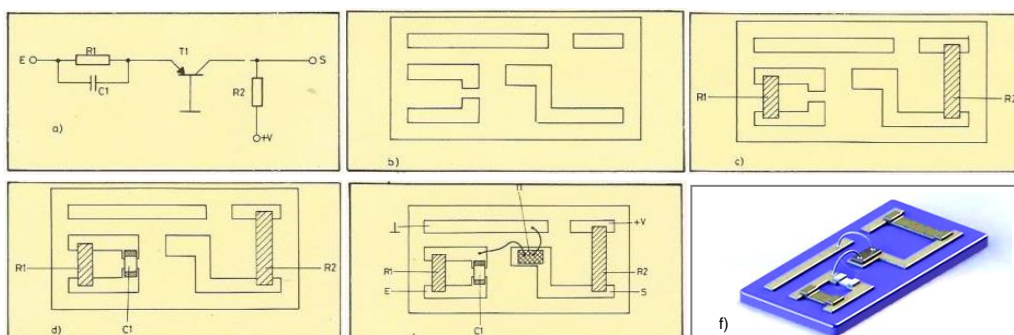
En los últimos años sin embargo ha habido un boom en el uso de la fabricación aditiva para el desarrollo de sensores [4], no obstante el uso de los materiales cerámicos en sistemas híbridos con dichos fines continúan siendo inexistentes u al menos escasos.

### 1.4.1.1. Circuitos híbridos

Prácticamente al mismo tiempo que tuvo lugar el desarrollo de los circuitos integrados (CI), apareció otra nueva tecnología, orientada también hacia la miniaturización de los circuitos convencionales pero con unas reglas bastantes diferenciadas. Los circuitos integrados monolíticos se caracterizan por tener un elevadísimo número de dispositivos microelectrónicos y todos ellos asociados e interconectados entre sí de una forma totalmente inseparable, mientras que los productos obtenidos por la tecnología mencionada o circuito híbrido, combinan la integración de una serie de componentes pasivos (resistencias y condensadores) con otros componentes discretos (activos o no) aunque de pequeño tamaño, que ya se encuentran microencapsulados.

Los circuitos híbridos vienen a cubrir todos aquellos casos en que resulta imposible utilizar un circuito integrado por las características propias de la aplicación, además permite otra serie de posibilidades de integración bajo el diseño del cliente ("custom design") que no ofrece el circuito integrado convencional. Esta interesante alternativa hace que, en la práctica, el mayor número de modelos que se fabrican de circuitos híbridos, correspondan a diseños orientados hacia aplicaciones específicas de clientes y no de tipos estandarizados.

El origen de esta tecnología de integración se remonta a los años cincuenta con el desarrollo de los condensadores cerámicos y la extensión de los mismos a otras aplicaciones, donde el uso de la serigrafía podía ser empleado en la reproducción de electrodos mediante la deposición de pastas metálicas, generalmente a base de metales nobles. Al procedimiento descrito le siguió la deposición de capas de materiales a base de carbón obteniéndose resistencias, etc., el alto nivel de precisión en el proceso permitió una gran nivel de integración (ver Figura 1), aunque, como puede deducirse, se limitó únicamente a los componentes pasivos.



**Figura 1:** Diferentes fases para la obtención de un circuito híbrido de película gruesa a partir de un esquema eléctrico: a) Esquema eléctrico que se desea integrar. b) Substrato con las pistas conductoras. c) Integración de las resistencias. d) Montaje de un condensador discreto. e) Montaje del elemento activo (transistor) y conexiones con hilo. f) Vista del circuito híbrido de película gruesa en 3D [Fuente: elaboración propia].

Posteriormente, las composiciones de carbono evolucionaron a óxidos metálicos (empleados en la actualidad) y finalmente como última fase de esta evolución, se comenzó a incluir sobre el sustrato dieléctrico que contienen las resistencias y condensadores, otra serie de componentes, unidos a los anteriores mediante técnicas especiales de soldadura, y en la mayoría de las ocasiones cubierto por un encapsulado común, denominando al producto obtenido: circuito híbrido de película gruesa.

Este componente presenta una serie de ventajas frente al circuito convencional o al integrado monolítico tales como: precisión, calidad, elevado rendimiento y sobre todo, que pueden acomodarse a cualquier diseño particular, obteniendo los valores de componentes pasivos que se requieran, sin tener que limitarse a la gama de componentes discretos que existen en el mercado, cuyos valores y tolerancias se encuentran previamente establecidos.

Otra tecnología diferente de la anterior que también se utiliza actualmente, es el de la película delgada. En este caso, la deposición de los componentes pasivos sobre el sustrato, se realiza mediante un proceso de vacío, en el que se evapora y deposita una fina capa del material conductor o resistivo sobre la superficie de éste. El trazado de las pistas, se realiza empleando una máscara que protege las zonas que deben quedar sin cubrir o mediante un sistema de eliminación de estas áreas, después de que el sustrato se haya recubierto por completo. Esta tecnología ofrece las mismas posibilidades que la anterior, en lo referente a la capacidad de integración de conductores, resistencias y condensadores, aunque muy superior en cuanto a dimensiones.

Es importante resaltar que durante los años 50, a finales de la Segunda Guerra Mundial, también se producen notables avances en la tecnología del proceso de los materiales cerámicos. Uno de esos avances es el desarrollo y la implementación del tape casting como proceso de fabricación de hojas finas de materiales cerámicos siendo en la actualidad una de las tecnologías ampliamente utilizada en la creación de sustratos cerámicos en aplicaciones eléctricas y de radio.

#### **1.4.1.2. Tecnología de capa gruesa o thick film**

Como se ha comentado anteriormente el desarrollo de la tecnología de capa gruesa o thick film surge con el desarrollo de los circuitos integrados híbridos, con ella se pudo fabricar geometrías con líneas finas conductoras que permitieron integrar un número elevado de componentes en un único sustrato. Hoy en día, la esencia de los procesos thick film permanece sin alteraciones sustanciales, sin embargo la evolución en las composiciones de las diferentes pastas y/o barbotinas han abierto nuevos campos de aplicación de esta tecnología que ya goza de cierta madurez (ver Figura 1).

La tecnología thick film se podría definir como una tecnología en la que se deposita un circuito impreso mediante la técnica de serigrafía (screen-printing). Los materiales a depositar se encuentra en forma viscosa y mediante la superposición de distintas capas se

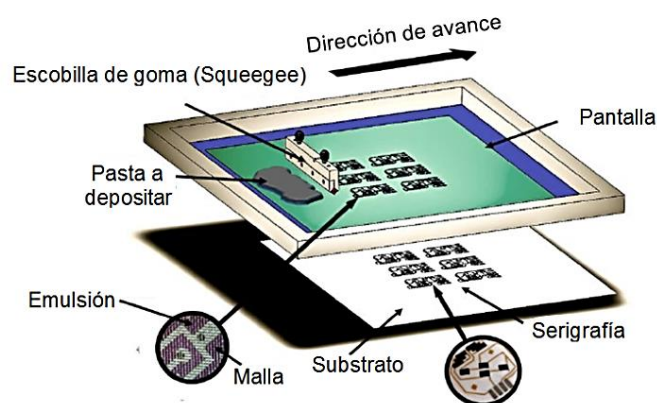
pueden construir distintos componentes pasivos, posteriormente con el objetivo de ayudar su adhesión al sustrato cerámico son calentados a temperaturas de entre 600 y 1550°C [5].

Los sustratos sobre los que se puede aplicar esta tecnología son muy variados en función de las aplicaciones, entre ellos podríamos destacar aplicaciones sobre alúmina, óxido de berilio, nitruro de aluminio, carburo de silicio, etc.

### La serigrafía (screen-printing)

El proceso de serigrafía para la impresión de circuitos impresos es similar al que se emplea en la industria textil o en el sector de las artes gráficas, con la diferencia que en el mundo de la electrónica el grado de precisión y sofisticación de los equipos y materiales, es muy superior.

La serigrafía es una técnica muy antigua, que permite imprimir imágenes sobre cualquier material. Básicamente, es transferir una sustancia viscosa a través de una malla tensada (de acero inoxidable, poliéster o nylon) sobre marco. Por otro lado, dicha malla previamente ha sido tratada con una emulsión sensible a la radiación UV que al solidificarse bloqueará el paso de la tinta en las áreas donde no habrá imagen, quedando libre la zona no curada por donde pasará la tinta. Finalmente durante el proceso de serigrafía propiamente, una escobilla de goma (squeegee) ejerce presión sobre la pasta que a medida que avanza se ve forzada a pasar por las aberturas de la malla (pantalla) depositándose en el sustrato. Parámetros tales como el tipo de tejido de la malla, el grueso de la emulsión, el diámetro del hilo de la malla, el ángulo en el que se ha tejido, así como la dureza y la forma de la escobilla de goma determinan las características finales del circuito impreso. Los parámetros de máquina como pueden ser la fuerza que ejerce y la velocidad de movimiento de la escobilla también juegan un papel crucial en el resultado final del proceso [6].



**Figura 2:** Esquema del proceso de serigrafía [7].

La Figura 2 muestra un esquema del proceso de serigrafía donde se observa una imagen de la ampliación de la malla metálica donde se aprecia tanto las aberturas como la emulsión que bloquea el paso de la pasta.



Una de las ventajas de la tecnología thick film es la posibilidad de trabajar con metales de elevada conductividad como son el oro, la plata, el cobre, el platino y otras aleaciones metálicas. La elección de cada material depende principalmente de los requerimientos de la aplicación, y del coste asumible.

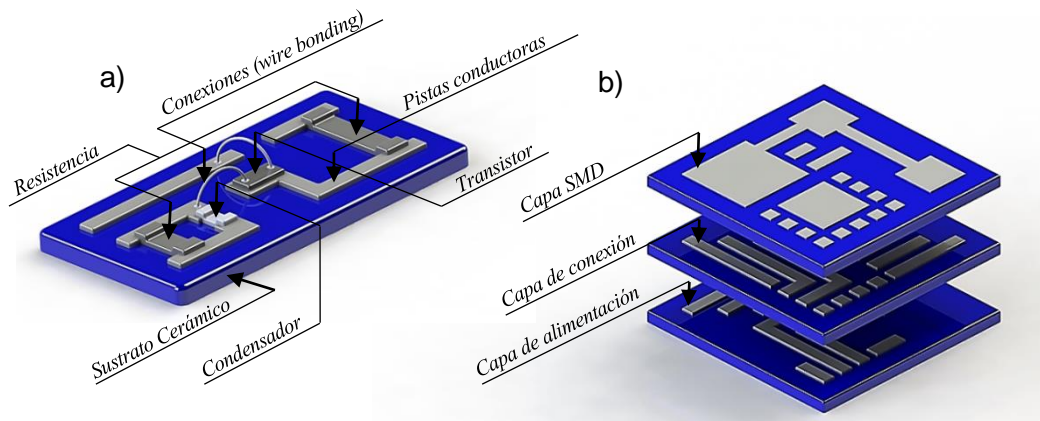
Por otro lado, en cuanto a las pastas utilizadas en procesos thick film, éstas se caracterizan por presentar un comportamiento reológico no-Newtoniano adecuado para ser aplicadas por serigrafía [7], dichas pastas están constituidas por varios componentes en los que cabe resaltar cuatro atendiendo a su función, es decir; un elemento funcional (elemento activo que confiere la propiedad eléctrica), otro de adhesión (su función es la de adherir la pasta al sustrato, por lo general se usan cristales de menor punto de fusión que el elemento activo para que durante la sinterización al penetrar en la irregularidades del sustrato se produzca su anclaje), un ligante orgánico (para mantener en suspensión a los elementos funcionales y los cristales) y un disolvente (junto con el ligante para conferir las características a las pastas reológicas necesarias).

#### **1.4.1.3. Tecnología cerámica multicapa**

En la tecnología cerámica multicapa, a diferencia de la tecnología anterior (thick film) donde se parte de una estructura monolítica inicial, en ésta, se parte de un sustrato cerámico rígido pero en verde (sin sinterizar) el cual pasa por distintas etapas como corte y deposición mediante serigrafía, para posteriormente ser apiladas y, mediante un proceso térmico, ser consolidadas en una única estructura monolítica compuestas de múltiples capas.

Esta tecnología permite alojar en un mismo dispositivo múltiples capas de circuitos impresos que quedan contenidos en una estructura monolítica hermética. Este hecho, aumenta la capacidad de integración de los componentes y aumenta la flexibilidad del diseño (menos elementos por capa, pero la posibilidad de conexión de múltiples capas superpuestas, creando estructuras pseudo 3D) y finalmente el empleo de materiales de baja constante dieléctrica haciendo el papel de sustrato, junto con la posibilidad del empleo de componentes SMD (Surface Mount Devices”) completa la validez de esta tecnología. Que entre otras particularidad solicita un gran el control de los coeficiente de expansión térmica de las distintas pastas o barbotinas (suspensiones cerámicas) utilizadas

La tecnología cerámica multicapa (Figura 3) posee dos variantes por un lado existe la tecnología HTCC (High Temperature Cofired Ceramic), y por otro lado la tecnología LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic). La diferenciación de estas dos tecnologías radica en la temperatura de sinterizado y en consecuencia en los materiales que utilizan. Ambas comparten los mismos procesos de fabricación y la posibilidad de sinterizar al mismo tiempo las cerámicas junto con la circuitería.



**Figura 3:** Imagen conceptual circuito híbrido de capa gruesa (a) y de un dispositivo electrónico multicapa (b) [Fuente: elaboración propia].

#### 1.4.1.3.1. Tecnología HTCC (High Temperature Co-fired Ceramic)

Tradicionalmente este tipo de tecnología cerámica multicapa se basa en el uso de la alúmina u otros óxidos metálicos o nitruros como material base ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{AlN}$ ,...) donde se pueden adicionar algunos elementos que ayudan a la sinterización como pueden ser el  $\text{SiO}_2$ , el  $\text{MgO}$  o  $\text{CaO}$ . La tecnología HTCC fue desarrollada en primera instancia por la empresa IBM a principios de los 80 para incluir dispositivos multicapa metalizados con Molibdeno como base para diferentes sistemas integrados para aplicaciones informáticas [7]. La elevada temperatura de sinterización de la alúmina (aprox.  $1600^\circ\text{C}$ ) limita el número de metales que se pueden emplear en este tipo de tecnología. Las pérdidas eléctricas de estos dispositivos suelen ser mayores que en otras tecnologías, debido a que los metales que se emplean ( $\text{Mo}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Pt}$ ) presentan una resistividad más elevada que la del oro y la plata.

#### 1.4.1.3.2. Tecnología LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics)

La tecnología LTCC fue desarrollada originalmente por Hughes y DuPont con finalidades militares [8], [9] y fue concebida como un híbrido entre las ventajas de las tecnologías de capa gruesa (thick film) y la tecnología HTCC (High Temperature Cofired Ceramics), así pues podría decirse que representa una evolución de las descritas con anterioridad.

En esta tecnología la sinterización ocurre a temperaturas entre los  $800$  y los  $950^\circ\text{C}$  en lugar de los  $1600^\circ\text{C}$  de los sustratos HTCC. Para conseguir dispositivos electrónicos de elevadas prestaciones, los elementos conductores requeridos deben cumplir varias características importantes: buena adhesión al sustrato, una elevada conductividad eléctrica, resistencia a la migración y compatibilidad con el resto de materiales del sistema, esto implica buena soldabilidad y capacidad para realizar procesos de wire bonding (método de conexión entre los circuitos integrados y la placa del circuito impreso). Estas características las encontramos en los metales preciosos, el oro y la plata son a menudo los candidatos empleados u otras aleaciones de con características similares como:  $\text{Ag/Pd}$ , etc. Uno de los

aspectos que presentan en común estos metales, es su temperatura de fusión: 961°C para la plata, 1.063 para el oro y 1.083 para el cobre, temperaturas superiores a la necesitada para la sinterización del sustrato. Es aquí donde entra en juego el término low que se refiere a temperaturas sinterización, generalizando, por debajo de los 950°C.

Los sustratos obtenidos por el proceso de tape casting a partir de una barbotina (suspensiones cerámicas) para aplicaciones microelectrónicas deben cumplir varias características como son: unas excelentes propiedades dieléctricas a altas frecuencias, coeficiente de expansión térmico que se ajuste a los componentes impresos, estabilidad a temperaturas elevadas de trabajo (por encima de 500°C), buenas propiedades mecánicas y estabilidad química. La tecnología LTCC basada en compuestos vitrocerámicos se establece como el mejor candidato para desempeñar este papel.

A continuación en la Figura 4 se muestra un gráfico comparativo entre las distintas tecnologías cerámicas.

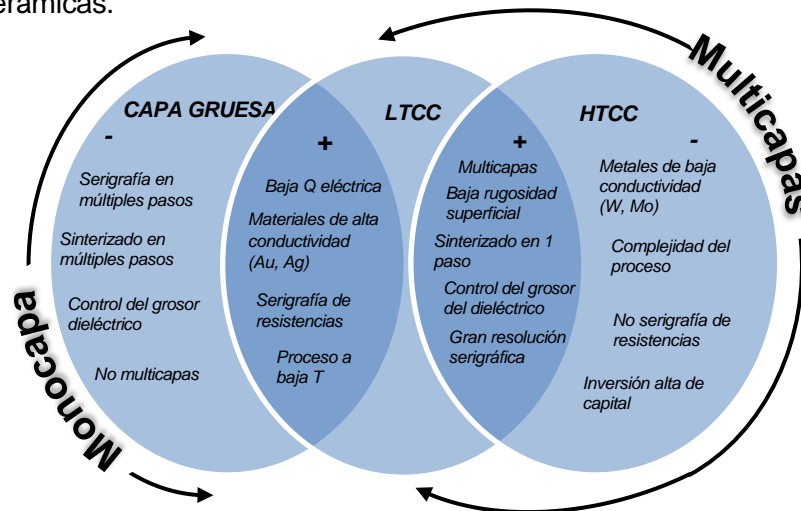


Figura 4: Comparación de las tecnologías cerámicas [10].

Las cerámicas son manipuladas en verde, término que hace referencia a su estado todavía blando y mecanizable, antes de su sinterizado. Por otro lado, a pesar del adjetivo; verde, las cerámicas utilizadas en LTCC suelen ser de color azul el cual se hace más intenso después del sinterizado, esto es debido a las sales de cobalto que incorpora, como por ejemplo el aluminato de cobalto ( $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ). Una composición habitual de estos materiales comprende un 45% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 40% de vidrio y un 15% de compuestos orgánicos. Aunque el material principal o "filler" es alúmina, entre otros óxidos. Respecto a los compuestos orgánicos que forman parte de la composición, existen tres tipos mayoritarios [11]: disolventes, plastificantes y aglutinantes.

Muchos grupos de investigación trabajan en la modificación de los componentes de la cerámica con la finalidad de adaptar las características físico-químicas finales del material a sus necesidades, de ahí la alta variabilidad de LTCC encontradas en el mercado. Como muestra de ello, la Tabla 1 muestra algunos de los fabricantes habituales de cerámicas

verdes. En el caso del proyecto Nhibrid32D las resinas fotosensibles empleadas en el equipo DLP fueron cargadas con partículas cerámicas de LTCC como se podrá apreciar en apartados posteriores.

PROVEEDOR	REFERENCIA
Dupont	<a href="http://www.dupont.com">www.dupont.com</a>
Ferro	<a href="http://www.ferro.com">www.ferro.com</a>
Heraeus	<a href="http://www.heraeus.com">www.heraeus.com</a>
CeramTec	<a href="http://www.ceramtec.com">www.ceramtec.com</a>
ESL Electro-Science	<a href="http://www.electroscience.com">www.electroscience.com</a>
Kyocera	<a href="http://www.kyocera.de">www.kyocera.de</a>
Nikko	<a href="http://www.nikkos.co.jp">www.nikkos.co.jp</a>
Northrop Grumman	<a href="http://www.es.northropgrumman.com">www.es.northropgrumman.com</a>

**Tabla 1:** Listado de fabricantes de cerámicas para usos electrónicos [11].

Comercialmente, las cerámicas de LTCC son distribuidas en forma de polvos, con las cuales se crea una suspensión o barbotina y con ella se producen láminas de grosor variable. Este grosor se controla durante el proceso de Tape casting mediante un sistema Doctor Blade.

Entre las características más importantes a tener en cuenta durante el proceso diseño y fabricación de un dispositivo multicapa por LTCC, son las contracciones que estos materiales sufren durante la volatilización de sus componentes orgánicos después del proceso de colada, siendo éste en algunas cerámicas del entorno al 20%. En general, los valores de contracción son bastante predecibles, de manera que se tienen en consideración y se compensan al realizar el diseño. Este hecho es especialmente crítico cuando en el interior del dispositivo cerámico se pretende integrar componentes de otros materiales.

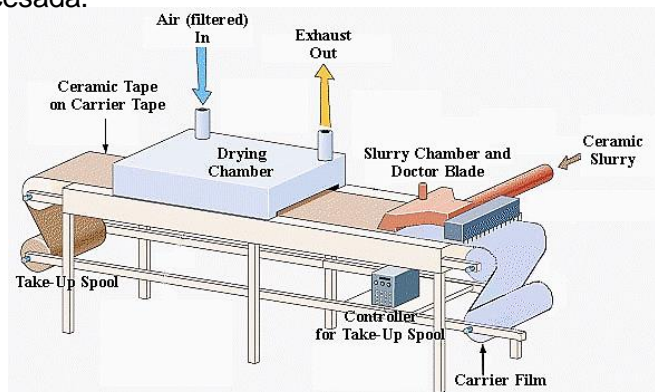
Como ya se ha comentado, el proceso de fabricación de los componentes electrónicos cerámicos tanto para HTCC como para LTCC difieren ligeramente, iniciándose ambos con la creación de la cintas en verde, dicho proceso se le conoce como tape casting y se explica superficialmente a continuación.

### 1.3.1.3.3. Tape casting

El Tape casing es hoy en día una de las tecnologías más utilizadas debido a su elevada eficiencia en la generación grandes superficies planas y finas de material cerámico [12] base de la construcción de circuitos cerámicos multicapa. Las primeras publicaciones y patentes que describen el proceso pertenecen a Glenn Howatt [13] [14] quien es reconocido como el padre del colado en cinta o tape casting. Este proceso comienza con la creación de la barbotina o slurry (suspensión homogénea de cerámica) la cual determinará de forma muy significativa la homogeneidad del producto final.

Posteriormente las barbotinas se vierten de forma controlada encima de una cinta mecánica (proceso Doctor Blade, Figura 5) sobre la cual se halla una película de acetato de celulosa, Teflon®, Mylar®, celofán o en algunos casos PET (Tereftalato de polietileno) donde una de las caras esta siliconada para poder retirar el producto al momento de procesarlo. Finalmente, ésta cinta de material cerámico en verde pasa por una etapa de secado donde se elimina parte del solvente y algunos componentes orgánicos volátiles utilizados en la

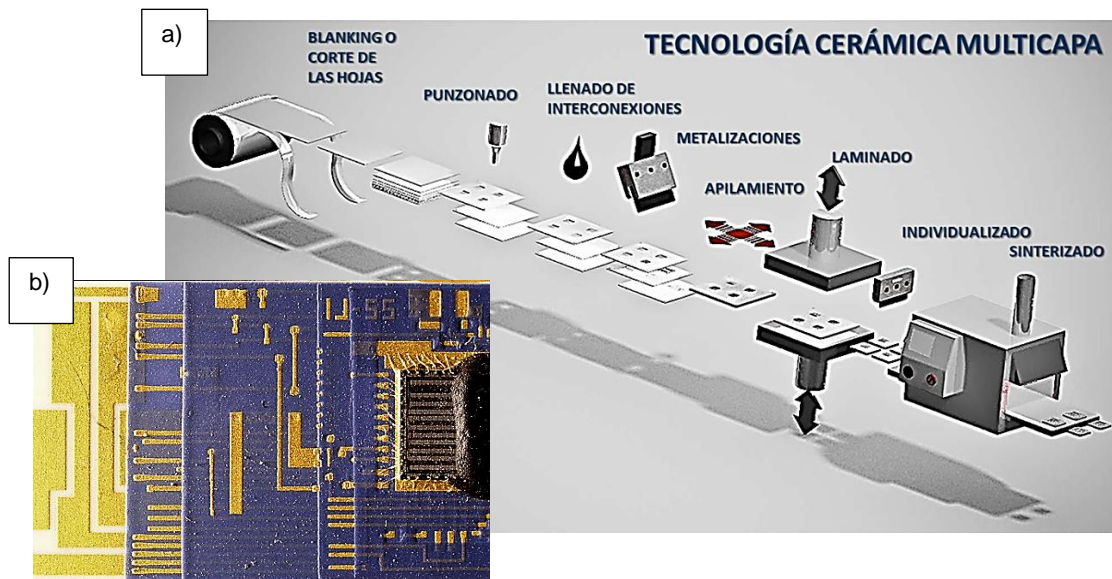
barbotina. Por último, la cinta de cerámica en verde (Green tape) es almacenada para posteriormente ser procesada.



**Figura 5:** Esquema de un sistema de tape casting [15], como etapa previa al procesado en verde de la cerámica.

#### 1.4.1.3.4. Procesado de la cerámica en verde (Green tape)

Una vez generada la cinta en verde (material base tanto para la tecnología HTCC o LTCC), ésta pasa por diferentes etapas o subprocesos hasta finalizar en la sinterización. A continuación en la Figura 6a se muestra un esquema simplificado de dichas etapas.

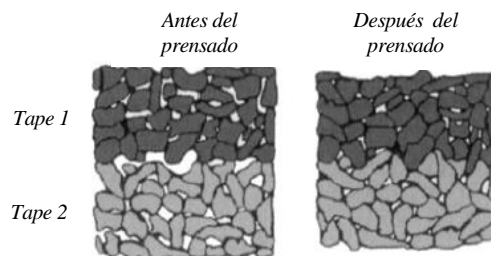


**Figura 6:** Proceso de fabricación de componentes electrónicos cerámicos multicapa (a) [16] Imagen detallada en planta de múltiples capas de LTCC creadas por tape casting dotadas de pistas conductoras depositadas por serigrafía (b) [17].

Como se puede apreciar en la Figura 6ª el primer proceso que tiene lugar en la fabricación de componentes electrónicos multicapa es el corte de las láminas de cerámica en verde (del inglés: “tape Blanking”) tras el troquelado de las hojas se procede al punzonado de cavidades y vías para la comunicación eléctrica entre las diferentes capas. Posteriormente en una tercera etapa dichas vías son llenadas mediante la deposición de pastas metálicas

por serigrafía (Metalizaciones), y/o en algunos casos también se emplea sistemas de inyección de tinta. La reología de la tinta y la geometría de las vías condicionan el tipo de equipamiento a utilizar. La serigrafía se utiliza en pastas de gran viscosidad como son las de Molibdeno o Tungsteno (HTCC) y para vías muy esbeltas. Como ya se ha comentado la serigrafía se utiliza para reproducir tanto circuitería como elementos pasivos.

Posteriormente, una vez se ha procesado individualmente cada hoja, se realiza la correspondiente alineación y apilación de las mismas. Mediante el aporte de temperatura y presión (ver Figura 7) se produce la unión de estas, para finalmente, tras un segunda troquelado de individualización entrar en un último proceso térmico; la sinterización de los dispositivos cerámicos. En esta última etapa los las hojas cerámicas se vuelven inseparables convirtiéndose el dispositivos en una elemento monolítico rígido.



**Figura 7:** Consolidación de la estructura en la segunda fase del apilamiento [8].

Cabe destacar que el sinterizado es un proceso complejo en donde las partículas inicialmente en polvo crean puentes o cuellos entre ellas, soldándose unas con otras debido a la elevada temperatura siendo ésta próxima a su punto de fusión.

Los procesos de sinterización se pueden dar básicamente de dos formas:

- **En fase líquida:** Proceso en el cual la temperatura de sinterización se encuentra por encima del punto de fusión de uno de los constituyentes el cual se funde, de manera que la sinterización tiene lugar en presencia de una fase líquida.
- **En fase sólida:** Es aquel que tiene lugar sobre un polvo sin la formación de una fase líquida.

Adicionalmente se podría añadir que existe una tercera forma en la que el constituyente, debido a su composición, permanece viscoso (silicatos acompañados de óxidos alcalinos) el cual al solidificar posee una estructura vítrea. El sinterizado de las cerámicas en verde se realiza de esta tercera forma mediante un ciclo térmico particular, por tratarse de un material compuesto por vidrio y partículas de alúmina entre otros elementos [9].

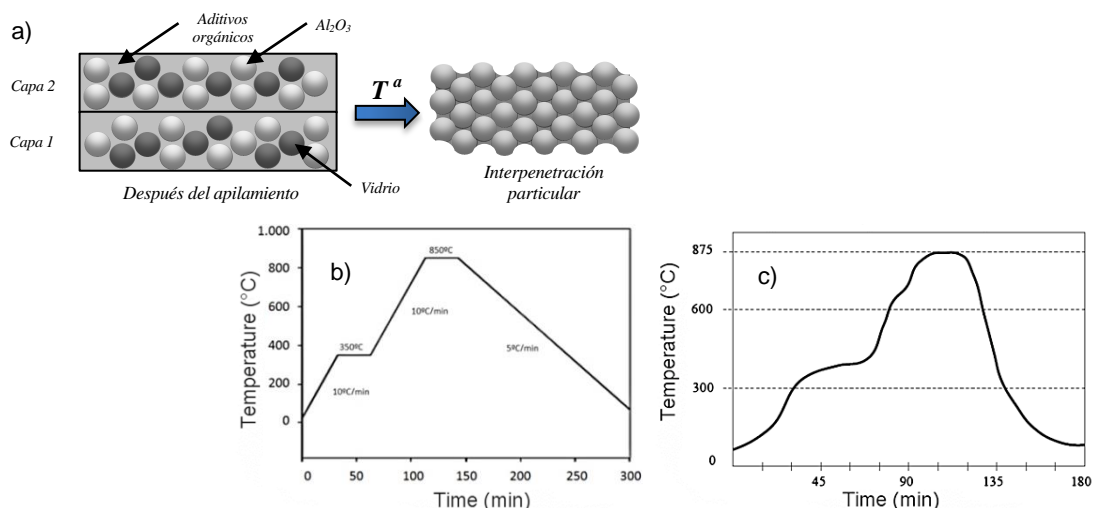
La primera fase de un ciclo térmico de sinterizado consiste en el eliminado o quemado de los aditivos orgánicos que puedan existir en las hojas, aditivos de las tintas y materiales sacrificiales que puedan formar parte del conjunto rellenando cavidades en el dispositivo. En este proceso se aumenta gradualmente la temperatura hasta alcanzar una meseta de



entre 350 y 500°C, pudiéndose realizar en una atmosfera controlada. A partir de este momento la cerámica y las partículas metálicas se encuentran sin su elemento cohesionador y por tanto, el espécimen se podría desmoronar ante cualquier exigencia mecánica.

Una vez finalizado el proceso anterior el ciclo prosigue alcanzando las temperaturas necesarias para el sinterizado de todos los materiales en un monolito multicapa perfectamente cohesionado (en barbotinas de LTCC la segunda meseta puede rondar entre los 750-950°C). En esta segunda parte del proceso es cuando se produce el mayor cambio volumétrico del material. Según DuPont, sus cerámicas encogen un 12,7% en los ejes X-Y y un 15% en el eje Z. Otras cerámicas, como las 0-Shrinkage de Heraeus, no encogen en el eje X-Y (0,2%) y sí en el Z (32%). Como se puede apreciar, estos valores varían en función del material de partida y de la formulación de la barbotina, así como también influye la presión aplicada en la etapa del laminado.

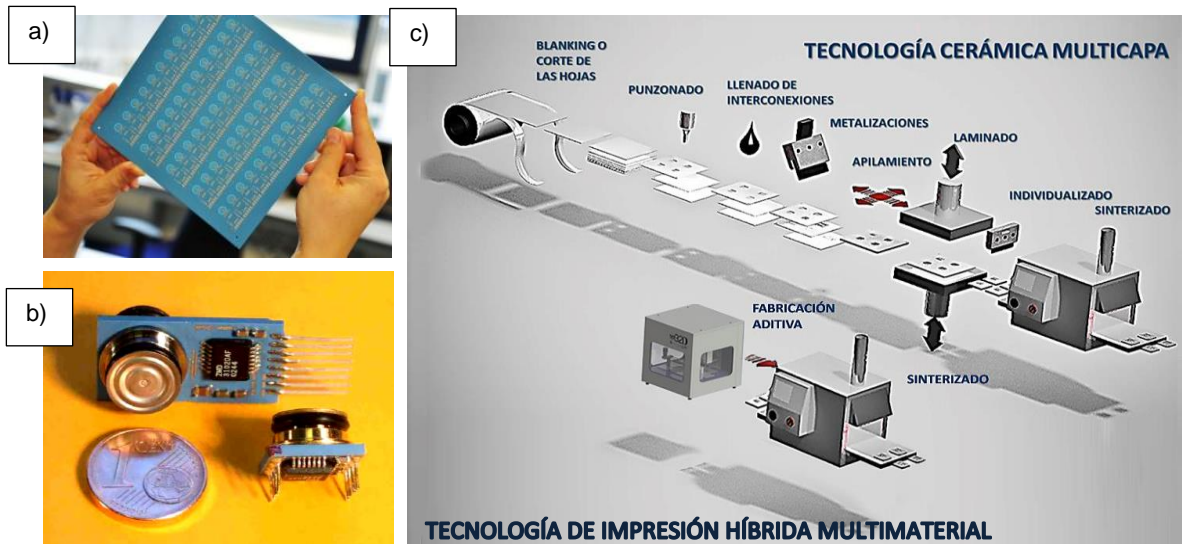
Durante un proceso de sinterización se dan varios cambios microestructurales; en primer lugar se establecen puentes o cuellos entre las partículas, en segundo lugar dichos puentes se engordan y se produce un crecimiento del grano, el cual hace que se reduzcan los poros y finalmente en tercer lugar, estos poros dejan de ser continuos, aumentando la densidad del material. En el caso de las cerámicas en verde, por tratarse principalmente de un material compuesto por vidrio y partículas de alúmina (distintos puntos de fusión), el proceso que se lleva a cabo es más parecido a una co-sinterización de tipo viscoso en donde los granos de alúmina se distribuyen de forma aleatoria en un constituyente, que con el incremento de temperatura se vuelve viscoso envolviendo a estas partículas sólidas. El proceso finaliza con la vitrificación del vidrio al disminuir la temperatura. A continuación se muestra un esquema simple de dicho modelo de sinterización (Figura 8).



**Figura 8:** a) Interpenetración de las partículas de alúmina representadas como esferas tras el proceso de sinterización en la conformación de un bloque sólido homogéneo a partir del apilamiento de múltiples laminas en verde [11], b) Representación de un ciclo térmico de

*sinterización ideal* [18], y c) *Ejemplo del perfil de la curva de calentamiento proporcionada por DuPont para sus cerámicas 951* [19].

Finalmente, una vez constituida las placas de circuito impreso el proceso culmina con el montaje y soldado de los diferentes elementos discretos activos y pasivos con los cuales conformar el dispositivo electrónico (ver Figura 9).



**Figura 9:** a) Laminas de LTCC tras el laminado [20], b) ejemplo de sensor de presión de LTCC [21] y c) proceso actual de fabricación de componentes cerámicos multicapa y proceso tras una posible implantación de la tecnología aditiva híbrida multimaterial desarrollada [Fuente: elaboración propia].

En la actualidad el diseño y la fabricación de componentes electrónicos basados en las tecnologías de capa gruesa y multicapas, y en concreto las de tape cerámicos ya sean por HTCC o LTCC requieren de diferentes procesos y etapas, con distintas tecnologías como: tape casting, corte, serigrafía, apilado y laminación. Cada una de estas tecnologías necesita de herramientas específicas que añaden complejidad al proceso y limitaciones al elemento fabricado coartando las capacidades creativas de los diseñadores.

Es en este punto donde se evidencia claramente las ventajas que el desarrollo e implementación de un sistema de impresión tridimensional y multimaterial como es, el del equipo Nhibrid32D puede aportar en la fabricación de prototipos y componentes electrónicos personalizados de baja tirada o prototipos únicos de alto valor añadido. Mediante la fabricación aditiva además de ofrecer una menor restricción en cuanto geometría, se ofrece la posibilidad de reducir el número de etapas, procesos y equipos involucrados, disminuyendo así los costes mediante una producción ajustada y limpia (lean manufacturing).



Como se puede apreciar en Figura 9 la tecnología aditiva híbrida multimaterial planteada permitiría reducir drásticamente el número de etapas del proceso de fabricación actual, llegando a estar constituido por solo 3 etapas; formulación de barbotinas y de las tintas, fabricación del componente en verde mediante el equipo propuesto, y finalmente el sinterizado del mismo.

En este aspecto y debido a que el presente trabajo de investigación se centra en el desarrollo, análisis del sistema Inkjet empleado en el proyecto Nhibrid32D y de sus posibles aplicaciones en el empleo de materiales funcionales en el mundo de la impresión 3D, en el apartado siguiente se realiza un repaso de las tecnologías aditivas, para posteriormente abordar algunos de los fundamentos de la reproducción de archivos digitales, mediante el transporte y deposición de materiales usando un medio líquido (tintas), dentro del dominio físico del equipo reproductor en combinación y gradación.

## **1.4.2. Tecnologías aditivas 3D**

### **1.4.2.1. Introducción**

En el mundo ingenieril y más concretamente en el mundo de la fabricación, una de las consecuencias que trajo consigo el desarrollo de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC's) fue el CAD (del inglés: Computer-Aided Design). El CAD permitió representar un objeto tridimensional en una pantalla y con ello rotarlo y darle colores realistas. Dejando atrás así la etapa de la interpretación geométrica de los objetos, mediante planta, alzado y perfil, y para pasar al mundo real lo que se veía en la pantalla, aparecieron las impresoras de gran formato, que como en el caso de los procesadores de textos y las máquinas de escribir, tomaron el relevo a los calcos y fotocopiadoras de planos. En ese momento las bases de la impresión 3D estaban sentadas, disponíamos de un modelo matemático capaz de definir la geometría tridimensional de un objeto mediante un ordenador. Con la aparición de los sistemas CAM (del inglés: Computer-Aided Manufacturing) y través de programación ISO (del inglés: International Organization for Standardization) fue posible mecanizar dichos objetos digitales a partir de un bloque de material, aunque con las limitaciones propias de las tecnologías sustractivas. Fue solo cuestión de tiempo que alguien viera la oportunidad de desarrollar un sistema de fabricación que se basara en la adición de material en lugar de sustraerlo de un bloque [22].

En sus primeros años de vida, la denominación de la impresión 3D era casi exclusivamente para hacer referencia al Rapid Prototyping (RP) o prototipado rápido, en la actualidad en cambio la impresión 3D ha dado origen en su versión industrial a lo que se conoce como la fabricación aditiva o Additive Manufacturing (AM). En la actualidad existen muchos productos susceptibles a ser impresos o fabricados aditivamente, que si bien continúan siendo fabricados por métodos tradicionales en la mayoría de los casos es por desconocimiento, miedo y limitaciones en cuanto a materiales y disponibilidad de estos a

costes competitivos, aun así un enorme número de empresas en todo el mundo siguen atentamente el desarrollo de las tecnologías aditivas y sus posibles aplicaciones a sus respectivos ámbitos.

De modo que, la organización de normas internacionales ASTM define a la fabricación aditiva como un proceso de unión de materiales para construir objetos a partir de los datos un de modelo tridimensional, generalmente capa sobre capa, a diferencia de las metodologías de fabricación sustractivas [23]. Así, de un modo simplista podemos decir que desde un punto de vista físico y geométrico la fabricación de un objeto puede llevarse a cabo de forma sustractiva, aditiva y/o mediante procesos de conformado (en donde englobamos; fundición, moldeo, pulvimetalurgia, etc., así como los relativos al deformado del material base, entre muchos otros) y a los cuales se le han de añadir también los procesos de unión a fin de constituir objetos mucho más complejos y multimaterial (aquí entran los ensamblajes, las soldaduras, pegados, etc.) [1], [24].

En cuanto a los procesos de fabricación aditivos existe una gran variedad de técnicas diferentes, pero todos ellos permiten la obtención de piezas desde un archivo CAD en 3D, y es quizás ahí donde radica parte de su importancia ya que se reduce la distancia entre lo concebible y lo realizable, con el potencial de desvincular el diseño de la fabricación que a falta de un término más adecuado podríamos definirlo como reproducción. Reproducción de un archivo digital, que en este caso define a un objeto. Por esta razón se le ha dado distintos nombres; Direct Manufacturing (fabricación directa), Additive Layer Manufacturing (fabricación mediante la adición de capas) o e-manufacturing son algunos de ellos.

Los procesos de AM por otra parte, en la actualidad no se destacan por su alta velocidad de fabricación y por lo tanto, debido a su baja productividad, en principio no pueden ser instaurados para grandes volúmenes de producción, y pese a que importantes esfuerzos se están realizando en el desarrollo de equipos con una elevada velocidad de reproducción, los materiales a menudo suponen una segunda limitación infranqueable en la reproducción de elementos sometidos a elevadas sollicitaciones. Su utilidad a día de hoy aunque creciendo día a día, se agrupa allí donde su versatilidad geométrica suponga una ventaja y donde el alto valor agregado del producto permita asumir sus elevados costes, o también y comúnmente formando parte de los recursos que dispone una empresa, a modo de complemento de los procesos tradicionales hoy por hoy aún más eficientes.

A continuación se presenta una visión general de algunas de las particularidades a tener en cuenta en algunos procesos de fabricación según su procedencia.

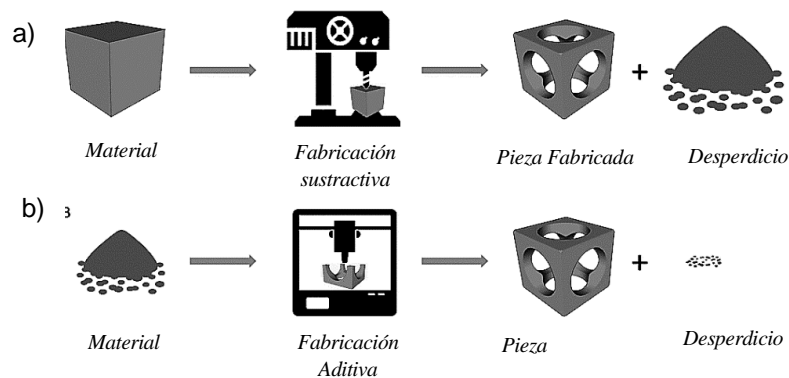
#### **1.4.2.2. Algunas particularidades de los métodos de fabricación aditivos en comparación a los métodos convencionales**

En los procesos de fabricación tradicionales o convencionales, el grado de dificultad de una pieza simple u objeto a fabricar puede medirse de muchas formas por ejemplo: según el

material, la geometría, el grado de precisión, acabado, tratamientos posteriores... etc., y por lo general los plazos de entrega. Centrándonos en la geometría estos procesos tradicionales tienen limitaciones no pudiendo reproducir todo aquello que en principio somos capaces de concebir con el CAD, por otra parte, la complejidad geométrica de dicho elemento dificulta el proceso de manufactura alargándolo en muchos casos y en consecuencia encareciéndolo. Ambos aspectos del elemento en el caso de los procesos aditivos no suponen un incremento en la dificultad de su reproducción.

Un aumento en la complejidad de la pieza no se tiene por qué traducirse en un aumento de dificultad en el proceso de fabricación, generalmente un aumento de la complejidad se refleja en ahorro de material y por lo tanto de coste. Las complejidades añadidas a un diseño se transforman en dificultades a nivel CAD de la pieza y no de fabricación.

Si se echa un vistazo a procesos de moldeo existen factores a tener en cuenta como son los ángulos de desmoldeo, los huecos interiores en piezas, líneas de partición, acabados superficiales, situación de canales, mazarotas, etc. Todos estos factores han de estar definidos claramente en un proceso de moldeo siguiendo las pautas pertinentes (Figura 10), si se llevan estos problemas al ámbito de la fabricación aditiva puesto que el material es depositado a voluntad en el espacio allí donde se requiere, se observa que no ha de prestarse atención a ninguno de esos factores, ya que carecen de sentido. Sin embargo otros de ser tenidos en cuenta.



**Figura 10:** Comparación entre las tecnologías convencionales (a) y las aditivas (b)

[Fuente: elaboración propia]

Por otra parte, en la fabricación de un elemento en ocasiones se precisa de la unión de varias piezas para conformar el producto final, muchos de estos elementos requieren ser fabricados en partes por separado, ante la imposibilidad de su integración desde un principio al conjunto, requiriendo el uso de tolerancias y hasta ajustes posteriores para realizar el ensamblaje. La fabricación aditiva permite fabricar eso que se ha considerado como un conjunto como si fuese una pieza individual, evitándose post-procesos, ensamblajes y los correspondientes stocks intermedios.

Por último, debido a que la construcción del objeto se lleva a cabo por la adición de material de forma controlada y a voluntad, es decir, la pieza se va conformando paulatinamente capa a capa, vóxel a vóxel (píxel volumétrico), el desperdicio de este (el material), es muy reducido a diferencia de algunos métodos substractivos y en consecuencia ecológicamente son más eficientes.

A grandes rasgos y limitándonos a la reproducción física de un objeto desde un punto de vista netamente mecánico podríamos decir que estas son algunas particularidades de los métodos de fabricación aditivos en comparación a los métodos convencionales. En los siguientes apartados se ahonda un poco más en los detalles específicos de cada método, para finalmente abordar las ventajas y limitación de estos procesos desde un punto de vista más amplio.

#### **1.4.2.3. Procesos de fabricación aditiva**

Los procesos de fabricación aditiva surgen inicialmente con el nombre de prototipado rápido (Rapid Prototyping, RP) ya que en un primer momento se concibieron éstas tecnologías con el fin último de la realización de prototipos.

El primer objeto reproducido por prototipado rápido tuvo lugar el 9 de marzo de 1983 a las once y media de la noche. Charles W. Hull quien trabajaba al sur de california en una pequeña empresa de revestimientos utilizando luz ultravioleta, tras sugerir la posibilidad reproducir objetos tridimensionales a partir de archivos digitales a sus superiores y disponer de un pequeño laboratorio para experimentar durante las tardes y los fines de semanas consiguió reproducir mediante la consolidación de múltiples capas de un material fotopolimérico de base acrílica una especie de copa. Posteriormente, la tecnología obtuvo su patente el 11 de marzo de 1986 acuñando el término de estereolitografía (SLA), hoy en día además de ser la pionera, esta tecnología lidera el campo del Rapid Prototyping siendo la empresa norteamericana 3D Systems de la que Chuck Hull es co-fundador uno de los máximos exponentes.

Así pues una vez se dio a conocer y se empezó a comercializar esta tecnología inicialmente en EE.UU, la estereolitografía no tuvo la repercusión generalizada en el mercado como los CD's o las cámaras de vídeo contemporáneas a esta. Sin embargo, con el transcurso del tiempo ha desencadenado una revolución tecnológica inimaginable para aquel entonces.

Tras la comercialización de los primeros equipos de estereolitografía de la mano de los norteamericanos, le acompaña la respuesta japonesa que también querían participar en este incipiente mercado, ofreciendo sus máquinas de estereolitografía partir los años 1988 (NTT) y 1989 (Sony/D-MEC). Estas novedades no llegaron a calar en Europa hasta que en 1990 la empresa alemana EOS (Electro Optical Systems) desarrolla su sistema "Stereos". Posteriormente surgen nuevas técnicas de reproducción y con ello nuevas aplicaciones. Aparece la tecnología FDM (Fused Deposition Modeling) de la empresa americana

Stratasys, en la que se realiza la extrusión de un filamento termoplástico que se funde en un cabezal de fusión, SGC (Solid Ground Curing, de la israelí Cubital), que trabaja con resina fotosensible pero solidifica cada capa en una sola operación gracias a una máscara de tinta electrostática en un vidrio, y LOM (Laminated Object Manufacturing, de la estadounidense Helisys), la cual trabaja cortando hojas de papel con un láser y apilándolas (actualmente trabaja con termoplásticos también), todas ellas surgen en 1991 [25].

En 1992 brotan los sistemas de sinterización SLS (Selective Laser Sintering, de la mano de la empresa americana DTM), este método sinteriza polvos metálicos mediante un láser, pudiendo de esta forma obtener matricería directamente.

A partir de 1992 se empiezan a desarrollar nuevas tecnologías de forma bastante continua y en busca de nuevas aplicaciones. Más adelante durante el cambio de milenio, en el 2000 de la mano de la empresa israelita Objet Geometries se crea un sistema de impresión basado en la inyección y solidificación por UVA precursor del sistema Polyjet, posteriormente la norteamericana Z Corp con su máquina Z402C comercializa la primera impresora 3D a color. En los siguientes diez años la impresión en tres dimensiones comenzó a utilizarse con éxito en el campo aeronáutico o médico realizándose componentes ortopédicos complejos, vasos sanguíneos y hasta un riñón funcional en miniatura, por otro lado también fue la década en donde apareció el movimiento open source, materializándose en el 2005 con el proyecto RepRap del Dr. Adrian Bowyer, la primera impresora capaz de replicarse al menos en parte a sí misma, lo cual tuvo un fuerte impacto capturando la imaginación del público en cuanto a geometrías y la personalización en masa. Las innovaciones intensamente creativas de la década 2000-2010 fueron coronada con el lanzamiento de servicios de co-creación de colaboración como Shapeways o Thingiverse, un mercado de impresión en 3D donde los diseñadores pueden obtener retroalimentación de los consumidores y estos a la vez pueden fabricar sus productos de forma asequible. Por último y más recientemente, aparecen en escena máquinas como la MakerBot en EEUU o posteriormente la BCN3D la primera impresora 3D open source en España. A partir de este punto las barreras de los diseñadores e inventores han ido cayendo poco a poco hasta nuestros días.

Mientras el precio de las impresoras siguen cayendo y la exactitud de las impresoras 3D mejoran día a día, los innovadores buscan nuevas aplicaciones en campos donde Charles W. Hull (Padre de la impresión 3D) solo podría soñar, en los últimos años se ha podido ver volar la primera aeronave no tripulada impresa en 3D, compañías como Boeing y Airbus comienzan a utilizar múltiples componentes y piezas impresas en 3D, se ha podido apreciar el primer coche impreso en 3D y hasta casas prefabricadas impresas en 3D.

En este punto y teniendo en cuenta los avances ocurridos en los últimos 30 años en esta joven técnica de fabricación, no parece descabellado sentenciar este apartado diciendo, que el mundo futuro se edificará de forma aditiva.

## Fases.

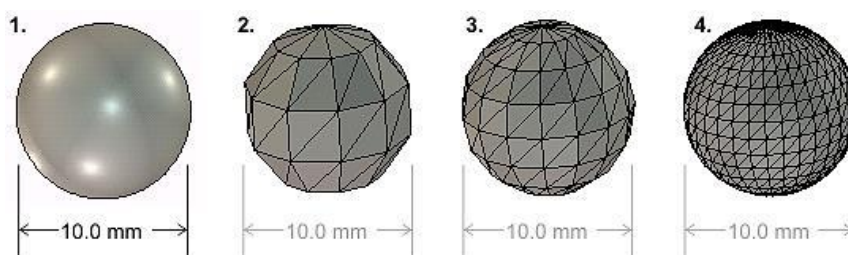
Aunque existe gran variedad de procesos diferentes en la fabricación aditiva, todos ellos siguen un mismo patrón en cuanto a sus fases. En una visión rápida se podría dividir el proceso en tres fases fijas y una ocasional a saber:

Fase 1 (Concepción y digitalización): corresponde como en todo proceso productivo en la conceptualización del objeto, producto, dispositivo, etc., para posteriormente obtener un modelo CAD en tres dimensiones (Figura 11). También se puede realizar este paso por ingeniería inversa, es decir, a partir de un objeto físico y mediante un escaneado tridimensional obtener una nube de puntos que tratados digitalmente se puede obtener un modelo CAD de dicha pieza.



**Figura 11:** Concepción del modelo CAD fase de digitalización [26].

Una vez obtenida de una u otra forma el modelo CAD, la geometría es discretizada a través una malla formada por triángulos interrelacionados entre sí, de esta manera se pasa a un nuevo formato el cual se le conoce como formato .stl (proveniente la abreviatura de Stereolithography (estereolitografía). Este sistema de definición puede ser considerado como el precursor del resto de métodos definitorios aplicados en la impresión 3D).

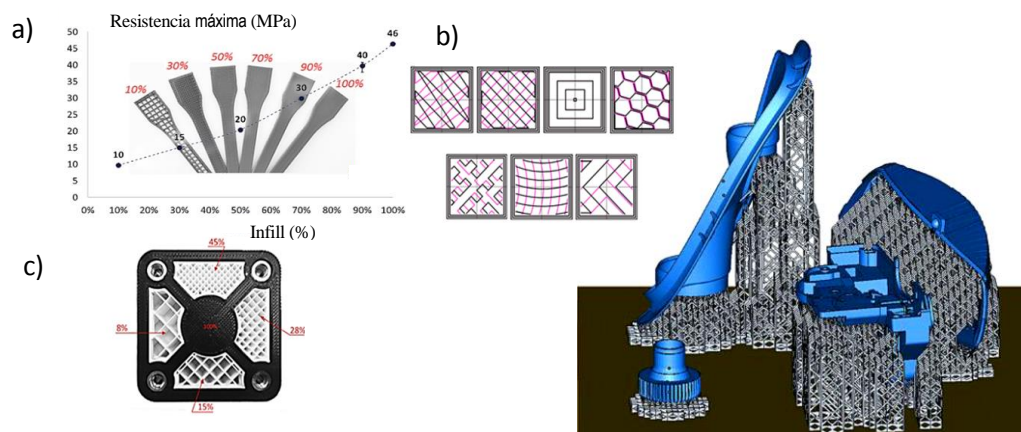


**Figura 12:** Triangulación de superficie [27].

Como se puede apreciar en la imagen anterior (Figura 12) el nivel de precisión con la que se define la geometría del elemento a reproducir se ajusta en función del número de triángulos que posee el archivo digital de extensión .stl (Standard tessellation language o lenguaje de mosaico estándar), estos archivos suelen tener un tamaño considerablemente superior a los CAD originales.

Posteriormente y como última etapa de la fase de conceptualización y de digitalización, se procede mediante un software especializado el cual sirve de enlace entre el archivo digital de extensión .stl que define la geometría de la pieza, y las condiciones y particularidades propias del equipo reproductor. Durante este paso se define el lugar de emplazamiento de los objetos a reproducir sobre la plataforma de construcción y en consecuencia dentro del dominio volumétrico disponible en el equipo de reproducción, impresora tridimensional en este caso. Así como también se procede a definir la orientación de los mismos y si es necesario la utilización los soportes en caso de que tengamos voladizos (ya que no se puede construir elementos en el aire, sin sustento). Por otra parte, según la tecnología del equipo reproductor se puede definir la densidad del elemento a reproducir y en consecuencia modificar algunas de sus propiedades físicas desde un punto mecánico-resistente por ejemplo (ver Figura 13). De manera que en esta etapa pasamos de un archivo digital que define geometría, a otro que define la secuencia de instrucciones necesarias para su reproducción adaptadas a las particularidades del equipo disponible.

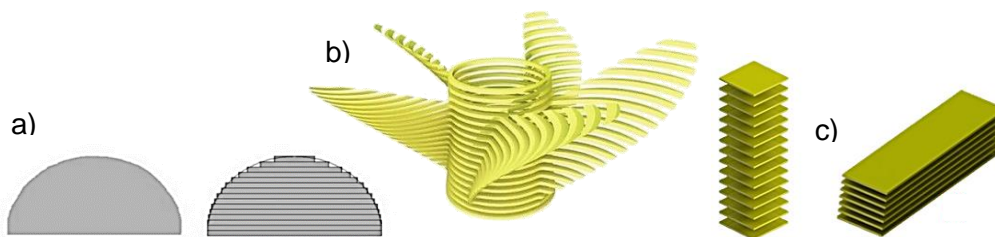
Este proceso se lleva a cabo mediante distintos softwares como por ejemplo en: MAGICS de Materialise, CURA, slic3r (ambos software open source desarrollados por David Braam y Alessandro Ranellucci respectivamente), Creative workshop (también open source desarrollado por Steve Hernández y Shai Segar), o cualquier otro. Éstos permiten la conversión de la geometría en 3D en formato STL a un nuevo formato legible por el equipo de fabricación aditiva. Por ejemplo, en el caso de las máquinas de deposición de hilo fundido FDM (proyecto RepRap), se utilizar el formato G-code. El cual, fundamentado en la programación CNC establece los parámetros de funcionamiento del equipo, así como trayectorias y velocidades que ésta debe realizar para la materialización de la pieza.



**Figura 13:** Variación de las propiedades mecánicas del elemento reproducido modificando el infill (relleno del elemento a reproducido) (a). Distintos patrones de infill para un sistema de impresión por FDM (b). Sección transversal de un elemento impreso por FDM con distintos colores de un mismo material y distintos infill (c). Vista renderizada del emplazamiento de múltiples piezas sobre la plataforma de construcción con sus correspondientes soportes [24].

Así pues, una vez se definido virtualmente la ubicación, la orientación, los soportes de la pieza o las piezas entre otros parámetros, dichos softwares proceden a realizar la discretización de las mismas en capas. Es en este punto donde se fundamenta la impresión tridimensional o la reproducción de objetos en 3D llamémosle para Rapid Prototyping o Additive Manufacturing. Éste rebanado o Slicing se realiza definiendo el espesor de las capas, y consigue la simplificación de la geometría tridimensional del elemento a reproducir como un conjunto de N elementos bidimensionales (capas) que siguiendo una secuencia se reproducen de forma solapada o superpuesta.

Es importante resaltar que el número de capas se verán reducidas cuanto mayor sea el espesor de las mismas, lo que a su vez se traduce en un tiempo de fabricación menor, una mayor productividad y en consecuencia una peor fidelidad de la reproducción al disminuir la resolución del equipo. Capas de mayor espesor suponen mayores saltos discretos en sentido vertical y una peor capacidad reproductiva de la topología de superficies curvas. Por otra parte, esta característica generalizada en todos los procesos y tecnologías de impresión tridimensional induce al objeto a reproducir un parámetro de esbeltez es decir, la estrategia seguida en la reproducción de los objetos tridimensional cobra protagonismo, ya que no costará lo mismo (tiempo, coste y calidad de reproducción) imprimir una pieza esbelta de poca sección transversal y mucha altura de forma vertical que de forma horizontal (Figura 14).



**Figura 14:** Media elipse seccionada (a menor espesor de capa mayor precisión geométrica) (a) [28]. Hélice de la Figura 11 rebanada tras la operación de Slicing [29] (b). Representación esquemática del número de capas necesario para reproducir un paralelepípedo esbelto según la estrategia a seguir (c) [Fuente: Elaboración propia].

Fase 2 (Fabricación): la fabricación en muchos de los caso supone la etapa final del proceso, ya que las piezas son materializadas capa a capa pasando al plano físico y dejando atrás el mundo virtual. Los procesos aditivos en este aspecto se caracterizan por la poca o nula participación de la presencia humana durante el proceso de reproducción. Esto permite la desconexión entre el diseño y la fabricación, permitiendo deslocalizar la fabricación, reduciendo las ventajas salariales entre países, podría llegar a permitir la ubicación de los centros productivos en cualquier lugar del globo e incluso tiene el potencial de estar dentro de nuestras casas, o al menos en las inmediaciones del consumidor y con ello abre la posibilidad de anular los costes de transporte, trasladar los costes asociados de



la fabricación, del almacenaje, los costes energéticos y de los desperdicios al usuario o al consumidor final haciendo de esta posibilidad una sumamente competitiva.

Por último y como veremos más adelante en el apartado de ventajas y limitaciones, la fabricación aditiva puesto que permite la reproducción de un archivo digital con cierta ilimitación geométrica, ofrece la posibilidad de explotar la individualidad del consumidor es decir la personalización.



**Figura 15:** Evolución del proceso de fabricación de la hélice de la Figura 11 mediante la tecnología de FDM [26], [29].

Como se puede intuir a partir de la Figura 15 tras finalizar el proceso de reproducción se retira la pieza junto con los soportes y se procede extracción de los mismos en lo que hemos llamado el post-proceso. Una vez limpia la pieza se puede dar por culminado el proceso de fabricación aunque en ocasiones se requiere de una etapa de acabado.

Fase 3 (Acabado): Finalmente y como tercera y última fase del proceso de reproducción de los archivos digitales que representan a los objetos impresos, se agrupan aquí todos los procesos de finalización de la pieza en la que se puede englobar tanto los curados posteriores de las resinas para mayor endurecimiento de las piezas u otras labores por exigencias del acabado superficial; los pulidos, recubrimientos, etc.

#### 1.3.4.5. Clasificación de técnicas aditivas

Una forma de clasificar los procesos de fabricación por adición de material podría ser teniendo en cuenta el material que se usa, separando de esta forma materiales poliméricos, cérios, metales, etc., otra clasificación se podría realizar teniendo en cuenta su ámbito de aplicación, diferenciando los utilizados para la fabricación de moldes (RC, Rapid Casting), los utilizados para la creación de prototipos (RP, Rapid Prototyping), para punzones o cavidades para máquinas (RT, Rapid Tooling) y los utilizados para productos finales (RM, Rapid Manufacturing o Additive Manufacturing en general). Pero en este caso se clasificará las técnicas aditivas teniendo en cuenta como se realiza el aporte de material y la forma de aporte de energía [1].

Atendiendo a esta clasificación según el método de aporte del material se aprecia que existen 3 diferenciaciones claras las cuales a continuación se enumeran:

- **Punto:** se usan sistemas que aportan el material punto a punto, se podría asemejar a un plotter; el mecanismo que aporta el material se mueve gracias a un sistema de dos ejes que se desplaza en la zona de trabajo, pudiendo describir trayectorias rectas o curvas en un plano xy.
- **Línea:** estos sistemas van aportando el material a través de un conjunto de puntos alineados gracias a inyectores con múltiples boquillas. El dispositivo aplicador efectúa barridos a lo largo de la zona de trabajo depositando material selectivamente donde solicite el archivo digital, gracias a la coordinación del dispositivo multi-boquillas con los ejes de motorizados.
- **Lecho:** se trata de una aportación de material en exceso, donde se añade material en una cantidad igual al espesor de capa, la cual rellena toda la superficie de trabajo para, posteriormente, ser consolidado únicamente en las posiciones requeridas. Estos sistemas disponen de un engrasador, nivelador o recoater, que puede variar siendo una cuchilla, una tolva, un rodillo,..., gracias al cual se aportan y/o alisan las capas de material sobrante. Son denominados habitualmente sistemas de lecho completo.

Siguiendo con los criterios de clasificación indicados anteriormente, es necesario hacer un inciso y resaltar el concepto de deposición continua y discreta. La tecnología FDM por ejemplo, realiza una deposición por punto. Sin embargo, es una deposición continua del material y la evolución espacial del cabezal genera las trayectorias que conformaran por deposición continua, la capa del elemento a reproducir. Por otro lado, en la deposición discreta tanto si es por punto o por línea (una suma de puntos, impresoras 2D o 3D basadas en la tecnología Inkjet, por ejemplo) la deposición se realiza a voluntad (definida por el archivo digital) en cada locación por la que el cabezal en su recorrido se encuentre. En cuanto a la tipología del aporte de energía debido a que esto condicionará los materiales a utilizar y debido a que la fabricación aditiva se sustenta en el solapamiento de capas, la caracterizaciones mecánicas de las piezas fabricadas dependen de cómo están unidas las capas y estas propiedades están muy relacionadas con la tipología del aporte de energía, así como también otras como; la porosidad, la resistencia eléctrica, etc., atendiendo a este criterio podemos encontrar tres variantes:

- **Sistemas 0D:** la energía está condensada en un único punto. De esta forma la consolidación depende de un solo punto, el cual se desplaza por la superficie destinada a conformar la capa y en consecuencia mediante la adición de capas la pieza.
- **Sistemas 1D:** en este caso la energía se transmite en forma de líneas que van variando su longitud según se va haciendo el barrido sobre la capa a crear.
- **Sistemas 2D:** la consolidación del material de una capa de material en este caso en una sola operación.

Este aporte de energía se suele realizar de tres formas diferentes: por un lado se realiza mediante calor, que permite la sinterización o la fusión de metales y termoplásticos, y por

otro lado mediante luz a una frecuencia de onda determinada, lo cual permite la polimerización de ciertos plásticos, con lo que se consigue un proceso de curado en materiales fotosensibles o más recientemente mediante la aportación de una cola o elemento aglutinante.

Como elemento común a todos estos sistemas de reproducción tenemos los sistemas encargados del movimiento y sea de la plataforma desplazándose en vertical de forma discreta a una distancia igual al espesor de la capa, u en otros casos desplazando los sistemas de aportación de material o energía en el plano xy. El material correspondiente a la primera capa del objeto o pieza, se adhiere sobre una plataforma de construcción en el sistema de aporte selectivo, en los sistemas de aporte masivo (lecho) también se adhiere sobre la plataforma construcción pero está cubierta inicialmente por el material aun sin solidificar. Debido a esta característica las piezas tendrán unas dimensiones máximas correspondientes al volumen comprendido entre el área de la plataforma y al recorrido máximo en vertical de ésta.

Como se ha comentado anteriormente, mediante la combinación del método de aporte de material y el método de aporte de energía se puede aproximadamente intuir la rapidez del proceso. En este sentido un aporte de material punto a punto será más lento que uno en línea y lecho, y un aporte de energía punto a punto (0D) será también más lento que uno de línea (1D) o por capa completa, 2D.

En cuanto a costes, precisión y calidad de reproducción de las piezas, en las máquinas de fabricación aditiva está directamente relacionada con la fuente de energía a utilizar, los métodos de aporte del material, la calidad y precisión de los sistemas de posicionamiento y los materiales empleados. Por lo tanto cuanto más energía necesite el material a utilizar mayor el coste de la máquina y de su uso, y como en la mayoría de los casos a mayor calidad de máquina, mayor calidad en los resultados y mayor coste.

Según los criterios de clasificación comentados anteriormente podemos identificar las siguientes tecnologías de fabricación aditivas resumidas en Tabla 2.

		<b>Aporte de Material</b>		
		<b>Punto</b>	<b>Línea</b>	<b>Lecho</b>
<b>Aporte de Energía</b>	<b>0D (Punto)</b>	<i>Laser Cladding/FDM</i>	-	<i>SLA/SLS/EBM/SLM/DMLS/Laser Cusing</i>
	<b>1D (Línea)</b>	-	<i>Polyjet</i>	<i>3DP/MLS</i>
	<b>2D (Capa)</b>	-	-	<i>DLP</i>

**Tabla 2:** Clasificación AM (Fuente: adaptada de [1]).

También existen métodos de fabricación aditiva no contemplados aquí que trabajan con la adición de láminas de papel o cartón las cuales se van cortando y pegando iterativamente.

A continuación se exponen uno a uno los procesos mencionados en el cuadro anterior:

- **Laser Cladding (revestimiento por láser, punto 0D):** es una tecnología con la que se empieza a trabajar en la década de los 70, surgiendo la primera aplicación industrial en 1981, por parte de la empresa Rolls-Royce, que utiliza este proceso para el endurecimiento de superficies de álabes de turbina. Desde entonces se ha seguido investigando en el desarrollo del proceso, apreciándose un claro aumento de publicaciones científicas desde el año 2000 [30], en el ámbito nacional, distintos equipos de investigación principalmente ubicados en el país vasco (IK4-TEKNIKER, UPV/EHU (Universidad del país vasco), entre otros) trabajan en el desarrollo y aplicaciones del láser Cladding como por ejemplo en la construcción de sistemas de fabricación híbridos (sustractivo/aditivo) y en la recuperación y reparación de moldes, matrices y troqueles entre otros.

En la actualidad, el láser cladding o DMD (Direct Metal Deposition) se utiliza como una técnica de fabricación aditiva, proporcionando la capacidad de adherir distintos materiales sobre componentes funcionales complejos sin pasos intermedios. Hoy en día se realiza una exhaustiva investigación en el uso de esta tecnología en la fabricación de elementos completamente funcionales para múltiples ámbitos destacándose el sector aeronáutico. Por otra parte, este tipo de tecnologías se pueden ver como una evolución de los procesos de soldadura. La fabricación del objeto se lleva a cabo mediante una boquilla la cual es alimentada con el material a fundir (pudiendo ser en forma de polvo o de varilla) de forma que se posiciona en el lugar requerido según los criterios de diseño. En ese mismo punto se aplica la energía en forma de láser o plasma, intensa y concentradamente. Al ponerse en contacto el material con la energía proveniente de la fuente, éste se funde sobre la base (primera capa o la capa anterior) y se solidifica de forma prácticamente inmediata. Al tener tanta intensidad la fuente de energía se debe proteger el resto de la estructura construida para evitar deformaciones u oxidaciones, esto se consigue gracias a la proyección de una atmósfera de gas inerte en las inmediaciones del punto de fusión. Este proceso fue concebido en un primer momento para piezas de gran tamaño, también es usado como ya se ha comentado para mejorar propiedades mecánicas superficiales, así como para dar una mayor resistencia a la corrosión a piezas metálicas.

Este proceso no siempre se compone de las mismas partes móviles por lo que cabe diferenciar tres tipos:

- Cabezal móvil y mesa fija, aunque presenta limitaciones a la hora de realizar geometrías difíciles.
- Cabezal fijo y mesa móvil, en piezas de grandes dimensiones el desplazamiento de las misma plantea restricciones en cuanto a velocidad importantes solicitaciones.
- Cabezal y mesa móviles: a menudo es la configuración más usada por ofrecer una mayor flexibilidad geométrica, aunque desde el punto de vista de la programación requiere un control más complejo.

Al tratarse básicamente de una soldadura automatizada las limitaciones y problemáticas de esta tecnología son similares a las que encontraríamos en un proceso de soldadura común,

aunque se encuadra como proceso de fabricación aditiva ya que se realiza una adición de material por superposición de capas de forma continua.

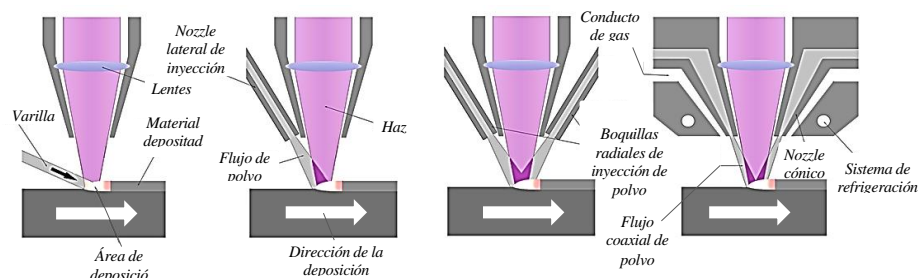
El láser cladding a saber es una de las mejores formas de realizar revestimientos en una superficie sin importar su geometría, pudiendo aumentar en gran medida la vida útil de la pieza con la adición de materiales duros y resistentes al desgaste y a la corrosión sobre un núcleo más dúctil. Por otro lado, las zonas de las piezas recubiertas mediante este tipo de procesos no presentan ninguna fisura ni porosidad debido a que el material de aporte al fundirse adquieren una gran compactación, por lo general después del aporte de material es común en esta tecnología realizar procesos de mecanizado.

A continuación se muestra una imagen de un proceso habitual de laser cladding en el que se está añadiendo un reborde a un árbol provisto de engranaje recto.



**Figura 16:** Centro de mecanizado capaz de combinar la fabricación aditiva por láser cladding con la fabricación sustractiva de la casa DMG-MORI (a). Imagen de la reparación de un eje mediante la adición de material por Laser cladding (a) [31].

En la siguiente ilustración (Figura 17) se muestran diferentes configuraciones en el láser cladding donde la formas de aporte de material según una varilla (wire) (a); mediante chorro de polvo (b); mediante doble chorro de polvo simétrico al láser (c); y un cabezal con sistema de refrigeración e inyector de gas inerte (d).



**Figura 17:** Diferentes configuraciones de los inyectores del láser Cladding [32].

De entre los sistemas mostrados en el esquema anterior, el último es el más evolucionado de los cuatro ofreciendo mejores resultados según distintas bibliografías por poseer un inyector cónico coaxial al láser y disponer de un sistema de refrigeración afín de evitar el calentamiento y obstrucción de los inyectores, y por inyectar un gas inerte permite alejar

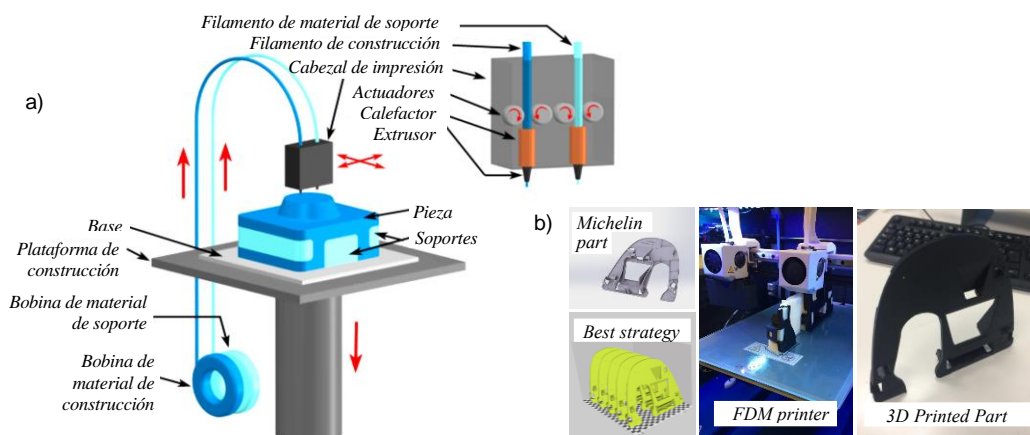
problemas de oxidaciones y a su vez la propagación del fundido en las áreas próximas al punto exacto debido a una rápida solidificación o cambio de fase.

Por último, debido a que el proceso de láser cladding aporta material directamente sobre una superficie y por tanto puede ser instalado en cualquier máquina convencional en los últimos años se han desarrollado distintas soluciones comerciales híbridas en donde se combinan los procesos sustractivos convencionales con esta tecnología aditiva. Dos ejemplos de este tipo de máquinas híbridas son la Laser-Tech 65 3D presentada por DMG-Mori Seiki en la Euromold 2013 (Figura 16) y la Integrex i-400AM presentada recientemente por Mazak en la JIMTOF (Japan international machine tool fair) del 2014 [33], por otra parte en el ámbito nacional Ibarria también ofrece soluciones al mercado similares.

#### - FDM, Fused Deposition Modeling (modelado por deposición de fundición, punto 0D):

Esta tecnología fue desarrollada por S. Scott Crump [34] a finales de la década de 1980 y fue comercializada a partir de la década de 1990 por Stratasys la cual registró las siglas FDM (Fused deposition modeling), posteriormente la comunidad de miembros del proyecto RepRap para disponer de una terminología que pudieran utilizar legalmente sin limitaciones acuñaron sus siglas FFF (Fused Filament Fabrication o fabricación con filamento). En esta tecnología se basa en la deposición en principio de un material termoplástico el cual es almacenado en bobinas, el hilo termoplástico se hace pasar por el interior de una boquilla de extrusión calefactada, de manera que el termoplástico se calienta gradualmente en el interior de la boquilla hasta llegar a su fusión, y seguidamente se deposita sobre la mesa o capa anterior adhiriéndose a ésta por estar fundido y por diferencia de temperatura se produce su solidificación.

Este tipo de procesos permite la utilización de múltiples materiales y colores, con lo cual permite la construcción de piezas con voladizos mediante la construcción de soportes con materiales fácilmente extraíbles, por ejemplo materiales solubles en agua.



**Figura 18:** a) Tecnología FDM [35], b) Pieza ejemplo impresa por FDM [Proyecto realizado en la FundacioCim en compañía de Accenture Analytics & Technology Labs y el

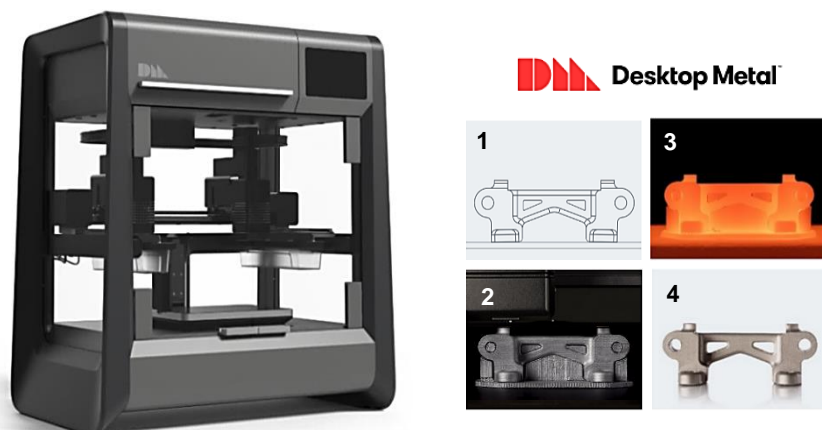
departamento de estadística e Investigación operativa de la UPC, en el análisis distintas estrategias de producción y grados posponement en la cadena de suministros tras la incorporación de la fabricación aditiva].

Cabe destacar que, como muestra el esquema anterior (Figura 18) equipo expuesto dispone de dos bobinas diferentes (la de color claro corresponde al material sacrificial con el cual se realizaran los soportes y la de color oscuro se identifica como el material con el que se fabricará la pieza propiamente dicha.

El punto débil de estos procesos es el hecho de que son bastante lentos en comparación a otras técnicas de fabricación aditiva, y la capacidad de reproducción de la pieza en cuanto a acabado superficial se ve limitada por el diámetro de la boquilla y por consiguiente la altura de las capas, dejando un tacto hoy por hoy más bien rugoso.

Recientemente la empresa VOXEL8, spin-off de la Universidad de Harvard (EEUU) de la mano de la profesora Jennifer Lewis, ha desarrollado una impresora 3D que permite imprimir circuitos electrónicos, mediante la combinación de tecnologías de deposición FDM [36], en concreto combina un primer extrusor con una boquilla que extruye hilo termoplástico y un segundo extrusor que deposita geles metálicos conductivos, así bajo el mismo principio se va depositando el material conductivo sobre la capa o sustrato base previamente impreso con el termoplástico.

Por otra parte, en el pasado año se puso a disposición en el mercado una nueva tecnología basada en los principios del FDM con orígenes en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) y radicada en las inmediaciones de Boston, esta tecnología ofrecida de la mano de Desktop Metal (Figura 19) es capaz de reproducir piezas metálicas en verde que tras un proceso térmico permite alcanzar la consolidación a partir polvo de piezas metálicas funcionales de aleaciones como: Inconel 625 o 316L (Austenítico) entre otros.

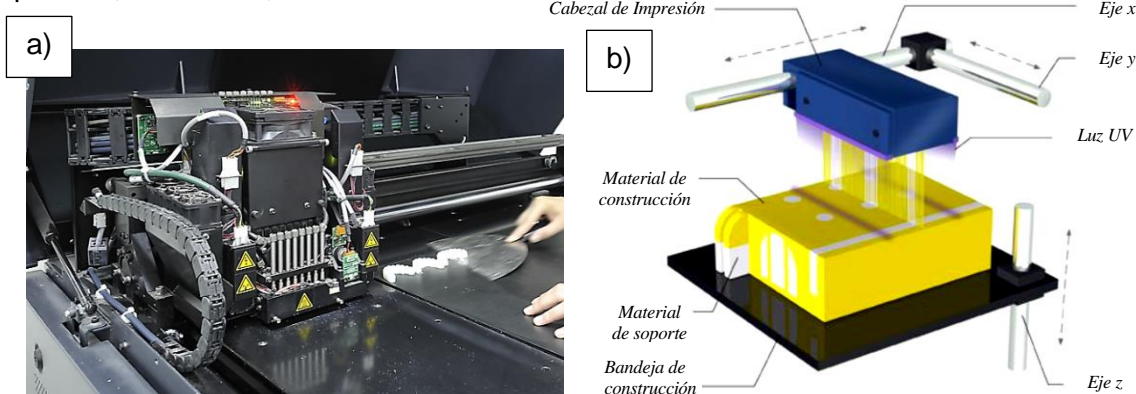


**Figura 19:** Impresora tridimensional con tecnología FDM capaz reproducir piezas funcionales a partir polvos metálicos (a), distintos etapas del procesos de construcción mediante el uso del equipo ofrecido por Desktop Metal (b) [37].



- **Polyjet (línea 1D):** esta tecnología también es llamada 3DP por su abreviación en inglés de three dimensional printing, en ella se hace uso de resinas líquidas que son sensibles a la radiación ultravioleta. Esta tecnología fue desarrollada en Israel en el año 2000 bajo el nombre de “Quadra” por la empresa Objet Geometries. Su nombre hace pensar en el número cuatro, y es precisamente el número de cabezales que posee. Y como novedad cada inyector poseía del orden de 400 boquillas en su interior las cuales expulsan la resina fotosensible. La deposición se realiza mediante un cabezal móvil que se desplaza según los ejes xy siendo el proceso de impresión similar al realizado por una impresora de chorro de tinta convencional. Los movimientos de derecha a izquierda junto con los barridos de arriba abajo recorren la superficie de la capa que se conforma sobre la plataforma de construcción y ésta se desplaza verticalmente dando origen mediante la superposición de capas de una geometría 3D. La consolidación de las capas se lleva a cabo gracias a la fotopolimerización de las tintas a consecuencia de un foco de luz ultravioleta localizado en el carro de impresión. La combinación de múltiples cabezales con múltiples boquillas hace posible la producción de objetos con múltiples colores (ver Figura 20).

La tecnología de impresión 3D PolyJet tiene muchas ventajas para el prototipado rápido, incluida una alta calidad de reproducción y superficies de acabado fino, debido a espesores de capa muy pequeños y a tamaños diminutos de gotas. Además debido a su gran número de boquillas por inyector permite altas velocidades de construcción. Por otro lado y como se ahonda en apartados subsiguientes, debido a la que permite la utilización de múltiples materiales abre el campo de mediante graduación y combinación de estos, dotar a los elementos reproducidos de propiedades localizadas rigidez, flexibilidad, coloración, opacidad, translucidez, etc.



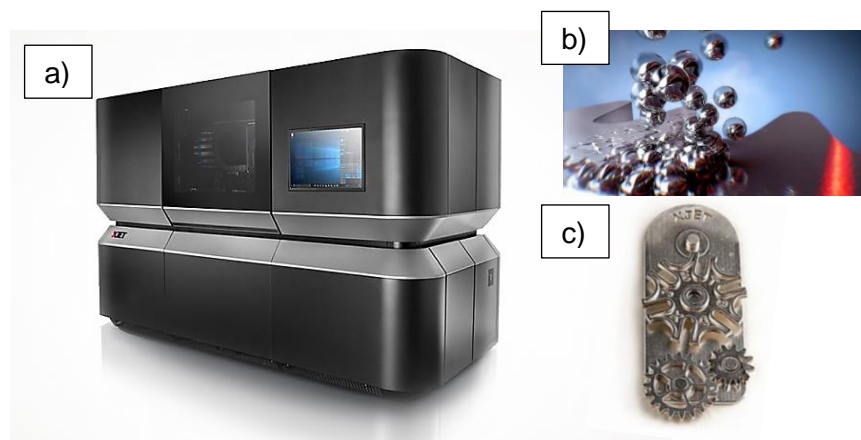
**Figura 20:** Cabezal de Polyjet de una máquina Objet (a) [38] y representación esquemática de dicho cabezal (b) [39].

Por otro lado, atendiendo a este tipo de tecnologías donde tanto el aporte de material como de energía es realizado por línea, recientemente en la exposición de Frankfurt Formnext (noviembre del 2016) se presentó como primicia mundial de la mano de XJET el primer equipo de impresión tridimensional fundamentado en la tecnología Polyjet capaz de



construir piezas metálicas a partir de la deposición controlada a través de un sistema Inkjet de suspensiones metálicas dentro de una atmosfera inerte. Según múltiples fuentes y tras ser corroboradas por sus comerciales en dicho evento, se comprobó que el equipo desarrollador detrás de dicha tecnología se encuentra constituido por investigadores israelitas exempleados de Objet ahora pertenecientes a Stratasys junto con participación china (Figura 21).

La reproducción de las geometrías tridimensionales se lleva a cabo mediante la deposición controlada de nano-partículas a altas temperaturas generando una estructura sinterizada. Dicha deposición como ya se ha comentado se realiza dentro de una atmosfera controlada e inerte para evitar fenómenos como la oxidación. Dotada con cabezales con un gran número de boquillas y capaz de eyectar diminutos volúmenes a voluntad, esta tecnología promete ofrecer una alta productividad con capacidades resolutivas muy elevadas. Sin embargo, pese a la enorme carrera que se está viviendo en muchos centros tecnológicos ante la necesidad de desarrollar tecnologías de impresiones tridimensionales productivas, confiables y capaces de reproducir piezas funcionales y en concreto metálicas, tras el boom inicial desde su aparición en los medios y redes sociales ésta tecnología ha mantenido un perfil muy discreto. Múltiples blogs y páginas web han definido esta tecnología mediante las siglas: LMJP acrónimo de LIQUID METAL JET PRINTING.

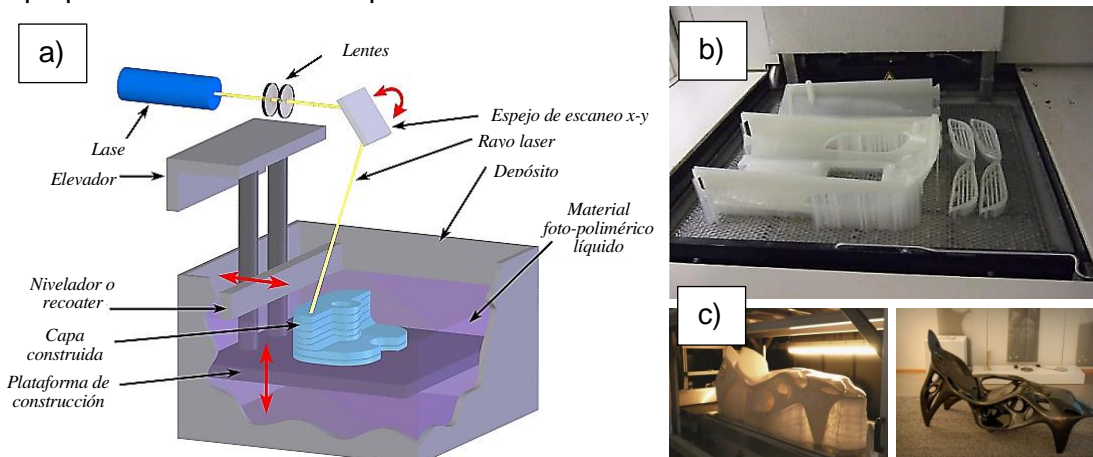


**Figura 21:** Imagen de equipo de impresión de XJET presentado en Formnext 2016 (a). Representación conceptual del proceso de reproducción mediante la deposición controlada de gotas (b) e imagen de una pieza ejemplo impresa en 3D por dicho equipo [40].

- **SLA, Stereolithography (estereolitografía, lecho 0D):** es considerada la tecnología pionera en cuanto a lo que el prototipado rápido se refiere. La primera patente aparece en el año 1986, elaborada por Chuck Hull [41]; pero no fue hasta 1987 que la primera máquina con esta tecnología fue lanzada al mercado de la mano de la empresa norteamericana 3D Systems. Mediante esta tecnología se puede trabajar con resinas en estado líquido pudiendo variar su composición y con ello variar las propiedades del objeto final según la necesidad tras su solidificación. Este tipo de resinas fotosensibles a la luz ultravioleta

consolidan mediante el uso de un láser UV, el cual posee movilidad en el plano xy, de forma que va dibujando, por decirlo así, las zonas que deben convertirse en parte de la pieza. Este proceso se lleva a cabo, recordando la clasificación realizada anteriormente, mediante aporte de material en lecho completo, esto quiere decir que toda la superficie no afectada por el haz láser seguirá presentando las propiedades habituales del polímero antes de solidificar. En este caso, el polímero se encuentra en una cuba de fabricación en estado líquido. En el fondo de la cuba se encuentra, al igual que en los anteriores procesos de fabricación, la plataforma de construcción, la cual se desplaza en vertical una distancia equivalente al espesor de capa en cada barrido de luz UV. Tras el descenso de la plataforma de fabricación para realizar la capa siguiente se rellena el espacio que ha quedado vacío con más material de aporte, estas máquinas poseen además un nivelador “recoater” que se encarga de eliminar el exceso de material. Este exceso se crea debido a la viscosidad de las resinas líquidas, la eliminación de este paso supondría una mala reproducción del modelo CAD 3D concebido en un primer momento.

En la siguiente imagen (Figura 22) se muestra un esquema sencillo de la tecnología SLA y como se puede apreciar en un proceso de estereolitografía típico, el rayo láser el cual es fijo es proyectado sobre un espejo (la parte móvil del sistema junto con la plataforma) y de esta manera es proyectado sobre la superficie a polimerizar, superficie que previamente ha sido nivelada por el recoater, Sweeper o nivelador. Así, tras finalizar la geometría de la pieza, generalmente se limpia ésta con alcohol y posteriormente se suele realizar un post-curado con más luz UV ya que la pieza se encuentra en “estado verde” y por lo general no posee las propiedades mecánicas requeridas.



**Figura 22:** a) Representación esquemática de la tecnología SLA [35], b) imagen tomada del taller en (conjunto de piezas impresas por estereolitografía [Fuente: Elaboración propia], y c) relax impreso en una máquina Materialise Mammoth [42].

Este tipo de máquinas permiten la fabricación de piezas con geometrías de alta complejidad y pequeño espesor en multitud de resinas diferentes, las cuales presentan distintas

propiedades como por ejemplo: biocompatibilidad, opacidad, flexibilidad, etc. El acabado superficial de las piezas es equiparable al que se conseguiría con un centro de mecanizado.

La desventaja principal de esta tecnología tiene que ver con el carácter fotosensible de las resinas ya que expuestas a diferentes fuentes de radiación pueden dar inicio a su polimerización lo cual condiciona su manipulación y las hace degradables en el tiempo. Por otro lado, también es importante resaltar que este tipo de máquinas solo permite la utilización de un material a la vez, teniendo éste que llenar por completo dicho depósito.

Dependiendo de la geometría de la pieza es posible que sea imprescindible la utilización de estructuras de soporte a pesar de ser un sistema de lecho completo, y como ya se ha comentado anteriormente debido a la imposibilidad de utilizar múltiples materiales dichos soportes se realizaran del mismo material de la pieza, lo cual complica su extracción en un post-procesado.

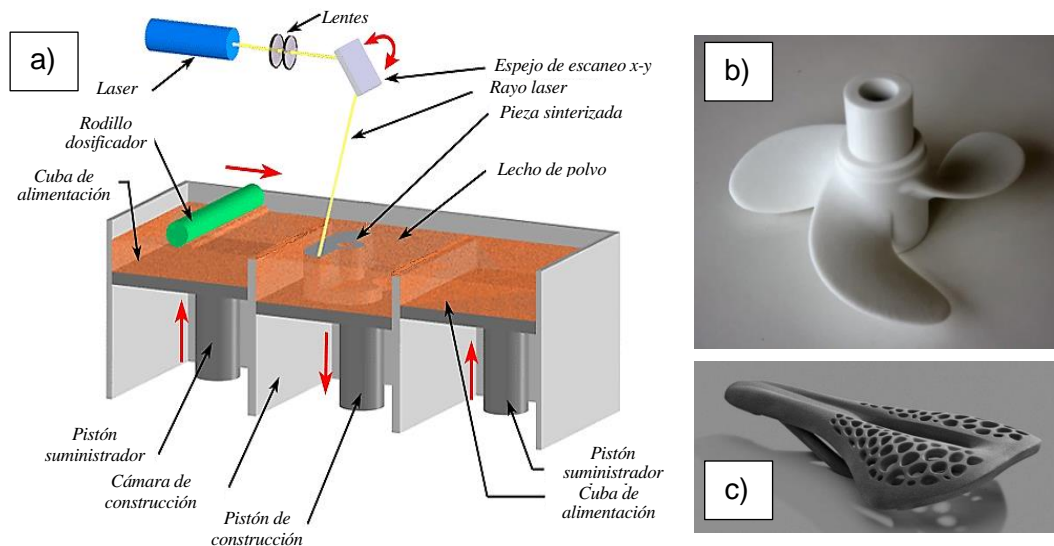
- **SLS, Selective Laser Sintering (sinterizado láser selectivo, lecho OD):** es una tecnología desarrollada en la década de 1980 en la Universidad de Texas con sede en Austin en su departamento de Ingeniería Mecánica bajo el sponsor de DARPA. Aunque un proceso muy similar fue patentado por Ross Housholder en 1979, éste no llegó a comercializarse [43] y dicha tecnología como tal se le atribuyó a Carl Deckard [44]. La tecnología SLS se ha convertido en uno de los métodos de fabricación más avanzados y utilizados del mundo en la actualidad. Las patentes y los derechos de propiedad intelectual de la tecnología SLS constituyeron por años la mayor fuente de ingresos de la Universidad de Texas. Posteriormente se fundó la empresa DTM Corporation que comercializó su primera máquina en 1992 (compañía que eventualmente fue absorbida por 3D Systems). Esta tecnología sufre un gran desarrollo en Europa, y más concretamente en Alemania, en 1994 la empresa EOS GmbH (Electro Optical Systems) lanza al mercado su primera máquina con tecnología SLS, la EOSINT-P. Desde su aparición en 1989 esta empresa no ha parado de crecer, inicialmente irrumpieron en el mercado con resinas fotosensibles en 1990 y en la actualidad está considerada como una de las empresas líderes en el campo de la fabricación aditiva.

Esta tecnología es muy similar al de la estereolitografía, pero a diferencia de usar resina fotosensible utiliza un lecho de polvo (generalmente de poliamida) el cual es sinterizado selectivamente por el láser. Este láser suele ser de CO<sub>2</sub> y su intensidad es adaptada al material. Por otro lado, la precisión óptica viene marcada por las lentes que utiliza y al igual que en la estereolitografía, éste es dirigido por medio de un espejo dibujando punto a punto, capa a capa la pieza.

En esta tecnología de fabricación, la máquina, a diferencia de otras está constituida por tres depósitos (ver

Figura 23), una cuba de fabricación y otras dos cubas más una a cada lado rellenas con material de aporte, cada vez que la plataforma de fabricación desciende el nivel

correspondiente a una capa, la plataforma de aporte se eleva para que un aportador o recoater cilíndrico extienda una nueva capa de polvo sobre la cuba de fabricación. La doble plataforma fue ideada con el fin de que el material de aporte sobrante tras el barrido del recoater vaya directamente a formar parte del material de aporte del depósito del lado opuesto, así con cada capa fabricada el recoater hace el recorrido en sentido contrario al anterior, aprovechando el material de aporte de cada plataforma.



**Figura 23:** a) Tecnología SLS [35], b) Hélice impresa con poliamida de alta resistencia por tecnología SLS [45] y c) Pieza impresa en Nylon negro [46].

Tras concluir la fabricación de la pieza la cuba debe pasar por un proceso de enfriamiento que no puede ser brusco, ya que un enfriamiento brusco produciría deformaciones en la pieza al igual que sucede en una inyección de plástico, siendo esta una desventaja de éste proceso de fabricación, ya que el tiempo de enfriamiento va en detrimento de la productividad del sistema.

Es importante señalar que el hecho de que al utilizar lecho de polvo permite que en la fabricación de las piezas no se requiera de estructuras de soporte, ya que el propio polvo es lo suficientemente consistente como para aguantar el peso de una capa, ello le confiere una gran ventaja frente a otras tecnologías. Por otro lado, la tecnología SLS ofrece capas de espesores reducidos y gran acabado superficial en función del tamaño del polvo empleado. En cuanto al proceso físico-químico de consolidación, en esta tecnología puede llegar a un fundido completo, parcial o sinterizado en fase líquida y dependiendo del material, se pueden conseguir piezas con muy altas densidades, obteniéndose así piezas con propiedades físicas comparables a aquellas fabricadas por métodos tradicionales, aunque más frágiles.

Comparado con otros métodos de fabricación por adición, el SLS puede producir piezas a partir de un rango relativamente amplio de materiales de polvo. Estos incluyen una amplia variedad de polímeros como el nylon (puro, o con fibras de vidrio, de carbono, aluminio,

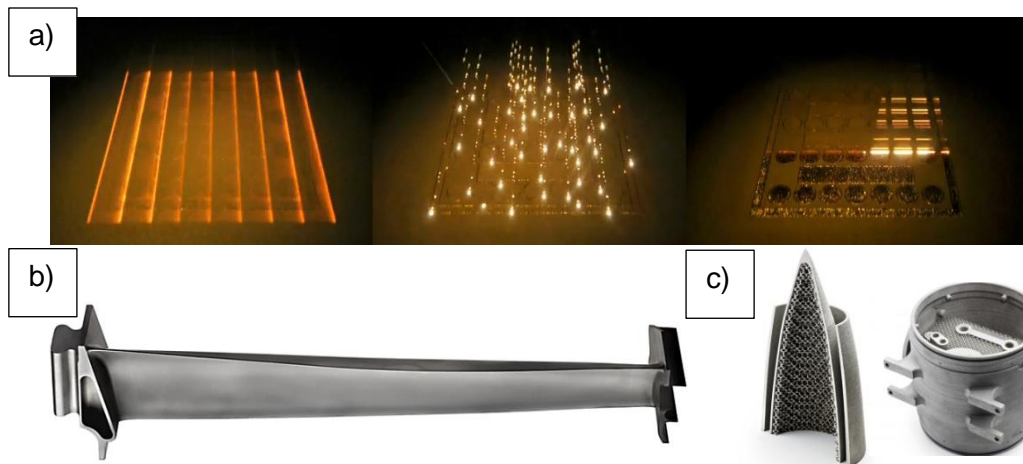
etc.). Por otro lado, también se puede utilizar poliestireno o metales que incluyen acero, titanio, aleaciones y compuestos.

Cuando se utilizan polvos metálicos en algunos casos se utiliza el polímero como aglutinante de las esferas metálicas, en estos casos al finalizar la pieza ésta se suele exponer a temperaturas superiores a 900°C con el fin de fundir el polímero y reemplazarlo después con una colada de bronce u otro metal a fin de mejorar de las propiedades.

- **EBM, Electro Beam Melting (fusión por haz de electrones, lecho 0D):** La tecnología de fusión por haz de electrones, nace en Suecia como evolución de la soldadura por haz de electrones y su desarrollo se llevó a cabo en colaboración con la Universidad Tecnológica de Chalmers en Gotemburgo (Suecia) y la empresa que está detrás de esta tecnología es ARCAM AB, la cual se fundó en 1997. El proceso EBM está diseñado para la fabricación de piezas metálicas, y es bastante similar a un sinterizado láser, pero la fuente de energía es mucho más potente, se trata en este caso de un cañón que bombardea electrones a una velocidad próxima a la de la luz. Cuando el haz de electrones choca contra la superficie de polvo metálico desprende su energía en forma de calor que hace posible la fusión del polvo metálico. Este haz de electrones suprime el uso de espejos y su posicionamiento se realiza por medio de campos electromagnéticos con lo cual el sistema consigue altas velocidades.

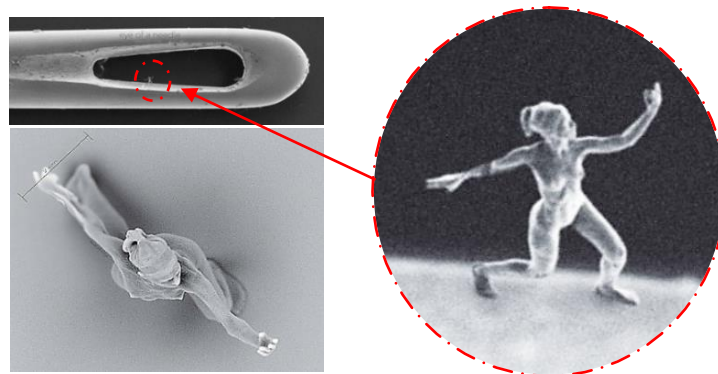
En la cuba el lecho formado de polvo metálico contiene partículas de un tamaño medio de entre 45 a 100 micras, con lo cual al impactar el haz de electrones sobre este parte de la energía se transforma en energía cinética lo que implica que se cree una pequeña nube de polvo alrededor, esta situación limita la fabricación de pequeños detalles y limita su capacidad de reproducción, lo que se traduce en una cantidad de polvo a emplear en cada capa limitada. Por otro lado al igual que en la tecnología anterior la aportación del polvo se realiza a través de un recoater y en principio no es necesario la construcción de soportes ya que el propio lecho sirve de material de apoyo, aunque es posible su utilización por otros motivos como por ejemplo, para la evacuación del calor.

Es importante resaltar que en estas tecnologías antes de comenzar cada capa y después de que el recoater realice su función, la capa de polvo metálico se precalienta en vacío. La magnitud de este calentamiento depende del material usado en el lecho y fundamentalmente tiene los siguientes motivos: en primer lugar evitar posibles tensiones residuales generadas durante el proceso de fusión del polvo, en segundo lugar reducir los fenómenos térmicos como la dilatación y contracción en la pieza y finalmente este precalentamiento lleva al lecho a un estado de semisinterizado con lo cual, se aumenta la consistencia del polvo aumentando su capacidad de soportar capas en voladizo sin la necesidad de utilizar soportes, también obliga a respetar los tiempos de enfriamiento antes de retirar la pieza, lo que supone una reducción en su productividad. Otra limitación de esta tecnología a tener en cuenta es que solo se puede emplear lechos de polvo de materiales conductores.



**Figura 24:** a) Proceso de fabricación de una capa utilizando la estrategia MultiBeam (disgregación del haz de electrones en múltiples haces) etapas de precalentamiento, perfilado y finalización [47], b) Alabe de una turbina de baja presión impreso mediante la tecnología EBM [48] y c) Distintas piezas u componentes del mundo aeroespacial cortesía de ARCAM [49].

Recientemente la propia empresa ARCAM ha desarrollado más esta tecnología posibilitando el uso de pasar de un aporte de energía 0D (por punto) a la utilización de 1D o 2D indistintamente mediante la división del haz de electrones en múltiples haces de menor potencia. Con esta solución se busca mejorar los tiempos de producción, disminuir la nube de polvo creada y con ello, mejorar la capacidad de reproducción y el acabado superficial de las piezas. Por otra parte, la tecnología Electron Beam Melting (EBM) recientemente ha sido utilizada en la solidificación de resinas fotosensible y debido a una concentración extrema del haz el artista Jonty Hurwitz en su afán de unir arte con ciencia, ha reproducido esculturas a escala manométrica mediante un sistema llamado nano-litográfico donde se usan los fotones para el endurecimiento de las resinas. En las imágenes de a continuación se puede apreciar la capacidad de reproducción de esta tecnología cuyos elementos reproducidos pertenecen a mundo nano.



**Figura 25:** Imágenes de la escultura humana más pequeña del mundo por Jonty Hurwitz (2015 Guinness World Record). Reproducción tridimensional de una modelo escaneada y reproducida dentro de la cabeza de una aguja [50].

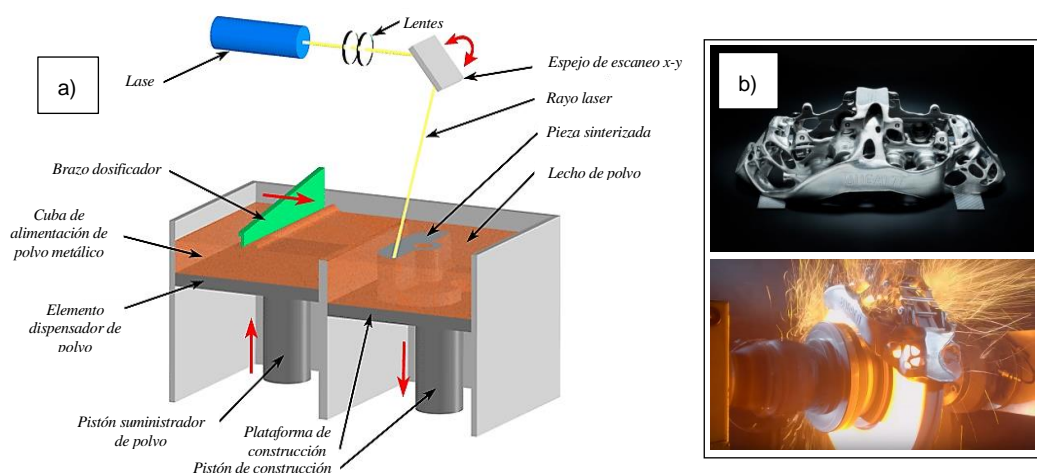


- **DMLS, Direct Metal Laser Sintering (Sinterizado metálico láser directo, lecho 0D) o Láser Cusing (lecho 0D) o SLM, Selective Laser Melting (fusión láser selectiva, lecho 0D):** En la actualidad existen varios fabricantes que emplean este proceso de fusión por láser de metales y cada uno de ellos le ha llamado de distinta manera, de ahí que se le conozca con varios nombres, por ejemplo los alemanes de EOS GmbH le llaman tecnología DMLS, los también alemanes de Concept Laser GmbH (grupo Hofmann) le llaman Laser Cusing, mientras que los americanos de MTT Technologies le dan el nombre de SLM [1].

Este proceso de fabricación surge como una variación de la tecnología SLS, con la particularidad de que en ésta tecnología el láser realiza la fusión de parte del polvo convirtiéndola en una masa homogénea, en este aspecto se parece más a la tecnología EBM aunque difiere en el sistema de aporte de energía.

Por otro lado, este proceso de fusión por láser difiere del sinterizado selectivo en que, el polvo del lecho contiene tanto al ligante como el material de aporte siendo ambos metálicos, la diferencia en la temperatura de fusión de ambos elementos hace que el láser funda al ligante (bronce por ejemplo) y éste aglutine a material de aporte de mayor punto de fusión (aceros inoxidables, para herramientas, aleaciones de cromo-cobalto, titanio y aleados, aluminio, inconel, hastelloy, etc.), de esta manera se genera una capa de material, y posteriormente tras varias iteraciones del proceso, se construye la pieza capa a capa.

En cuanto al proceso de fabricación (Figura 26) éste es muy similar a otros de lecho en polvo, dispone de un láser de alta energía el cual a través de un juego de lentes y espejos es dirigido al punto a fundir, utiliza también un recoater para nivelar la superficie y aportar material y una cuba de fabricación para contener la pieza y el material sobrante. Por último se ha de resaltar que el proceso se lleva a cabo en una atmósfera controlada de gas inerte como por ejemplo en presencia de Argón o Nitrógeno.



**Figura 26:** a) Tecnología SLM, DMLS o Laser Cusing [35] , b) Ejemplo de pieza impresa mediante esta tecnología; Caliper del freno impreso en Ti6Al4V en una impresora SLM 500 de SLM Solution de la empresa Bugatti perteneciente al grupo Volkswagen [51].

En este tipo de procesos se puede conseguir pequeños grosores de capa de alrededor de 40 micras con lo cual los resultados tienen una gran fidelidad respecto al modelo inicial en CAD. El mayor inconveniente de este proceso recae en la necesidad de un esmerado diseño de los soportes, ya sean para la sujeción de la pieza o sustento de voladizos y para la evacuación del calor en zonas con posibles sobrecalentamientos con el fin de reducir tensiones internas en la pieza. Por otro lado, como se puede intuir dichos soportes suponen una reducción en la productividad y un aumento en el coste de pieza.

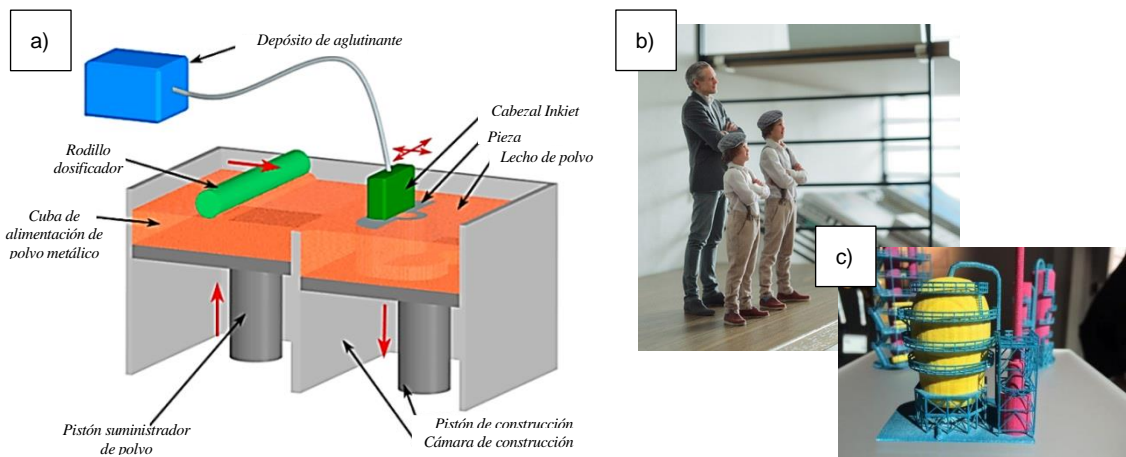
- **3DP, 3D Printing (impresión 3D, lecho 1D)**: Llegados a este punto se ha de decir que existe cierta ambigüedad en el uso de este término, ya que muchos fabricantes que utilizan el término “impresoras 3D” a pesar de utilizar tecnologías distintas y destinadas a distintos ámbitos de la industria, con el fin de hacer llegar al mercado la imagen de que se trata de algo tan sencillo, limpio, económico y fácil como una impresora de papel, pero en tres dimensiones. Es más, algunas marcas han pasado a posicionar sus productos desde el original de «Prototipado Rápido» a «impresoras 3D» y, a continuación, cuando la nueva tendencia es la fabricación, cambian su marketing para llamarlos Rapid Manufacturing, tratándose del mismo fabricante y la misma tecnología.

En el presente documento se prefiere asignar el nombre de 3D printing (3DP) a los sistemas desarrollados por el MIT (Massachusetts Institute of Technology) en 1993 [52] y comercializados por primera vez por la estadounidense Z Corporation en 1996 (posteriormente adquirida por 3D Systems en Enero de 2012). Se ha de resaltar, por otro lado, que recientemente se ha conocido las intenciones de la gigante tecnológica HP que tras entrar en el mercado de la impresión 3D con su tecnología Multi jet Fusion fundamentada en los principios de la tecnología 3DP, entrará también en el mercado fabricación aditiva metálica.

El principio del funcionamiento de estas tecnologías difiere en poca medida de la usada en las impresoras comunes de chorro de tinta. Obviamente el material contenido en estos cartuchos no es tinta, sino que es un aglutinante líquido y su deposición tiene lugar sobre el lecho de polvo previamente depositado por un recoater sobre la plataforma de construcción dentro una cuba, en este aspecto difiere de la tecnología Polyjet en la cual no existe lecho de polvo (ver Figura 27).

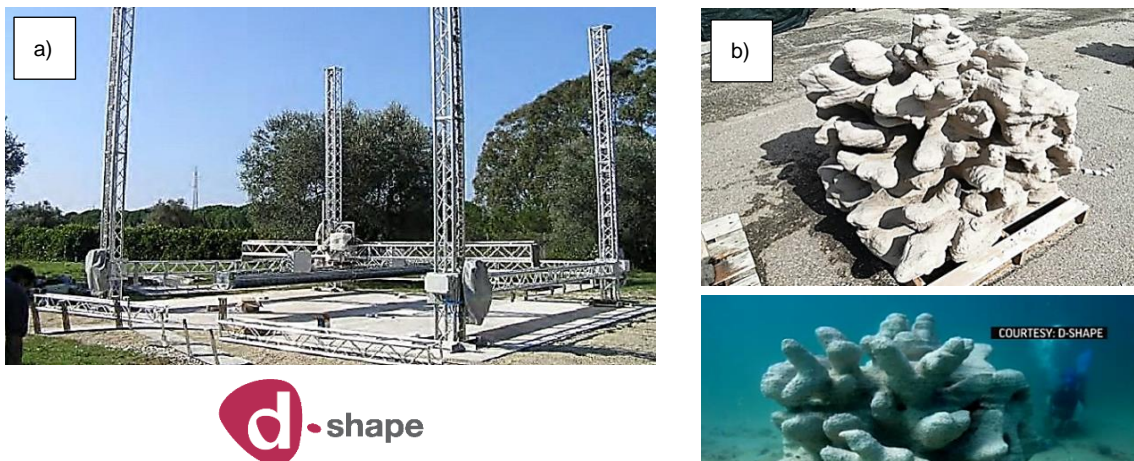
Estas tecnologías ofrecen algunas ventajas importantes, una de ellas es su alta productividad y reducidos tiempos de fabricación, el uso de múltiples cabezales con un elevado número de boquillas da origen a expulsar gran cantidad de aglutinantes, así como colores en distintas combinaciones y graduaciones. Por otro lado, en cuanto a las desventajas las propiedades mecánicas de las piezas a día de hoy siguen siendo inferiores a las producidas por tecnologías convencionales y en algunos casos las piezas requieren de post-procesado.





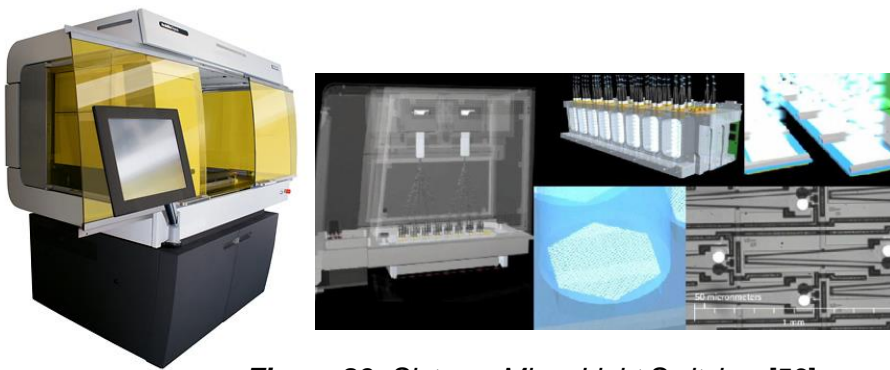
**Figura 27:** a) Tecnología 3DP [35], y b) versión impresa de cualquier persona tras ser escaneada reproducida mediante esta tecnología [53] y c) pieza ejemplo de la tecnología Multi Jet Fusion de HP similar al 3DP pero con la adición de calor para favorecer la consolidación de las capas de Poliamida en polvo [54].

Por otra parte, y a modo de curiosidad en las imágenes de a continuación se muestra la utilización de estas tecnologías en la construcción de estructuras de grandes dimensiones. Un ejemplo de ello aparece de la mano del ingeniero italiano Enrico Dini desarrollador de las impresoras d-shape, cuyo funcionamiento es similar al sistema de Z corp, pero estas impresoras permiten a partir de arena y un aglutinante natural amigable ecológicamente hablando, la reproducción de estructuras coralinas afín de favorecer la recuperación de arrecifes dañados (Figura 28).



**Figura 28:** a) Imagen de una impresora de grandes dimensiones de la mano de D-Shape donde el aporte de material es por lecho mientras que la energía a través de la deposición de aglutinante es por línea. b) Imagen de una estructura coralina impresa en 3D (b) [55].

- **MLS, Micro Light Switches (Microconmutadores de luz, lecho 1D)**: este proceso no tiene un recorrido histórico lejano ya que su primera aparición fue prácticamente en 2009. El lanzamiento corresponde a la empresa Huntsman (actualmente bajo mandos de 3D Systems) la cual cuenta con un gran reconocimiento en todo el mundo por su tecnología de adhesivos Araldite. Este sistema al igual que otros utiliza la luz como fuente de energía a una longitud de onda concreta para solidificar la resina, la cual mediante un cableado de fibra óptica es llevada a 40000 micro obturadores que al igual que un cabezal Inkjet, pero en vez de expulsar tinta, emiten luz UV al recorrer la superficie de la cuba, solidificando está a velocidad constante (Figura 29).



**Figura 29:** Sistema Micro Light Switches [56].

Los materiales utilizados en este caso son resinas fotosensibles similares a las utilizadas en la tecnología SLA. En la MLS la cuba de fabricación se rellena creando un lecho líquido de resina donde el aporte de energía se realiza mediante el cabezal en línea y no por punto como en el SLA, por lo también es necesario el uso de estructuras de soporte en piezas con voladizos, lo que supone un post-procesado para eliminarlas así como todos los inconvenientes anteriormente descritos.

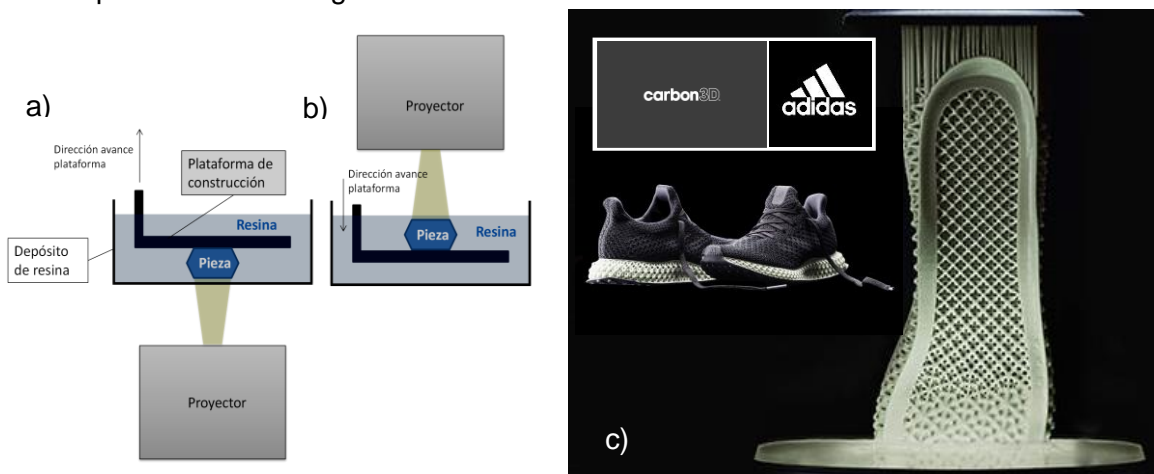
- **DLP, Digital Light Processing (máscara DLP, lecho 2D)**: también conocida como MIP-SL del inglés (Mask image projection based on stereolithography), la primera aparición de la tecnología DLP en el mundo de la fabricación aditiva tuvo lugar en la feria alemana de EuroMold en el 2001 de la mano de EnvisionTec y de su creador y CEO Al Siblani, pero no es hasta el 2004 que dicha tecnología se comercializó, aunque cabe decir que fue la empresa israelí Cubital con su tecnología SGC (Solid Ground Curing) la pionera en 1991 en presentar la primera máquina de solidificación de material fotosensible por máscara de rayos UV [25].

Esta tecnología se fundamenta en la proyección de imágenes mediante proyectores DLP tecnología inventada por Texas Instruments en 1987. Éstos proyectores basan su funcionamiento en un semiconductor óptico conocido como chip DMD (Digital Micromirror Device), el cual desde su aparición cambió la forma de reproducir imágenes, siendo este chip considerado uno de los conmutadores de luz más sofisticado del mundo, conteniendo una matriz rectangular de millones de espejos microscópicos pivotantes, cada uno de esos

microespejos mide menos de una quinta parte del ancho de un cabello humano. Estos microespejos del chip DMD se inclinan hacia la fuente de luz de un sistema de proyección cuando está activado o en sentido contrario cuando esta desactivado. Así, un píxel cuadrado con una profundidad de color en escala de grises de  $2^8$  permite debido a una alta frecuencia de activación (miles de veces por segundo) generar un píxel más o menos oscuro sobre la superficie de proyección.

En cuanto a esta tecnología aditiva básicamente existen dos tipos de configuraciones estándar, la configuración Bottom Up y la Top Down.

En la configuración Bottom Up el proyector se sitúa por debajo de un depósito de resina translucido y la plataforma va subiendo a medida que se van polimerizando las distintas capas de material al contrario de todos los sistemas vistos hasta ahora. Esta configuración suele disponer de un sistema activo que evite la adhesión de las capas polimerizadas en el fondo del depósito. En cuanto a la configuración Top Down, el proyector se sitúa encima del depósito de resina y el movimiento de la plataforma de construcción va en sentido negativo desplazándose una distancia correspondiente al espesor de la capa. Esta configuración presenta el inconveniente de requerir un depósito mayor de resina con lo cual su coste de utilización es mayor, más no el de consumo. En el esquema de a continuación (Figura 30) se comparan ambas configuraciones.



**Figura 30:** Distintas configuraciones de una impresora 3D DLP. a) Configuración Bottom Up - b) Configuración Top Down [Fuente: elaboración propia] y c) Ejemplo del uso de una impresora Bottom-Up en la fabricación de la suela de la zapatilla Adidas 4D [57].

Como principal ventaja de este sistema se podría decir que al ser un sistema de máscara donde el sistema de aporte de energía o la luz se realiza por capa (2D), permite realizar múltiples piezas todas ellas distintas al mismo tiempo y con un tiempo de fabricación igual al requerido por la pieza de mayor altura. Por otro lado, esta tecnología presenta una elevada capacidad de reproducción y acabado superficial. En cuanto a las desventajas, la principal tiene que ver con el carácter fotosensible de las resinas ya que expuestas a diferentes

fuentes de radiación puede dar inicio a su polimerización lo cual condiciona su manipulación y las hace degradables en el tiempo. Por otro lado, también es importante resaltar que solo permite la utilización de un material a la vez, el contenido en la cuba.

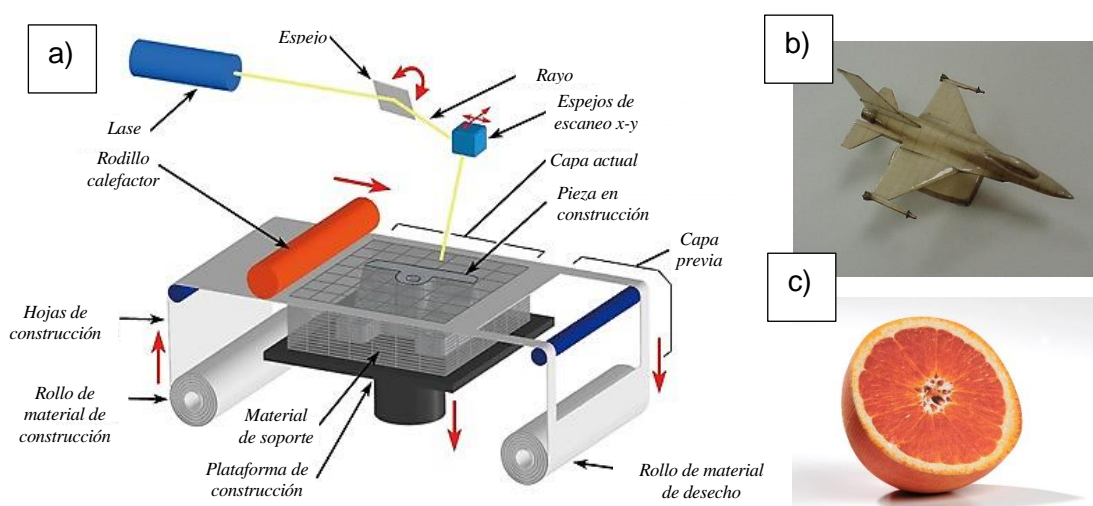
A parte de estos procesos también se ha considerado interesante hacer referencia a los procesos LOM (Laminated Object Manufacturing).

- **LOM, Laminated Object Manufacturing (fabricación por laminado de objetos):** esta tecnología fue desarrollada por la empresa norteamericana Helisys en 1991 fue concebida inicialmente para la fabricación de prototipos mediante la superposición de láminas de papel aunque actualmente trabaja con láminas de materiales diferentes. En el año 2000 Helisys cede su tecnología a la japonesa Toyoda, pero unos meses después Michael Feygin autor intelectual de la tecnología LOM crea la empresa Cubic Tech.

Con este sistema la calidad de reproducción varía en función del espesor de las láminas que hacen el papel de material de aportación y al estar enrollados en bobinas (una de alimentación y otra de recogida, ver Figura 31).

En cuanto al proceso de fabricación este es simple; una vez posicionado el material, el cual previamente ha sido impregnado con un termoplástico, es recorrido por un rodillo calefactado el cual al aplicar presión y calor, creando una capa nueva sobre las anteriores.

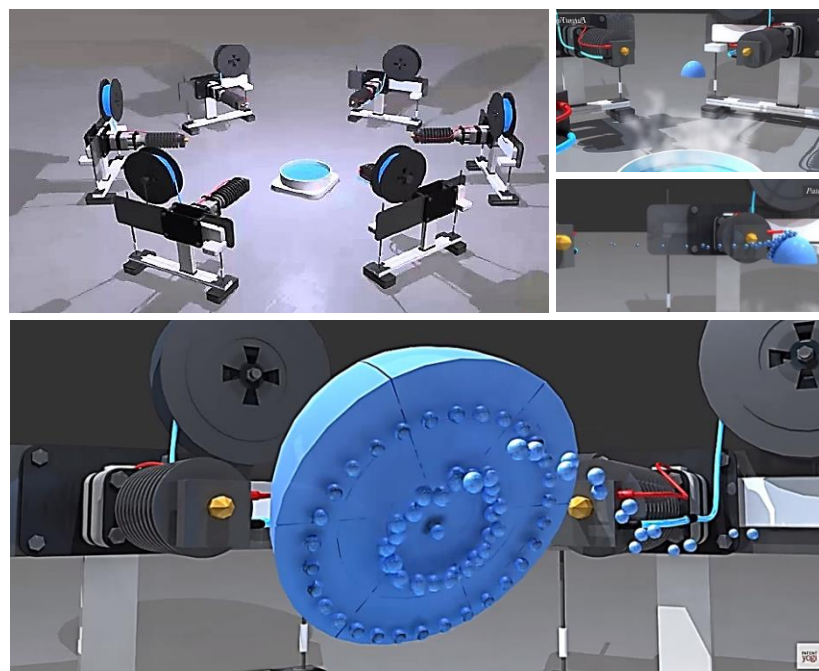
Durante esta fase la plataforma de fabricación se eleva ligeramente para aumentar la presión incidente entre las capas y el rodillo. Posteriormente el rodillo se retira y un láser de CO<sub>2</sub> corta la superficie dibujando la silueta de la capa y, una vez acabada, la plataforma de fabricación desciende el equivalente a una capa liberando el recorte del rollo de material aportado dejando cabida a la nueva capa, la cual se creará gracias al avance de las bobinas y la renovación de la lámina.



**Figura 31:** a) Tecnología LOM [35] y ejemplo de piezas impresas por esta tecnología, b) pieza monocromática [58] y c) pieza multicolor al poseer el equipo LOM un sistema de deposición de tinta Inkjet antes del uso del rodillo calefactor [59].



Por último y a modo de complemento del estado del arte de las tecnologías de impresión tridimensional, recientemente se ha hecho público que la empresa la Boeing trabaja en futurista sistema de impresión de objetos tridimensionales en donde mediante la levitación del mismo permitiría la reproducción de piezas en el espacio sin ningún tipo de sujeción. En concreto la agencia de patentes de EE.UU en el 4 de febrero de 2016 bajo el título de “Free-Form Spatial 3-D Printing Using Part Levitation” [60] registro un sistema de reproducción donde mediante múltiples boquillas y a través de campos magnéticos permitiría la producción de objetos en 3D en el espacio (ver Figura 32). Se ha de decir por otra parte, que la información disponible hace pensar que dicha tecnología se encuentra a un TRL (Technology Readiness Level) muy bajo y por tanto dista mucho de estar desarrollada y mucho menos disponible en los próximos años.



**Figura 32:** Representación conceptual de la tecnología de impresión plateada por Boeing donde el objeto a reproducir flota en el espacio [61].

Sin embargo, como puede apreciarse a través en el conjunto de imágenes conceptuales de la figura anterior, el sistema presentado por Boeing consta de un conjunto de boquillas dispuestas el rededor del elemento levitante, y debido a la capacidad de rotar a dicho elemento en el espacio sin ningún tipo de sujeción, el sistema ofrece la posibilidad de depositar u adherir el material de aporte en toda su superficie incluso por debajo de dicho elemento, lo cual incrementaría la flexibilidad de estos sistemas enormemente.

#### 1.4.2.4. Ventajas

Las tecnologías aditivas, a diferencia de las tecnologías substractivas, permiten la deposición controlada de material. Esto supone partir de una pieza inexistente e ir

creándola, materializándola, capa a capa de la nada. Este método constructivo abre un mundo de posibilidades nuevo hasta ahora desconocido. Los principios en los cuales se sustenta las ventajas de estas técnicas de manufactura frente a las tradicionales son las siguientes [62]:

**Principio uno: la complejidad de la fabricación no eleva el coste.** En un proceso de fabricación convencional cuanto más complicada es la forma de un objeto más cuesta crearlo. Con las tecnologías aditivas, la complejidad geométrica del elemento a reproducir no supone un coste añadido. De hecho a menudo las formas complejas y/u ornamentadas de una pieza supone por poseer muchas cavidades una reducción del coste, puesto usualmente requieren de menor cantidad de material para su materialización. Esto rompe totalmente con la estructura de costes de las técnicas tradicionales y en consecuencia en el modo en el que calculamos los precios de los objetos manufacturados.

Por otro lado, en cuanto a geometrías, la fabricación aditiva permite obtener objetos imposibles hasta ahora con los métodos de fabricación convencionales, en lo referido a piezas con canales internos, tuberías de espesor variable, piezas con densidades variables y con ello nuevas propiedades intensivas (por ejemplo; propiedades resistivas o elásticas a partir de ahora dependen de su posición dentro de la geometría del objeto). Es importante añadir que la fabricación aditiva permite explotar la identidad individual de los consumidores (la personalización), es por ello que se vislumbra un futuro prometedor en la medicina y la bioingeniería, ya que no existe nada más personal que el cuerpo humano.

**Principio dos: la variedad sale gratis.** Un rasgo característico de las técnicas de fabricación aditiva es su enorme versatilidad, es decir, una impresora 3D puede crear objetos de formas casi ilimitadas y a su vez puede crear múltiples de éstos todos distintos y tan complejos geoméricamente como se requiera. Este fenómeno es imposible que tenga lugar con los procesos tradicionales donde deben existir patrones comunes entre las piezas o lotes de estas que se fabrican de forma secuenciada.

**Principio tres: No hace falta ensamblaje.** Las piezas fabricadas por técnicas aditivas pueden salir de las máquinas interconectadas. La producción en masa se basa en las cadenas de montaje. En las fábricas modernas, las máquinas crean objetos idénticos que más adelante son ensamblados por robots o humanos, a veces en lugares muy lejanos de donde se han fabricado. Así cuantas más piezas posee un producto más cuesta su ensamblaje y más caro es de fabricar. Al crear un objeto por capas se puede construir una puerta con sus bisagras y pasadores al mismo tiempo, sin que haga falta ensamblar las partes, lo cual acorta las cadenas de suministros, ahorrando costes de mano de obra, transporte y reduciendo la contaminación.

**Principio cuatro: Elaboración bajo demanda.** Debido a la versatilidad de las máquinas de fabricación aditivas es posible imprimir piezas bajo demanda, en el momento que se requiera, en el lugar que se necesite el objeto y con toda la especialización y

personalización que se solicite, es decir, a la carta. Este fenómeno en las cadenas de suministro se conoce como *ultrapostponement* ya que no requiere de ningún tipo de acopio de inventario previo.

Por otra parte, desde un punto de vista netamente económico plantea un mundo donde las estrategias especulativas de las empresas carecen de sentido, ya que la producción depende únicamente de las necesidades del consumidor siendo innecesario establecer posibles escenarios, ni previsiones. Por otro lado, en su versión más radical plantea la posibilidad de transferir todos los costes de producción al usuario, de este modo el usuario pasa de ser un simple consumidor a ser productor a la vez de sus propios objetos de consumo. El término *prosumer* (productor-consumidor) puede ser traído a colación en este sentido.

Por otro lado y no menos importante, ante una demanda digamos desproporcionada, debido a que estas técnicas cumplen una función netamente de reproductor digital, tiene el potencial de permitir ante una emergencia, hacer uso del concepto *colectividad* es decir, trabajar en red y con ello multiplicar los recursos disponibles de una zona, región o país.

**Principio cinco: Reducción entre lo concebible y lo realizable.** En este aspecto debido a la capacidad casi ilimitada de reproducir geometrías complejas y combinado con las capacidades del CAD y el CAE, abre un nuevo campo para los diseñadores de reproducir formas solo posibles por la naturaleza y limitadas hasta ahora por las herramientas de los procesos tradicionales.

Por otra parte, cabe destacar que, permite vislumbrar un futuro donde nuestra escala de valores ha sido modificada por completo, es decir en este sentido los materiales base y el diseño de los productos se erigen como los elementos donde se fundamenta el valor diferencial de un objeto respecto a otro similar. Es decir, en dicho futuro hoy hipotético, el valor de una zapatilla no radica en su coste, disponibilidad, su adecuación al uso y belleza, sí no que será fundamentado en: debido a que el coste lo asume el usuario consumidor y a la vez productor del mismo, a través de un aparato reproductor digamos doméstico, y debido a que con ello la disponibilidad del mismo se sobrentiende, siempre y cuando los materiales estén disponibles, serán este último un elemento fundamental de esta nueva estructura de valor. Por último y en segundo lugar, debido a que su belleza y la adecuación al uso y con ello nos referimos a su funcionalidad y su talla, son parámetros propios del diseño del mismo aglutinables en un archivo digital, será éste el segundo de los elementos en los que se fundamentará la futura estructura de valor que aquí se plantea.

**Principio seis: Reduce la intervención del humano en el proceso de fabricación.** En un principio los artesanos requerían del ensayo y el error para perfeccionar sus habilidades de manufactura, posteriormente con las máquinas de fabricación y la fabricación asistida por ordenador los operarios cada vez más especializados y cualificados pero aún no extintos, realizan la calibración y ajuste de estas infraestructuras productivas. En el caso de la

fabricación por técnicas aditivas esta participación del humano en la conformación de los objetos se ve aún más reducida, lo cual desvincula totalmente el diseño de la fabricación y en consecuencia abre la posibilidad de implantación de estas tecnologías en lugares más remotos y/o en circunstancias extremas. El reto lanzado por la NASA a las distintas universidades y centros de investigación en cuanto a la construcción de una base permanente en la luna usando estas técnicas de fabricación aditiva son un buen ejemplo de ello.

Por otro lado, dicha derogación de la intervención del humano en estos procesos de fabricación permite la deslocalización de los posibles centros de producción, pudiendo estar éstos cerca de las zonas de consumo, reduciéndose así las necesidades de transporte y por otro lado, eliminándose las ventajas salariales de algunos países emergentes y subdesarrollados, lo que en consecuencia podría llegar a permitir una reequilibración de la del tejido industria a nivel global.

**Principio siete: Fabricación compacta y portátil.** Teniendo en cuenta la capacidad de producción por metro cuadrado de todas las tecnologías productivas tradicionales, con las tecnologías aditivas podemos fabricar objetos de volúmenes muy superiores, lo cual las hacen útiles para ser transportadas y ubicadas en lugares donde el espacio está limitado.

**Principio ocho: Generan menos residuos.** Puesto que la fabricación aditiva se realiza colocando material allí donde es requerido, se obtiene un altísimo grado de eficiencia en cuanto a residuos del material aportado, cosa que es imposible en las técnicas substractivas donde se parte de un material en bruto, al cual se le es extraído el material innecesario, siendo este volumen de material en principio considerado como un residuo.

**Principio nueve: Innumerables variedades de Material.** En la actualidad los materiales suponen más una limitación que una ventaja puesto que el rango de materiales disponibles susceptibles a ser aplicados en las tecnologías aditivas son más bien escasos en comparación a todo el abanico existente en las tecnologías tradicionales. Teniendo en cuenta que eventualmente estas diferencias se reducirán y que con el desarrollo de estas técnicas aditivas se puede en la actualidad y se podrá con más facilidad imprimir múltiples materiales a la vez, dará origen a multitud de nuevos materiales y meta-materiales con propiedades particularizadas.

**Principio diez: Reproducción física precisa.** Al igual que un archivo de música digital se puede copiar y reproducir infinitas veces sin que pierda calidad de audio, con las técnicas de fabricación aditivas se espera que en un futuro el intercambio entre el mundo digital y físico se realice de forma más precisa y sencilla, es decir, se escaneará, editará y se duplicará objetos creando réplicas exactas del modelo original.

Algunos de estos principios ya se cumplen hoy en día, otros en cambios lo harán quizás en décadas, pero no cabe duda que, tras eliminar las restricciones impuestas por las tecnologías tradicionales, junto con las expectativas creadas con la fabricación aditiva en



una era en donde se ha democratizado el conocimiento, se están sentando las bases para un aluvión de innovaciones en cadena que cambiaran la forma en que vivimos.

#### 1.4.2.5. Limitaciones

Aunque en principio puede parecer que las tecnologías aditivas serán la panacea o al menos la solución a muchos de los problemas a los que la humanidad se enfrenta, hoy en día representan un conjunto de tecnologías aun en pañales si las comparamos con las técnicas tradicionales, que si bien presentan un enorme potencial aun requieren de mucha evolución y desarrollo. Por este motivo, a continuación se detallan algunos de las principales limitaciones de la fabricación aditiva, siendo estas limitaciones las que marcan los retos y objetivos a superar en el futuro inmediato por los centros de investigación y desarrollo que tienen sus esfuerzos puestos en este campo.

**Productividad:** una de las características de las tecnologías de fabricación aditiva es la relación entre velocidad y acabado. Cuanto mejor acabado superficial requiera la pieza más lento será el proceso. Esta limitación viene impuesta por el espesor de capa, capas más delgadas reproducen mejor las piezas. Este es uno de los aspectos que más restringe la adopción de los procesos aditivos en la industria ya que por muy rápido que añadamos material o recorramos la superficie de la capa, el número de estas depende de su espesor lo cual hace que se ralentice el proceso disminuyendo la productividad.

Por otro lado, se ha de resaltar que las tecnologías aditivas por lo general requieren de un post-procesado. El tacto arenoso del sinterizado, el corte discontinuo de las herramientas en el mecanizado en la eliminación de soportes, las imprimaciones, los pulidos, recubrimientos y pinturas son algunas de estos procesos habituales, y por tanto la participación del humano sigue requiriéndose en muchos casos en el proceso de manufactura.

**Materiales:** Hoy en día existe una amplia gama de materiales susceptibles a ser utilizados en las tecnologías aditivas pero dicha gama de materiales abarca un porcentaje muy escaso del conjunto de materiales existente en las tecnologías convencionales [1],[63], bien es cierto que las tecnologías de fabricación aditivas son muy jóvenes en comparación a otras, y siendo esta limitación solventable con el paso del tiempo, hoy en día esta disparidad en los precios y disponibilidad de materiales, retrasa, entorpece y limita sus implantación en la industria.

Sin embargo, aunque un mismo material es más caro en fabricación aditiva que en procesos convencionales, en ésta no se suele desperdiciar material por lo que en algunos casos supone un ahorro. Ahorro que en podría llegar a ser suficientemente importante para compensar dicha limitación haciendo de la fabricación aditiva un candidato a considerar.

**Restricción de tamaño:** inicialmente pudo ser una limitación importante en algunas de las tecnologías de fabricación aditiva aunque en la actualidad dicha limitación se ha visto reducida como se ha podido observar en apartados previos. El tamaño máximo de una

pieza está limitado por las dimensiones de la plataforma y volumen de la cuba de fabricación. En la actualidad existen máquinas que según la tecnología que utilice puede llegar a imprimir piezas de grandes dimensiones, por ejemplo existen máquinas que pueden generar piezas de unos  $8 \text{ m}^3$  en metal o como la D-Shape con una capacidad máxima de impresión de  $216 \text{ m}^3$  en un material de imitación pétrea.

Además del tamaño máximo de las piezas también existe una restricción en el tamaño mínimo. En algunas tecnologías estas restricciones se debe a factores como el diámetro mínimo que puede solidificar un haz de luz proveniente de un láser sin afectar a partículas colindantes, el espesor mínimo de la capa fabricada o el diámetro que presenta el material pulverizado (granos más gruesos son más fáciles de manipular pero limita la calidad de detalle y nivel de resolución, a su vez granos pequeños aumentan la calidad de detalle pero al ser mucho más volátiles se hace más complicada su manipulación). Cabe resaltar sin embargo, que como hemos podido apreciar en apartados previos en la actualidad se han desarrollado tecnologías con la capacidad de reproducir objetos visibles solo en la escala nanométrica.

**Extracción de piezas:** las piezas fabricadas aditivamente suelen estar solidarias a la plataforma de construcción y en algunos casos dicha pieza puede poseer soportes también solidarios a la pieza y al plataforma, la separación de la pieza respecto a los soportes y a la plataforma suele ser laboriosa y más cuando las pieza está construida en materiales metálicos donde por lo general requiere de una operación de mecanizado. La operación de mecanizado requiere a su vez de sujeciones especiales y utillajes, así como requerimientos en la geometría de la pieza, como grosores mínimos, etc. Por otro lado, también requiere de estrategias de mecanizado que debido a las geometrías complejas de las piezas estas pueden ser engorrosas condicionando el acabado final de la pieza. Por último, decir que aunque los soportes no se fabrican macizos en materiales costos estos residuos se podrían llegar a tener en consideración.

Esta desventaja es más apreciable cuanto menor sea el tamaño de la pieza. Además de tener menores dimensiones, es habitual fabricar múltiples de éstas a la vez con el fin de disminuir el coste/pieza; por consiguiente la separación puede ser mucho más ardua. Cabe mencionar sin embargo que de ser viable la solución tecnológica planteada y recientemente patentada por Boeing (ver Figura 32) dichas desventajas inducidas por los soportes desaparecerían al no ser requerida ningún tipo de sujeción.

**Tecnología novedosa:** en este apartado se considera como una limitación el hecho de que los procesos de fabricación aditiva son una tecnología dentro de lo que cabe relativamente nueva y por tanto, están poco extendidas, de las cuales se dispone de un conocimiento de uso limitado. Se entiende con esto una menor cantidad de informes, comparativas, etc., que analicen los procesos de fabricación aditivos de una forma rigurosa.

Por otra parte, es importante resaltar que aunque el diseño de un producto, pieza u objeto se puede realizar libremente con un software CAD, estos software están diseñados desde el punto de partida de una fabricación sustractiva o de conformado y por tal motivo carecen de herramientas que permitan sacar el máximo beneficio a las posibilidades que ofrece el mundo de la fabricación aditiva. Por ejemplo a la hora de fabricar una pieza monomaterial pero que en su geometría esté constituido por densidades variables, en los software de CAD actuales dicha posibilidad no se dispone y los métodos aditivos si ofrecen dicha capacidad.

**Productos multimaterial y su reciclado:** en la actualidad solo algunas tecnologías permiten la deposición controlada de múltiples materiales, pero esta limitación es solo una cuestión de tiempo. Por otro lado, pese a que la posibilidad de realizar productos constituidos por materiales múltiples abre un mundo de posibilidades y supone un avance enorme, a su vez tiene como inconveniente que cuando dicho producto termine su ciclo de vida, su reciclaje será más complejo y costoso, de esta manera en un futuro próximo se resalta aún más la necesidad del carácter sostenible de los productos.

**Costes:** la fabricación aditiva hoy por hoy es un proceso lento y costoso, ofrece enormes posibilidades pero solo son aplicadas en la fabricación de piezas de alto valor añadido, siendo absolutamente descartadas para la fabricación de productos en masa. Es importante en este punto hacer una distinción entre impresión 3D y fabricación aditiva, si bien es cierto que las tecnologías de impresión 3D se ha visto muy abaratadas en los últimos años asociándose estas principalmente a piezas de prototipaje y piezas no funcionales, en los procesos de fabricación aditiva destinadas a la fabricación de piezas funcionales esta reducción de precios no ha sido tan importante. Éstas máquinas además de suponer una inversión importante, requieren de personal altamente especializado, así como también de mantenimiento y la utilización de materiales costoso.

**Propiedad, seguridad y nuevas fronteras legales:** la fabricación aditiva reduce la distancia entre lo imaginable y lo realizable a límites desconocidos hasta ahora. La digitalización de los objetos supone un gran desafío para las leyes que pretenden definir cuestiones filosóficas como protección, seguridad o propiedad.

Con el desarrollo de las TIC en una era en donde la información está cada vez más democratizada y debido a que una pieza, objeto o producto puede estar definida por completo en un archivo, la difusión de este archivo digital se hace necesario nuevos controles y límites.

Otro de los riesgos que conlleva la fabricación aditiva es la seguridad del consumidor, que es algo que en la mayoría de países industrializados dan por hecho, olvidando las precauciones legales que se han tomado a lo largo de los años para asegurar que los productos que compramos van a funcionar como se especifica y en consecuencia no nos van a hacer daño, y de fallar, averiguar qué ha fallado y quién es el responsable. Esto también introduce la necesidad de delimitar hasta qué punto un usuario cualificado o no

puede tener el poder de fabricar cualquier objeto en este aspecto, por ejemplo, ya existen personas que fabrican aditivamente por su cuenta armas de fuego sin control.

Por otro lado, también plantea un nuevo desafío en el cumplimiento de las leyes de propiedad intelectual, de explotación etc., ya que con las tecnologías aditivas facilita la presencia de piratas y falsificadores. Quizás las tecnologías aditivas replantearán el modelo existente, en donde cualquier empresa para poder tener beneficios es necesario poseer cierta exclusividad en cuanto a los derechos de creación y comercialización de un producto.

#### 1.4.2.6. Fabricación aditiva híbrida

Este nuevo apartado se enfoca del estado de las tecnologías aditivas aunque de forma superficial, como una consecuencia de una serie de hitos que han marcado el progreso del humano en el control de la materia física, evidenciándose la importancia de la fabricación aditiva híbrida de múltiples materiales como pieza clave en la próxima etapa de la impresión 3D.

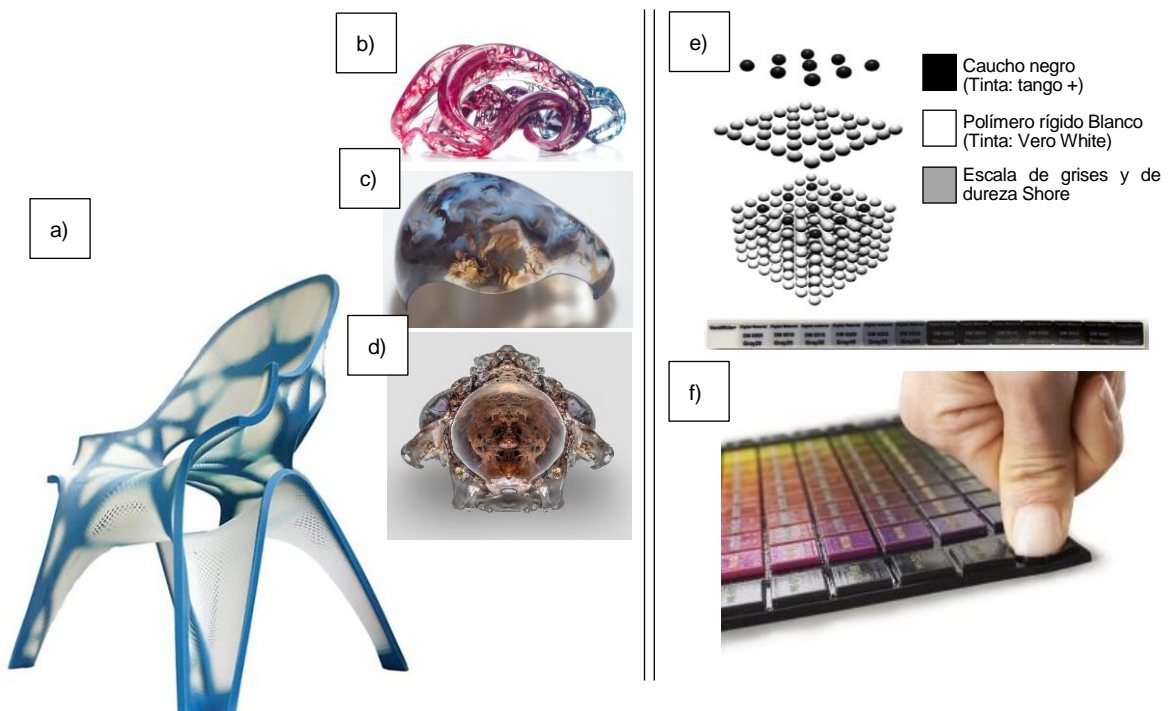
Una primera etapa podríamos decir que está relacionada con un control sin precedentes sobre la forma construida con materiales desde el nylon al vidrio, desde el chocolate al titanio, desde el hormigón a las células vivas. La capacidad de crear formas arbitrarias ya está teniendo profundas implicaciones más allá del diseño de ingeniería. La fabricación en serie se está convirtiendo en la personalización en serie. En un futuro cada vez más cercano el mundo dispondrá de herramientas, estructuras (tanto legales como de software) y conocimientos asociados a la manufactura que permitirá liberar el potencial de la creatividad humana (ejemplo en la Figura 33).



**Figura 33:** a) Asiento de un coche fabricado aditivamente por la empresa Toyota [64], b) prototipo de un estructura lattice diseñada por Betatype y fabricada aditivamente por el Imperial College de Londres en un equipo Renishaw [65], c) Engranajes impresos con una geometría inusual [66] y d) Ejemplo de cómo, la optimización topológica en combinación

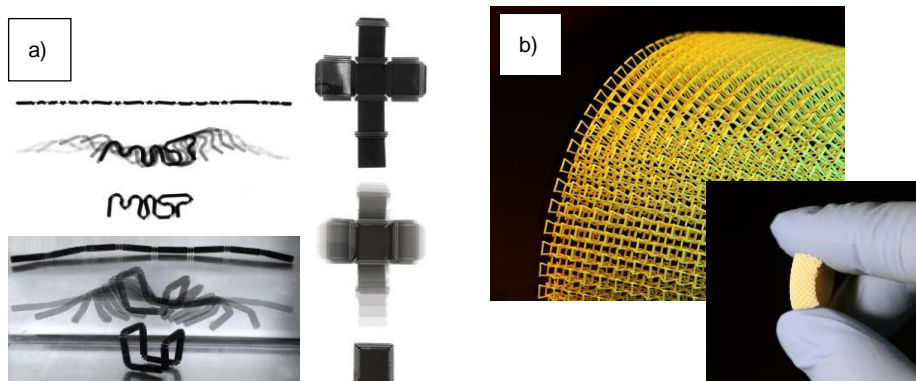
con la fabricación aditiva, podría suponer un ahorro en el número de piezas de un conjunto, simplificando el montaje de estructuras complejas, y en el ámbito de la aeronáutica y más concretamente en la de vuelos comerciales, como el ahorro de peso supone una reducción significativa en el consumo de combustible y por ende contaminación y coste [67].

Una segunda etapa podemos decir que se fundamenta en el control composición de la materia, pasando de simplemente dar forma a la geometría externa a dar forma a la estructura interna de nuevos meta-materiales con una fidelidad sin precedentes. Algún día seremos capaces de crear materiales dentro de materiales (o lo que la compañía Stratasys llama materiales digitales, ver Figura 34), de esta manera depositando distintos materiales base de forma controlada seremos testigos del nacimiento de nuevos materiales llamémoslos materiales 2.0 con propiedades previamente diseñadas. Los procesos de fabricación de éstos materiales 2.0 eliminarán las limitaciones tradicionales que determinan que cada pieza debe estar hecha de un único material, la cual será ensamblada posteriormente con otra de otro material único y así sucesivamente. Con la impresión de múltiples materiales se podrá fabricar a la vez varios componentes de materiales 2.0 distintos y ensamblados de una vez desde su creación.



**Figura 34:** a) Silla fabricada por tecnologías aditivas multimaterial combinando solo pigmentación [68]. En la misma línea, b,c d) algunas de las creaciones de Neri Oxman en el 2016 e impresas por Stratasys, Ltd. a través de su tecnología PolyJet. Finalmente, e) vóxel multi-atributo con reproducción multimaterial, como ejemplo de los llamados 'discret digital materials' (termino desarrollado por Stratasys) en donde se combina una propiedad cromática y otra táctil en escala de grises y f en color [69].

Finalmente, una tercera etapa de la cual ya se comienza a ver señales, es la referida al comportamiento de la materia, es decir, no solo se controla la forma y la composición si no también la capacidad de programar los materiales para que se comporten de un modo concreto (ver Figura 35). Con la deposición controlada de múltiples materiales nos abre la posibilidad de pasar de imprimir piezas y materiales pasivos a imprimir sistemas activos, sensibles que puedan tener un comportamiento mediante estímulos de externos y/o energías pasivas como la térmica, magnética o lumínica, ciertamente esto parece ciencia ficción pero existen importantes investigaciones en dicho campo, y en la actualidad comenzamos a ver sus inicios con lo que algunos llaman la impresión 4D y los materiales inteligentes.



**Figura 35:** a) Material programable desarrollado en los laboratorios del MIT, en colaboración con Stratasys y Autodesk [70], y b) de la misma forma pero a la inversa imágenes de estudios realizados por el Virginia Polytechnic Institute en la impresión de materiales piezoeléctricos con topologías complejas, con posibles aplicables en transductores de presión, recolección de energía, robótica, etc [71], [72].

Como se ha dejado intuir la clave del futuro de las tecnologías aditivas pasa por la capacidad de crear estructuras tridimensionales con múltiples materiales simultáneamente. Al igual que en los primeros días de la impresión en papel con las impresoras matriciales se pudieron imprimir puntos de color rojo, verde, azul y negro, pero solo un color a la vez, el avance vino cuando las impresoras podían mezclar estos colores básicos sobre la marcha con una precisión y resolución cada vez mayor. De la misma manera se pasó de un televisor en blanco y negro a uno capaz de combinar tres colores básicos y luego capaces de generar millones de tonalidades. La capacidad de co-fabricar piezas de materiales diferentes puede eliminar las dificultades y los límites del ensamblado tradicional y permitiéndonos crear objetos cada vez más complejos. Pero lo que convierte a la impresión multimaterial en algo apasionante es la capacidad de co-imprimir con varios materiales simultáneamente, diseñando con ellos nuevos y complejos meta-materiales como propiedades completamente novedosas y a voluntad, por ejemplo un material que pueda ser resistente, ligero, flexible, translucido, conductor etc., todo junto a la vez o que reúna estas propiedades de forma intensiva, es decir, se podría crear objetos que en un punto de la geometría el material sea

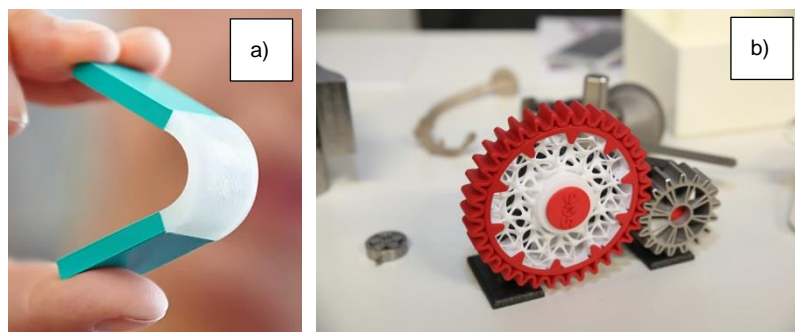


rígido y conductor, y en otro punto sea opaco y aislante o translucido y flexible. Una de las empresas pioneras en este campo es Objet ubicada cerca de Tel Aviv actualmente fusionada con Stratasys en cuyas oficinas investigan nuevas formas de combinar materiales.

Los científicos saben desde hace tiempo que la disposición de los átomos de un material a una influye en sus propiedades macroscópicas. Los antiguos herreros al enfriar bruscamente las espadas de metal forjado creaban pequeños cristales con muchos patrones aleatorios en vez de dejarlas recocer lentamente para obtener un acero blando, pues se sabe que los patrones aleatorios son más fuertes que los regulares, con los composites y al mezclar materiales siguiendo un orden, se ha podido explotar las propiedades de la anisotropía, en este aspecto la fabricación aditiva multimaterial rompe las barreras impuestas por las tecnologías tradicionales y abre un campo nuevo en la fabricación materiales con propiedades a voluntad situación hoy por hoy solo reservada a la madre naturaleza.

Teniendo en cuenta que al igual que un átomo es el elemento fundamental de la materia física, un píxel es una pieza constructora de una imagen, un bit es una unidad de información y un aminoácido es una pieza fundamental de la materia biológica, y a una escala mayor un vóxel es un elemento constructor de un objeto impreso (ver de la Figura 70 a la Figura 73), la capacidad de generar vóxeles de distintos materiales y propiedades, y la posibilidad de depositar estos de forma controlada, permitiendo así la construcción de objetos de formas ilimitadas constituidos por un número finito de éstos elementos discretos, dará origen a una evolución sin precedentes de algunos objetos cotidianos.

La idea fundamental de poder construir objetos compuestos por millones de vóxeles diminutos de una variedad finita de materiales, que colocados y combinados no aleatoriamente como puede ser en un sinterizado, sino de forma voluntaria es una idea muy poderosa que en apartados posteriores se aborda en más profundidad.



**Figura 36:** a) Pieza ejemplo fabricada aditivamente mediante la combinación de material flexible y rígido por cortesía de Arburg [73], b) Imagen ejemplo conceptual, aportado por la empresa EOS de un posible engranaje bimaterial con cuerpo de estructura lattice de color blanco y corona en rojo haciendo alusión a ser otro material [74].

### 1.4.3. Tecnologías de impresión 2D

La impresión como proceso, tradicionalmente ha sido un método destinado a reproducir textos e imagen clásicamente sobre papel. En su forma más antigua consiste en aplicar tinta a elementos móviles con relieve y estos por presión transferirlos al papel. Si bien en sus orígenes comenzó como un método artesanal con la xilografía en China hacia el año 220 d.C, su implantación supuso una revolución cultural para la humanidad tras la invención de la imprenta de tipos móviles de Gutenberg hacia 1440. Modernamente la evolución de la tecnología ha dado origen a diversos métodos de impresión los cuales son muy variados, así como sus resultados y materiales empleados. En este aspecto desde un punto de vista global o generalista es posible distinguir tres grandes grupos con necesidades, procesos y resultados muy diferentes: los artísticos y artesanales, de tirada reducida donde los patrones, imágenes o textos se graban sobre una superficie rígida que alojara la tinta y la transferirá al papel, tela u otro sustrato por presión, permitiendo repetir el proceso mecánicamente, en este grupo también se podrían incluir a la serigrafía y la litografía. Después tenemos el grupo de tecnologías digitales donde la reproducción se realiza desde un archivo informático, destinándose a usos domésticos y comerciales a pequeña escala, siendo la impresión por chorro de tinta y la impresión láser las tecnologías más habituales. Por último tenemos el grupo de las tecnologías industriales, para grandes cantidades: diarios, revistas, libros, afiches, envases, etiquetas y demás objetos en general de producción masiva. En este aspecto la serigrafía, la flexografía, el huecograbado y la impresión offset son algunos de sus máximos exponentes.

Así pues, desde la invención de la imprenta por Gutenberg en hasta hoy, las tecnologías de la impresión han evolucionado en gran medida sobre todo en los últimos dos decenios, pero la inercia evolutiva de este sector industrial ha se ha visto enormemente acelerada en esta última década, experimentado una segunda revolución. Desde avanzadas capacidades de las máquinas de impresión en donde la impresión digital con la tecnología Inkjet lidera gracias a su flexibilidad, permitiendo la impresión personalizada sobre cualquier sustrato, hasta el desarrollo de tinta versátiles y funcionales. En este aspecto y dejando al margen la decoración de productos, la impresión como concepto toma protagonismo como una de las técnicas más prometedoras y adecuadas de deposición de materiales frente a otras más caras y lentas, capaces de dotar a los productos de un mayor valor añadido.

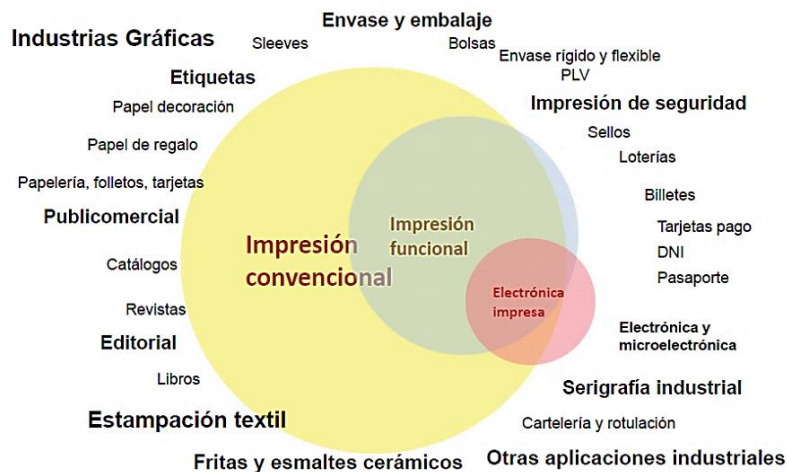
La expansión continúa de la tecnología de impresión comienza a dejar atrás el concepto de impresión como tal, definido como la reproducción de imágenes y textos sobre papel u otro sustrato en el momento en el que nos referimos a esta técnica como: "Impresión convencional", en la actualidad comienza a utilizarse el término "Impresión funcional" la cual como concepto antecede la función a la acción de reproducción (ver Figura 37). En este aspecto la impresión funcional es un término paraguas bajo el cual se puede colocar toda



aquella impresión que tenga una función, en ella se incluye la electrónica impresa (printing electronics) y la impresión 3D.

En la impresión funcional la meta es dotar de funcionalidad a lo que se produce, es por ello que bajo este concepto, la impresión 3D es una impresión funcional, pero no todas las impresiones en tres dimensiones son funcionales. En el caso de la electrónica impresa, se refiere a la impresión con tintas con funcionalidades ya sean conductoras, termocrómicas, electrocrómicas, electroluminiscentes, etc., que al ser depositadas de forma controlada y a voluntad reproduciendo algún tipo de patrón, constituyen un componente cuya función electrónica se antepone al hecho de su deposición.

Entre los muchos avances que han ocurrido dentro de la industria de la impresión se encuentra la capacidad de la sustancia impresa siendo esta en muchos casos la que realiza la función, como es la tinta que ilumina, la que conduce electricidad o la reacción ante un estímulo externo sean estos del tipo que este sean. Si bien, la iluminación y la electrónica distan de ser tecnologías novedosas si lo es la capacidad de ser imprimibles eficazmente, aunque una vez más como ya se ha comentado anteriormente son los materiales a depositar los que en la actualidad limitan y mantienen éstas tecnologías aditivas como promesas con el potencial de liderar la próxima ola en la producción, como por ejemplo en la electrónica de gran volumen. En la actualidad la impresión funcional es un campo muy, muy diverso con aplicaciones por descubrir, en el cual debido a su novedad, si bien existen centros de investigación y compañías aventajadas en la actualidad no existe verdaderos líderes establecidos como en otros campos más maduros.



**Figura 37:** Relación de los conceptos impresión convencional, impresión funcional y electrónica impresa en función de sus aplicaciones en el mercado y desde un punto bidimensional [Fuente: AIMPLAS (Instituto tecnológica del plástico)].

Por otro lado, las impresoras digitales destinadas al uso doméstico o comercial a pequeña escala, estrictamente han supuesto una evolución de las arcaicas máquinas de escribir, como dispositivo periférico del ordenador permite convertir información digital en una nube

de punto que al depositarlas sobre el papel reproduce gráficos, textos e imágenes. En la actualidad cuesta imaginar un mundo sin ellas, estando presente en todos los hogares y oficinas.

Centrándonos en éste grupo de tecnologías de impresión debido a su versatilidad y flexibilidad en la presente tesis como ya se ha comentado se busca y plantea dentro del paraguas de la impresión funcional combinar la impresión tridimensional con la electrónica impresa y como ya se ha comentado esta idea surge del desarrollo del proyecto Nhibrid32D. Con ello en definitiva se busca como se verá más adelante validar la posibilidad de dotar a los objetos reproducidos de nuevas funcionalidades que permitan una mayor interacción con el usuario, una interacción superior no limitada por los sentidos de éste, a través de la superficie del objeto, y todo ello bajo la premisa de incrementar el valor añadido a los productos impresos que justifiquen el elevado coste de los objetos fabricados aditivamente.

Siguiendo la estructura de este documento, a continuación se presenta una visión general de las tecnologías de impresión centrándonos en la importancia de la tecnología de impresión Inkjet como elementó clave en la industria actual, en donde en los últimos años han surgido nuevas aplicaciones cuyos retos y solicitudes, están acelerando ésta tecnología, justificando así justificando la intensa investigación por parte de diversos centros de I+D+i repartidos en todo el globo. Por último, se describe los principios básicos de la impresión Inkjet y se presentan algunas sus principales limitaciones, recalcando la importancia de los materiales y tintas a depositar sobre los distintos substratos.

#### 1.4.3.1. Clasificación de las impresoras

En general, las impresoras se pueden dividir en categorías atendiendo a diversos criterios, alguno de los cuales se enumeran a continuación, y siendo el más común según su tecnología de impresión.

- Tecnología de impresión.
- Formación de los caracteres.
- Método de transmisión.
- Método de impresión.
- Capacidad de impresión.
- Velocidad de impresión y calidad del impreso.

##### 1.4.3.1.1. Tecnología de impresión

Según la tecnología de impresión entre las impresoras de uso más comunes tenemos:

- **Impresoras de impacto:** las cuales se dividen a su vez en: Impresoras matriciales, Impresoras de margarita e Impresoras comerciales de rodillo: huecograbado o Gravure, litografía y la impresión offset.
- **Impresoras sin impacto:** abarcan todos los demás tipos de mecanismos de impresión, incluyendo: Impresoras de chorro continuo o de tecnología CIJ,

Impresoras de chorro de tinta por acción térmica (TIJ), Impresoras de chorro de tinta por piezoeléctricos (PIJ) e Impresoras láser.

#### 1.4.3.1.2. Formación de los caracteres

Atendiendo a este criterio tenemos:

- **Caracteres con trazo continuo:** los caracteres formados totalmente con trazo continuo (los producidos por una impresora de margarita, por ejemplo o los producidos por las impresoras de rodillos con fines comerciales).
- **Caracteres de puntos matriciales:** caracteres matriciales compuestos por patrones de puntos independientes (impresoras de Inkjet).

Técnicamente, las impresoras láser son matriciales, pero la nitidez de la impresión y el tamaño reducido de los puntos impresos con alta densidad, hace que puedan ser considerados sus trazos puedan ser considerados como caracteres continuos.

#### 1.4.3.1.3. Método de transmisión

Esta clasificación se refiere al medio utilizado para enviar los datos a la impresora (aplicable solo a impresoras digitales):

- **Paralelo:** transmisión byte a byte.
- **Serie:** transmisión bit a bit.

Muchas versiones de impresoras estaban disponibles en paralelo y en serie, e incluso incorporaban ambas opciones, aumentando la flexibilidad para instalarlas. Actualmente, la tendencia es a favor de la transmisión inalámbrica Wireless, por bluetooth o en serie, a través del estándar USB.

#### 1.4.3.1.4. Método de impresión

**Carácter a carácter:** las impresoras de caracteres son las impresoras de tipo: Matriciales, de margarita, de inyección de tinta (PIJ, TIJ).

**Línea a línea:** se utilizan frecuentemente en grandes instalaciones, por ejemplo entornos industriales.

**Página a página:** entre las impresoras de páginas se encuentran las electrofotográficas, como las impresoras láser, así como las impresoras de contacto.

#### 1.4.3.1.5. Capacidad de impresión

**Solo texto:** la mayoría de las hoy arcaicas impresoras de margarita y de bola, pueden imprimir solamente textos, aunque también existen impresoras matriciales y láser que imprimen solamente caracteres.

**Texto y gráficos:** Las impresoras de textos y gráficos, reproducen todo tipo de imágenes dibujándolas como patrones de puntos, siendo común en todos los sistemas de impresión domésticos, ya sean estos matriciales (hoy obsoletos), de inyección de tinta cualquiera que sea la tecnología que esta utilice como las impresoras láser.

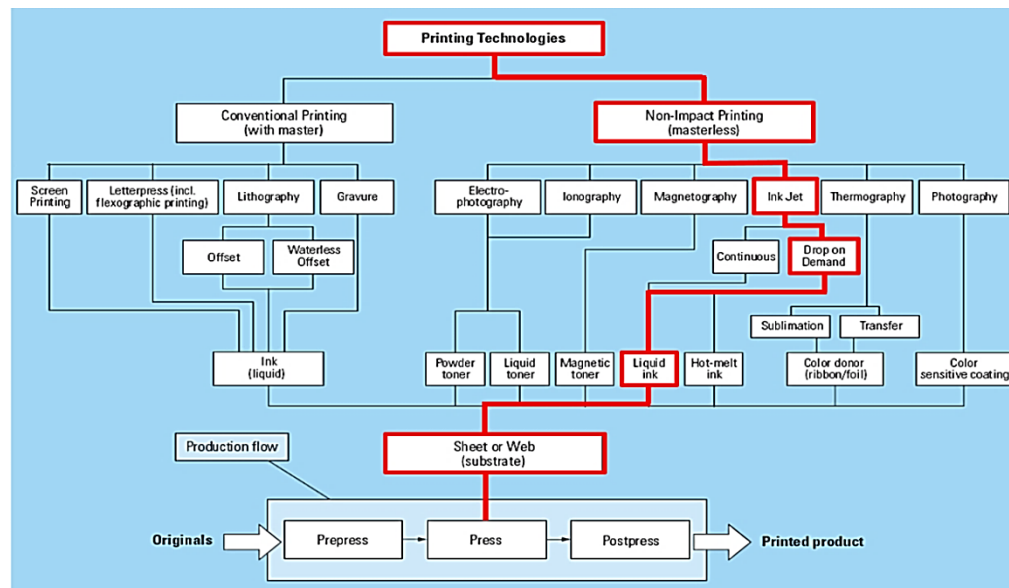
#### 1.4.3.1.6. Velocidad de impresión y calidad del impreso

Los distintos tipos de impresoras también se diferencian en la velocidad de impresión y en la calidad del producto impreso.

Las impresoras de caracteres, como las matriciales, pueden imprimir en un rango de velocidad entre 200 y 400 caracteres por segundo (cps), que supone de 90 a 180 líneas por minuto (lpm). Las impresoras de línea presentan un amplio rango de velocidades, desde 400 a 2000 líneas por minuto. La velocidad de las impresoras de página oscila entre 4 y 800 páginas por minuto (ppm) para impresiones en blanco y negro, y una décima parte para la impresión en color.

En entornos de oficinas en los que se empleen formularios en papel continuo o de varias hojas de papel continuo, es común ver aun impresoras de puntos. En cambio en lugares donde se requiera mayor calidad de impresión la más utilizada es la impresora láser. En cuanto a las impresoras de inyección de tinta debido a su reducido coste y gran calidad de impresión son las preferidas en los entornos domésticos siendo las más utilizadas como ya se ha comentado las de tecnologías TIJ. Por otro lado se ha de decir que, en la actualidad y desde hace ya tiempo, muchos centros de investigación y universidades sobre todo en Estados Unidos, Japón, Corea, Inglaterra y Alemania están apostando por la tecnología de impresión Inkjet DOD, sobretodo son utilizadas en ámbitos distintos a los convencionales sobre papel, como pueden ser; sobre textiles, sustratos cerámicos, etc., por otro lado, estos sistemas debido a su versatilidad pueden ser utilizados en la deposición de materiales poliméricos, conductores, biológicos, etc., en la reproducción circuitos electrónicos, RFID's, pantallas flexibles, sensores químicos y biológicas entre otras muchas aplicaciones. Básicamente se podría decir, que la tecnología de inyección de tinta puede ser utilizada en la mayoría de aplicaciones que involucren la reproducción de archivos digitales mediante la deposición de gotas sin contacto con el sustrato, en este aspecto y dentro de esta tecnología los sistemas PIJ a su vez ofrecen una menor restricción en cuanto a materiales a depositar siendo más flexibles, es por ello su proliferación en la impresión funcional.

En la imagen de a continuación (ver Figura 38), se muestra una clasificación general de los procesos de impresión bidimensionales ya sean estos destinados a un uso doméstico, en oficina o con fines comerciales. Por otra parte, en rojo se encuentra resaltado la ubicación de la tecnología de impresión 2D utilizada en la presente tesis dentro del esquema o la clasificación presentada, en la cual si extendemos ésta introduciendo el concepto de la impresión funcional su amplitud y complejidad de vería incrementada.



**Figura 38:** Clasificación de los procesos de Impresión bidimensionales y esquema del proceso en función de la tecnología aplicada [75].

#### 1.4.3.2. Reseña histórica de la tecnología Inkjet

En la actualidad una gran parte de la industria utiliza técnicas de deposición tradicionales las cuales requieren de herramientas intermedias y de contacto directo de estas con el sustrato, siendo éstas útiles para grandes volúmenes, pero caras e ineficiente en series cortas ofreciendo cierta rigidez, en la personalización de productos. En este aspecto la tecnología Inkjet, al ser una tecnología de deposición discreta y sin impacto, permite la fabricación digital y donde los carros de impresión no entran en contacto con el sustrato, ofreciendo una mayor flexibilidad y versatilidad.

La impresión Inkjet se presenta como una de las técnicas de impresión más prometedoras en un mundo donde la tendencia es la llegar a la producción masiva personalizada. Hoy en día nos encontramos familiarizados al uso de impresoras digitales ya sean domesticas o industriales las cuales han transformado nuestra habilidad de reproducir textos, coloridos gráficos y fotografías. Ésta capacidad ha sido alcanzada gracias a la contribución de especialistas en múltiples disciplinas, las cuales desde un punto de vista generalista podemos decir que se fundamenta en la mecánica, electrónica y en la química de las tintas o materiales.

Desde un punto de vista cronológico el concepto de impresión digital se origina en el siglo XX, donde la primera impresora en 2D data la de década de 1940 aproximadamente, junto con la creación de la primera computadora de la historia, la máquina analítica de Charles Babbage, aunque esta máquina no llegó a construirse hasta mucho tiempo después y fue presentada al público por primera vez en el 2000 en el museo de ciencias de Londres. Paralelamente a este hecho, en 1938 Chester Carlson (fundador de Xerox) inventó el

proceso de reproducción de imágenes y textos a través de la electrofotografía [76], base de las fotocopiadoras. Posteriormente en la década de 1950 y 1960 aparece la primera impresora de alta velocidad en 1953 de la mano de Remington-Rand la llamada UNIVAC High Speed Printer, para ser utilizada por el primer ordenador comercial fabricado en EEUU el UNIVAC. Esta primera impresora eléctrica para computadoras por otro lado, solo era capaz de reproducir textos mediante la impresión de caracteres.

Las impresoras evolucionaron paralelamente al avance de la propia computación. De la misma forma que fueron surgiendo ordenadores destinados a diferentes usos, también se crearon impresoras destinadas a fines específicos. Así pues pocos años después en 1957 IBM desarrolla y comercializa la impresión por matriz de puntos. En 1959 Xerox fabrica la fotocopiadora, en 1968 aparece la primera mini-impresora de la mano de la hoy EPSON la cual fue incorporada en muchas calculadoras. Para 1973 aparece la primera fotocopiadora a color, fabricada por Canon. En 1976 se comienza a desarrollar la tecnología Inkjet de la mano de Hewlett-Packard pero ésta no se comercializó hasta 1984. En 1978 se comercializa la impresora de margarita, que únicamente podía escribir letras y números, pero tenía la calidad de una máquina de escribir y finalmente en 1980 aparecen las primeras impresoras láser en blanco y negro. 8 años más tarde le implementan la modalidad de color, a partir de este punto las impresoras han evolucionado rápidamente mejorando en velocidad, calidad, resolución y eficiencia.

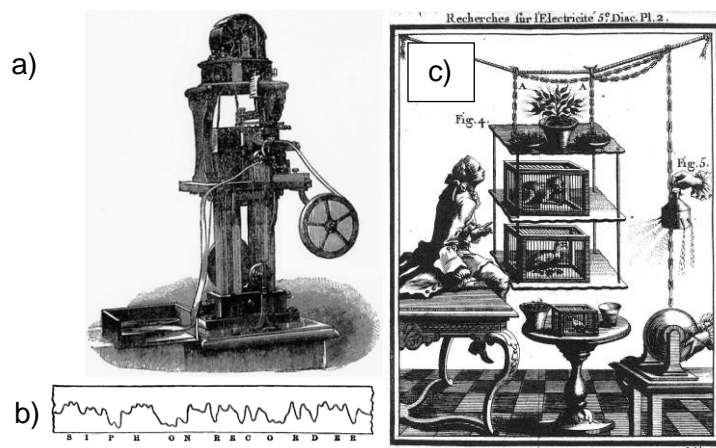
Así pues, a modo de resumen podemos decir que la impresión digital tuvo sus inicios de mano de la computación en la década de los cuarenta. La impresión Inkjet una técnica más evolucionada se origina a finales de la década de los setenta del pasado siglo y desde entonces muchos dispositivos de inyección de tinta han visto la luz.

### **Sentando las bases de la técnica.**

El primer dispositivo de reproducción de patrones mediante deposición de tinta como tal, fue inventado por William Thomson, posteriormente Lord Kelvin, mediante el uso de fuerzas electroestáticas en 1858. Este dispositivo reproductor llamado Siphon recorder (ver Figura 39), fue utilizado para transmitir débiles señales eléctricas mediante una deposición continua de tinta sobre una cinta de papel móvil con la cual el operador podía interpretar mensajes transmitidos a través de un tendido eléctrico. Este aparato fue posteriormente utilizado como grabador automático de mensajes del telégrafo en 1867 (Patente del Reino Unido 2147/1867). Aunque los primeros experimentos sobre la manipulación de una corriente de gotitas se remonta incluso al año 1749, año donde Abbé Nollet publicó su investigaciones sobre los efectos de la electricidad estática en una corriente gotas [76], [77].

Desde el punto de vista general en un marco teórico, el aparato matemático y las leyes físicas que Newton estableció, fueron, y siguen siendo, los fundamentos en los que se sustenta esta técnica de impresión. En este aspecto, a principios del siglo XIX de la mano del físico e ingeniero francés Claude Navier se formula la teoría general de la elasticidad

(1821) y se constituyen las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos no compresibles en 1822 [78], ochenta años antes el matemático y físico suizo Daniel Bernoulli en 1738 publica su obra *Hydrodynamica*, en la que expone lo que más tarde sería conocido como el Principio de Bernoulli, describiendo el comportamiento de un fluido al moverse a lo largo de un conducto cerrado en 1755, más tarde su colega y también suizo, el matemático y físico Leonhard Euler sentaba los principios del movimiento de los fluidos ideales no viscosos en 1755 [79], y posteriormente George Stokes realiza importantes contribuciones en el entendimiento del comportamiento de los fluidos viscosos en 1845 [80] de ahí el nombre de las ecuaciones de Navier-Stokes con las cuales se establece de la mecánica clásica de medios continuos bajo el supuesto de que los esfuerzos tangenciales guardan una proporción lineal con la velocidad de deformación (fluidos newtonianos), de esta forma se sentaron las bases de la hidrodinámica (ver Figura 39).

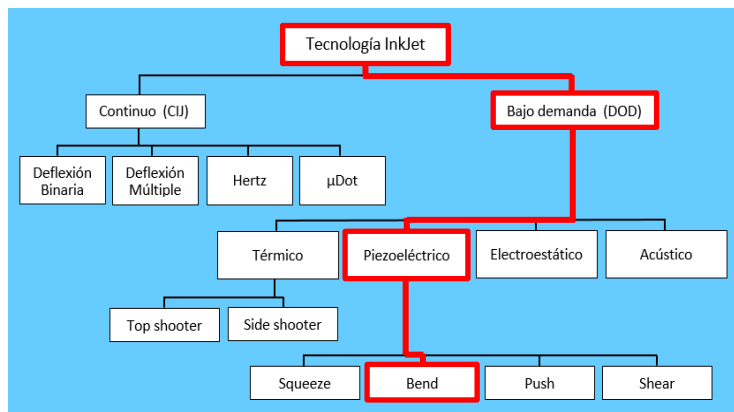


**Figura 39:** Primer dispositivo reproductor a través de un sistema Inkjet continuo (*Siphon recorder* de William Thomson in 1858 (UK Patent 2147/1867) a), Imagen impresa sobre la cinta móvil de papel por el *Siphon recorder* [81] b), Ilustración del dispositivo de Abbé Nollet con los cuales se llevó a cabo los primeros estudios sobre los efectos de la electricidad estática sobre chorros fluidos en 1749 c) [76].

Los pilares en los que se fundamentan la impresión por chorro de tinta fueron establecidos tras el estudio de la fenomenología asociada a la formación de las gotas, Savart en 1833 fue el primero en analizar la ruptura de los chorros libres [82], sus resultados fueron utilizados por múltiples investigadores posteriores los cuales verificaron y propusieron modelos que explicaban dicho comportamiento, el físico Belga Joseph Plateau (1873) fue uno de ellos [83], al cual se le atribuye la incorporación de la energía superficial a la modelización del fenómeno como fuerza motriz de la ruptura de los chorros en gotas. Ésta aportación sentó las bases de la teoría de las inestabilidades en chorros introducida por Lord Rayleigh en 1878 [84]. Sin embargo, tuvieron que pasar muchas décadas hasta que los principios físicos que describen la formación de las gotas pudiesen ser aplicados en dispositivos y más aún dispositivos comerciales en capaces reproducir imágenes, gráficos y textos bajo estos

fundamentos como ya se ha podido apreciar con anterioridad. En relación a éste hecho en 1948 Rune Elmqvist desarrollo el primer reproductor de inyección de tinta continua basada en los principios físico establecidos por Rayleigh, mientras trabajaba en Elema-Schönander posteriormente llamada Siemens-Elma, llamándose mingograph (US Patent 2.566.433) [85], en realidad fue un aparato capaz de registrar la actividad eléctrica del corazón durante un período de tiempo utilizando electrodos colocados sobre la piel, lanzándose en 1952 hoy en día se le conoce como electrocardiografía (ECG).

A principios de la década de 1960 el Dr. Sweet de la Universidad de Stanford demostró que, mediante la aplicación de un patrón de ondas de presión sobre un orificio, producía que el flujo de tinta se dividiera en gotas espaciadas y de tamaño uniforme [86], cuando el mecanismo de ruptura de las gotas se controlaba, éstas, las gotas podían ser cargadas estáticamente de forma selectiva, las cuales podían ser desviadas al pasar por un campo eléctrico y de esta forma ser depositadas de manera fiable sobre un sustrato y donde formar una imagen. Posteriormente a este proceso se le añadió el hecho de que las gotas no cargadas podían ser capturadas por una especie de canal y reutilizadas por el sistema. Este proceso de impresión se conoce hoy en día como impresión por chorro de tinta continua o Continuous Inkjet printing process (CIJ), la patente posterior presentada en 1974 [87] hacen referencia a las aportaciones previas del Dr. Sweet en su patent US 3.596.275 cuyo primer dispositivo Oscilográfico Inkjet fue elaborado por el Instituto de Investigación de Stanford (SRI) con el objetivo de imprimir códigos de barras. La empresa A. B. Dick adapto la invención del Dr. Sweet pudiendo reproducir caracteres lo que en 1968 se convirtió en la primera impresora comercial CIJ, la Videojet 9600.

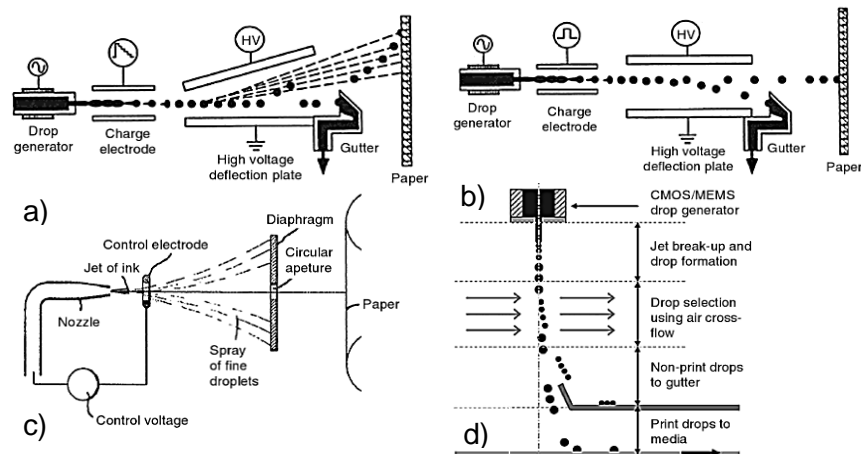


**Figura 40:** Clasificación de las tecnologías de impresión sin impacto, por chorro de tinta  
(Fuente: Adaptado de [85]).

La deflexión o desviación binaria fue evolucionando no solo para la impresión de códigos de barras sino también con otros fines con la llegada de la Impresora de tecnología DIJIT introducida por la compañía Mead en 1973. A partir de este punto gracias a los grandes esfuerzos de IBM en la década de los 70's estas tecnologías sufren un importante impulso que se materializo en la impresora IBM 6640 en 1976 siendo una de las primera impresora



de chorro de tinta de oficina del mundo [88] utilizando en esta la tecnología de deflexión múltiple [89]. Durante ese mismo periodo a principio de los años setenta el profesor de física Hellmuth Hertz de la universidad de tecnológica sueca de Lund y sus asociados, desarrollaron una tecnología a través de la cual permitía a las impresoras Inkjet generar una escala de grises variando el número de gotas por píxel, este principio fue adoptado por empresa como Iris Graphics, Applicon y Stork para reproducir imágenes de alta calidad en color para preimpresión, en este aspecto Applicon introdujo la primera impresora a color de tecnología Inkjet continua basada en los principios de Hertz en el 1977 posteriormente en 1989 Iris Graphics introdujo al mercado la impresora de gran formato Iris 3047 [89]. En cuanto a la tecnología de impresión de chorro de tinta continua Microdot, fue patentada por Hitachi en 1988, siendo una tecnología capaz de eyectar gotas de distinto tamaño por un mismo orificio de modo que con el objetivo de generar imágenes de alta calidad solo eran empleadas las de menor tamaño, fue una tecnología que no llegó a comercializarse.

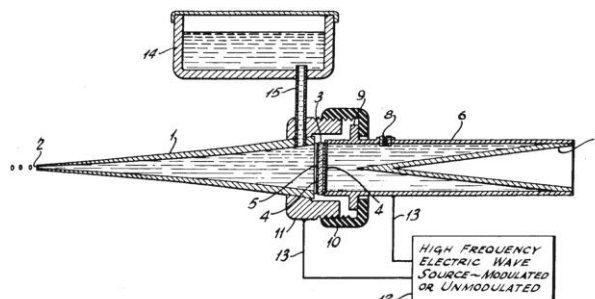


**Figura 41:** Eyectores continuos de chorro de tinta, tecnologías CIJ: (a) Sistema de deflexión de carga múltiple, (b) deflexión binaria de la carga, (c) Desviación de la carga de Hertz, (d) deflexión por flujo de aire [89].

Paralelamente al desarrollo de la tecnología CIJ como ha venido exponiendo, se llevaba a cabo el desarrollo de una tecnología totalmente diferente, la cual en vez de producir gotas de forma continua depositando selectivamente alguna de ellas sobre el sustrato, esta tecnología se fundamenta en la capacidad de generar gotas a voluntad siendo cada una de estas depositadas sobre el sustrato, a esta tecnología se le conoce como “drop on demand” (DOD) cuyas principales ventajas radica en el hecho de no requerir recirculación, ni sistemas complejos de sincronización entre el sistema de ruptura de los chorros con los de carga y de deflexión mediante circuitos electrónicos complejos.

El desarrollo de la tecnología drop on demand comienza a finales de 1940 con C.W. Hansell de la Radio Corporation of America (RCA) como pionero, e inventor del primer dispositivo de inyección de tinta piezo drop-on-demand (ver Figura 42). Utilizando un disco piezoeléctrico

con el cual generar ondas de presión las gotas eran expulsadas a través de un orificio. Sin embargo esta invención destinada a ser utilizada como mecanismo de escritura en un facsímil no llegó a desarrollarse como producto comercial [90].



**Figura 42:** Dibujo del primer dispositivo de inyección de tinta piezo drop-on-demand patentado en 1950 (US Patent 2.512.743). Donde el disco piezoeléctrico (5) genera ondas de presión en el cono sólido (1), que causan la eyección de gotas de tinta desde la boquilla (2) [91].

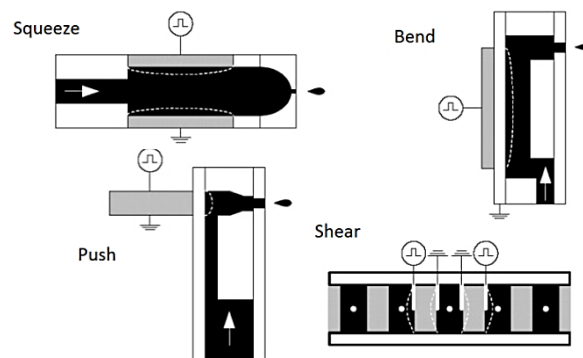
Dejando al margen la invención de Hansell, la primera tecnología DOD aparece mediante la tecnología de tracción electroestática en los años 60's, en donde una tinta conductora retenida en un depósito de presión negativa al aplicarle una alto voltaje fuera del nozzle, ésta era eyectada fuera de éste para después ser dirigida mediante un campo eléctrico al sustrato. Entre las empresas que desarrollaron dispositivos mediante esta tecnología se encuentran Teletype (Inktronic finales de 1960), Casio (Typuter modelo 500 de 1971) y Paillard Company. Por otro lado, el principio de la tracción electroestática DOD fue abandonado en los años siguientes debido a la mala calidad de impresión y fiabilidad, aunque las actividades de investigación continúa hasta hoy [92].

Por otra parte, las bases de la tecnología de inyección de tinta DOD por piezoeléctricos en general se atribuyen a tres patentes en la década de 1970, cuyo denominador común es el uso de una unidad piezoeléctrica la cual convierte una señal eléctrica en una deformación mecánica de la cámara que contiene a la tinta. La primera de estas patentes es la de S. Zoltan de la empresa Clevite en 1972 (US Patent 3.683.212) proponiendo el modo conocido hoy en día como Squeeze [93] (ver Figura 43). Bajo esta tecnología la primera impresora en salir al mercado fue en 1977 de la mano de Siemens, el modelo PT-80 fue capaz de imprimir 270 caracteres por segundo con una resolución de 120 dpi mediante un cabezal de 12 Nozzles.

La segunda de las patentes pioneras fue la Erik Stemme de la Universidad Chalmers en 1973 (US Patent 3.747.120 A) proponiendo el método conocido hoy en día como Bend [94]. En cuanto a la tercera de éstas tres patentes relativamente contemporáneas se encuentra la de Kyser y Sears de la empresa Silonics en 1976 (US Patent 3.946.398) [95] la cual también desarrolla el sistema Bend con ligeras diferencia en la forma respecto al de Stemme. Por otro lado, después de Siemens, Silonics fue la segunda compañía en introducir al mercado

una impresora DOD por piezoeléctricos, la Quietype en 1978, la cual utilizaba el sistema Bend patentado por Kyser con un voltaje requerido de 150V y frecuencia máxima de tiro de 3KHz.

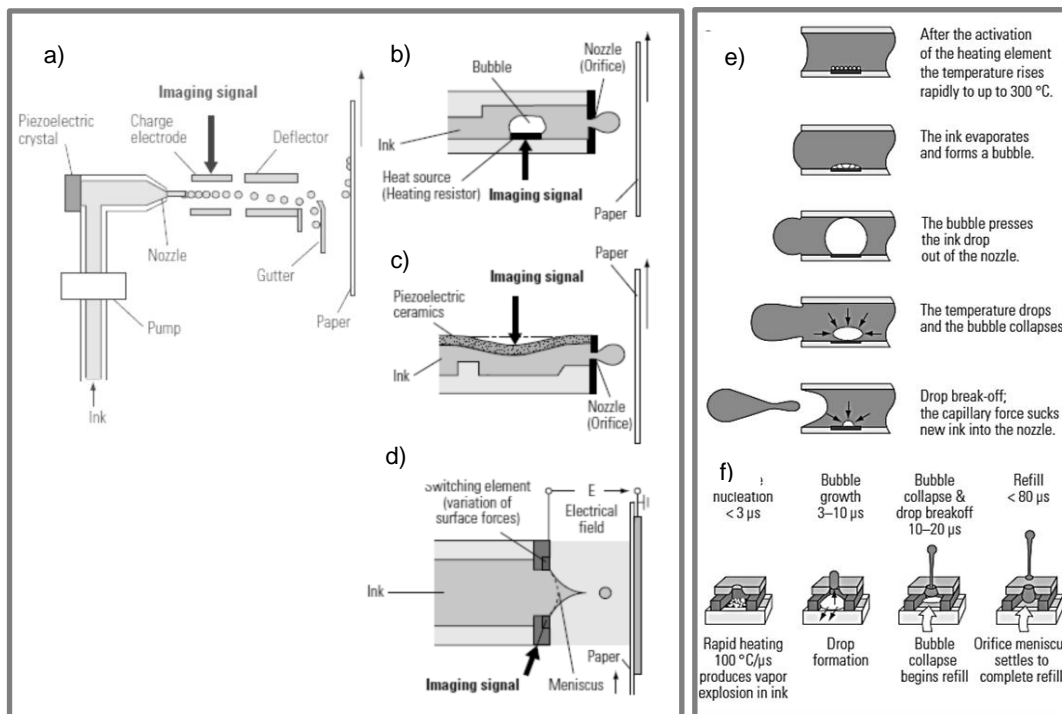
Posteriormente, la patente de Stuart Howkins (US Patent 4.459.601) de la empresa Exxon en 1984, describe el modo Push. Y finalmente en la patente de Fischbeck (US Patent 4.584.590) propuso el modo de Shear [96]. Estos modos o configuraciones del actuador piezoeléctrico completan los tipos de sistemas de impresión DOD por piezoeléctricos utilizados en la actualidad, los cuales puedes apreciarse de forma esquemática en la figura de a continuación:



**Figura 43:** Clasificación de los distintos modos en los que se lleva a cabo la eyección dentro de los sistemas de impresión digital DOD por piezoeléctricos [97].

De modo que, hasta ahora se ha abarcado en las tecnologías DOD, los sistemas piezoeléctricos y electroestáticos. En cuanto a los sistemas térmicos, son consecuencia de empresa Sperry Rand quienes en la década de los 60's idearon una nueva técnica de eyección de gotas de tinta basadas en la vaporización casi espontánea de una fracción del volumen de ésta. La capacidad de este principio pasó un tiempo inadvertido no llegando a comercializarse, posteriormente la idea fue abandonada a finales de los 70's cuando Canon y Hewlett Packard (HP) la retomaron.

En 1979 Endo y Hara de la empresa Canon reinventaron la tecnología de impresión DOD mediante cabezales de impresión accionados por una burbuja de vapor, tecnología que llamaron Bubblejet, lanzando su primera impresora al mercado con esta tecnología en 1981. Durante el mismo período, paralelamente HP desarrolló su tecnología térmica de inyección de tinta que llevaría a la comercialización de la primera impresora de tinta DOD de bajo coste en 1984 (HP ThInkjet) lo que supuso todo un hito como ya se ha comentado previamente. Puesto que ambas compañías trabajaron al mismo tiempo en una tecnología similar desconociendo uno el trabajo del otro a ambas compañías se le atribuye la invención de esta tecnología.



**Figura 44:** Resumen de los sistemas de impresión digital: (a) Sistema Inkjet continuo o CIJ, (b) Sistema Canon Bubblejet (TIJ), (c) Sistema por piezoeléctricos (PIJ), y proceso de generación de gotas por tracción electrostática (d). Principio de formación de las burbujas eyectoras de Canon (e), Secuencia de formación de las gotas en un sistema HP (f) [75].

Con la invención de la tecnología de inyección térmica de tinta o TIJ (Termal Ink Jet) se redujo significativamente el desarrollo de la tecnología PIJ (por piezoeléctricos), la miniaturización de los sistemas ya no suponía un cuello de botella puesto que el actuador pasaba a ser una simple resistencia más simple, barata y pequeña.

Con el desarrollo de las tecnologías de los circuitos integrados, el coste por nozzle disminuyó notablemente, a finales del siglo XX los seres humanos experimentamos un cambio de paradigma debido a la revolución informática e internet y las impresoras de tinta crecieron en popularidad junto con los ordenadores. Hoy en día hay una impresora de tinta junto a cada ordenador de sobremesa en casi todos los hogares.

Aproximadamente tres cuartas partes de todas las impresoras de inyección de tinta son impresoras térmicas de inyección de tinta (TIJ), lo que hace que la tecnología térmica sea comercialmente superior a sus rivales. Actualmente entre los máximos exponentes de la tecnología de TIJ se encuentran HP, Canon, Lexmark, Memjet, Olivetti, Kodak, Xerox y Océ en equipos de amplio formato entre otras.

A partir del cambio de milenio las aplicaciones de la tecnología de inyección de tinta en la micromanufactura fue ampliamente estudiada y las aplicaciones de esta tecnología de impresión se expandieron a la manufactura. Reemplazando las tintas por un material líquido con un fin específico y adaptado a las condiciones de éstos para su eyectabilidad nuevas

aplicaciones fueron descubiertas para estas tecnologías de deposición. Sin embargo, la tecnología TIJ, puesto que se fundamenta en la acción térmica de la resistencia en su interior, limita los materiales utilizables, cosa que dio origen al resurgimiento de la tecnología por piezoeléctricos (PIJ) la cual a día de hoy domina el mercado de la micromanufactura [90].

Así pues, tras el rotundo éxito de los sistemas TIJ solo algunas compañías continuaron investigando en la entonces desplazada tecnología PIJ, en 1984 nuevas iniciativas fueron tomadas en los sistemas push por Howtek y Exxon, más tarde adquirida por Dataproducts hoy Hitachi, desde entonces otras empresas ha utilizado esta tecnología como son Trident, Brother y Epson entre otras [91]. En cuanto al modo bend es utilizado por Tektronix (adquirida por Xerox), Brother, Kyocera, Dimatix (adquirida por Fujifilm) entre otros. En cuanto al modo shear entró en el mercado en 1984 de la mano de Spectra, tecnología que explotó Xerox y más tarde Brother, posteriormente Spectra fue adquirido por Markem más adelante por Dimatix que hoy pertenece a Fujifilm [98]. Éste sistema de impresión DOD por piezoeléctrico también es utilizado por Xaar empresa fundada por investigadores de Cambridge en 1990 [99] y por Kodak, Toshiba, TEC y Microfab, entre otros.

En la actualidad, las tecnologías digitales de impresión se encuentran dominadas por las tecnologías CIJ y DOD, dentro de esta última tanto la tecnología TIJ como la PIJ se han convertido en las dos más importantes tecnologías a la hora de imprimir. Aunque si bien la TIJ domina el mercado sus ventajas principales se han estabilizado en los últimos años gracias a un mayor desarrollo de la tecnología PIJ, cuya fortaleza radica en su capacidad de depositar una mayor variedad de materiales. Por otro lado, varias ventajas adicionales pueden ser mencionadas de éstas tecnologías, como por ejemplo; por su carácter bajo demanda implica una reproducción más flexible, al ser una tecnología aditiva reduce los residuos y al no estar en contacto con el sustrato ni requerir de recirculación de tinta hace a de estos sistemas una tecnología muy versátil.

La importancia de los sistemas de impresión digital basados en la tecnología PIJ puede ser ilustrada mediante algunas de sus variadas aplicaciones, por ejemplo:

**Aplicaciones Gráficas:** probablemente unos de los campos más importantes y el primero, presente en una enorme cantidad de impresoras domesticas de oficinas o comerciales de pequeña escala, en este aspecto se puede hacer una subdivisión de acuerdo con el tipo de tinta utilizada; en base acuosa, fusión en caliente (hot-melt), curables por radiación UV, etc., de acuerdo al sustrato como por ejemplo; papel, textil, alimentos, etc., y por ultimo de acuerdo al tamaño de la impresión por ejemplo las impresoras de escritorio o de gran formato.

**Electrónica impresa:** si bien en alguno de los campos anteriores la tecnología TIJ domina, en general se utilizan sistemas PIJ en aquellas aplicaciones donde los materiales y la precisión de la deposición de éstos se encuentran limitados por la tecnología anterior, éste

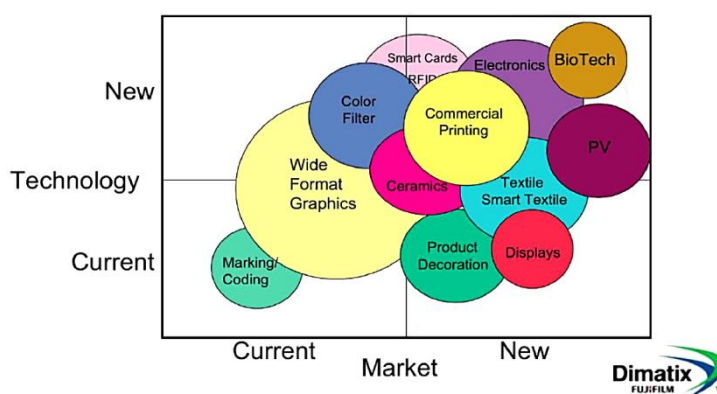
suele ser el caso en las aplicaciones electrónicas. Hoy en día la tecnología PIJ puede verse empleada en la fabricación de pantallas planas de cristal líquido (LCD), en pantallas flexibles a base de polímeros emisores de luz (PLED), o más recientemente en pantallas a base de tinta orgánica (OLED) [100], [101]. También puede utilizarse en la deposición de tintas conductoras sobre sustratos rígidos: placas de circuito impreso (PCB), dispositivos de radio frecuencia (RFID) y otros productos electrónicos como antenas, y sensores, así como también en la fabricación de células fotovoltaicas, células de combustible y baterías [102], [103], [104], [105], [106].

**Aplicaciones en el campo de la biotecnología y de la química:** la capacidad de depositar materiales con velocidad, precisión y repetitividad de estos sistemas así como con reducidas limitaciones en cuanto a materiales, sustratos y capacidad esterilización, han hecho que éstos sistemas de impresión se expandan rápidamente en este campo, la dispensación de células, proteínas y fármacos incluso sobre tejidos vivos son algunas de sus aplicaciones actuales [107], [108], [109].

**Aplicaciones en el campo de la óptica:** el uso de polímeros curable por radiación UV ha abierto un campo en la fabricación de micro lentes utilizados en dispositivo colimantes de fibra óptica en sistemas médicos [110],[111].

**Aplicaciones mecánicas:** en este campo abarcamos la impresión 3D, en donde ésta tecnología es reclamada como herramienta para la creación de prototipos y fabricación de piezas funcionales de baja tirada y alto nivel de personalización [112], [113], [114].

A la luz de la rápida evolución de estas tecnologías y de las expectativas que están generando, se espera que ésta prometedora tecnología incremente su protagonismo estableciéndose como una herramienta capaz de aportar flexibilidad en un mundo digital que tiende a la hoy utópica personalización en masa.



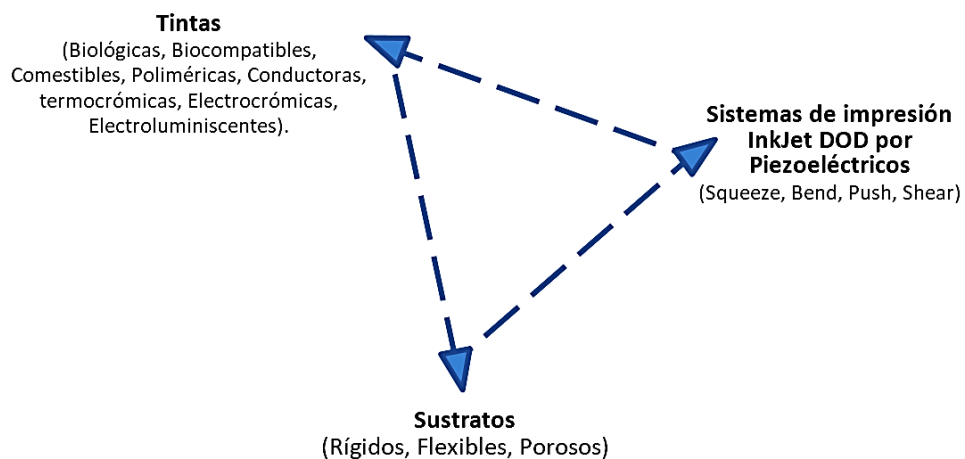
**Figura 45:** Algunas de las aplicaciones actuales de las tecnologías de impresión digital DOD por piezoeléctricos [115].

En los últimos años con la aparición del concepto de la impresión funcional y en concreto la impresión tridimensional como ya se ha comentado ha atraído la atención del público, en

este ámbito llamémosle de aplicaciones mecánicas, se ha fundamentado en su capacidad de reproducir objetos físicos en 3D complejos y únicos, ya sea estéticos o funcionales. De modo que, siguiendo la secuencia evolutiva de éstas tecnologías ahora en éste campo de aplicación, desde 1993 y de la mano del MIT se comenzó a utilizar los sistemas de impresión Inkjet en la reproducción de objeto tridimensionales (tecnología 3DP, mediante sistemas TIJ) como ya se ha comentado, posteriormente en 1996 comienza a comercializarse la tecnología Multijet (MJP) de la mano de 3D System con tecnología PIJ, en el 2000 aparece la tecnología Polyjet comercializada por los israelitas de Objet Geometries y en octubre de 2014 se anuncia la tecnología "Multi Jet Fusion" para uso industrial por HP la cual utiliza sistemas TIJ. Recientemente por otro lado, se ha hecho público una nueva tecnología desarrollada por la startup israelí XJET constituida por parte del equipo original de Objet, mostrada por primera vez en Europa en la exposición de Frankfurt Formnext el 15 de noviembre del 2016 esta tecnología utiliza sistemas Inkjet capaces de reproducir piezas tridimensionales metálicas.

#### 1.4.3.3. Principios de impresión, tecnología Inkjet DOD por piezoeléctricos

Desde un punto de vista general, todo sistema de impresión sin impacto y en concreto los Inkjet DOD (drop on demand) por piezoeléctricos (Tecnología PIJ) están constituidos por tres elementos los cuales se ven relacionados en un único dispositivo capaz de reproducir la información digital. Estos elementos son: los sistemas de impresión (cabezal, cartuchos y sistemas de posicionamiento), los materiales a depositar (tintas) y los sustratos (papel, plásticos, metales, cerámicas, telas, etc.).



**Figura 46:** Elementos constituyentes de todo sistema de impresión de tecnología PIJ

[Fuente: elaboración propia].

Así pues, la tecnología PIJ se fundamenta en la deposición controlada de gotas eyectadas desde un cabezal accionado por piezoeléctricos, dichas gotas de tinta se depositan sobre un sustrato afín de reproducir líneas y patrones, que a su vez constituyen las imágenes

digitales recibidas por el sistema. Como ya se ha comentado estos sistemas se caracterizan por su versatilidad, ofreciendo bajas restricciones en cuanto a materiales y muy bajas en cuanto a sustratos en donde éstos se depositan, ofreciendo a su vez un elevado compromiso entre confiabilidad, velocidad y resolución a costes de operación muy bajos, lo que los hacen sistemas muy flexibles y adaptables a múltiples campos como anteriormente hemos podido apreciar.

En capítulos siguientes se podrá apreciar que se aborda en profundidad el funcionamiento de un sistema de impresión de tecnología DOD accionado por piezoeléctricos, en concreto se muestra una adaptación de esta tecnología con el fin de reproducir pistas conductoras es decir, circuitos de conexión eléctricos, con la particularidad de que éstos circuitos estarán inmersos en el interior de una estructura tridimensional, fabricada aditivamente por tecnología DLP. Como se podrá apreciar en el capítulo 2 a fin de comprender y controlar un sistema de impresión Inkjet de tecnología PIJ, se ha considerado oportuno dividir el proceso de reproducción en las siguientes etapas:

1. **Eyección de gotas:** en donde se aborda toda la fenomenología asociada al proceso de generación de las gotas en el interior de los cabezales o cartuchos según sea el caso. Haciendo uso de la acústica, la mecánica de fluidos, la termodinámica, la resistencia de materiales y la electrotecnia, se establecen y analizan los parámetros de control con los cuales se ha adaptado el funcionamiento de un cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 a las características reológicas de las tintas eyectadas.
2. **Trayectoria de las gotas una vez eyectadas:** en esta segunda etapa se modeliza la trayectoria que realizan las gotas una vez eyectadas, teniendo en cuenta que éstas se reconfiguran a una forma esférica mientras realizan un tiro parabólico consecuencia del desplazamiento del cabezal de impresión. Debido a que en los sistemas DOD como su nombre lo indica, las gotas son generadas a voluntad, constituyendo volúmenes discretos de tinta y éstos a su vez ha de ser depositadas de forma precisa sobre el sustrato cualquiera que sea este y es en ello donde radica, la importancia de dicha modelización.
3. **Interacción gotas sustrato:** en esta tercera etapa del proceso de impresión se aborda toda la fenomenología y mecanismos involucrados en el proceso de impacto y posterior interacción de las gotas con el sustrato, estableciéndose así las condiciones de funcionamiento necesarias del sistema Inkjet afín de reproducir los patrones, cordones o pistas continuas mediante la deposición controlada de gotas adyacentes y secuenciadas sobre el sustrato, teniendo en cuenta la reología de la tinta, el drop spacing, la velocidad de deposición así como también la naturaleza y afinidad de las gotas con el sustrato.
4. **Solidificación de las gotas y formación del depósito:** por último en esta cuarta etapa se abordan la formación de los depósitos, nombre que se le da al material adherido al sustrato tras el cambio de fase de las tintas.

Por otro lado, el control y la secuenciación de estas cuatro etapas dan origen a la reproducción de pistas eléctricamente conductoras sobre un sustrato plano, siendo ésta una aplicación de la tecnología Inkjet en el printing electronics, es decir, un buen ejemplo del concepto de impresión funcional. No obstante, la reproducción de archivos multiatributos ya sean bidimensionales o tridimensionales requiere el uso de múltiples

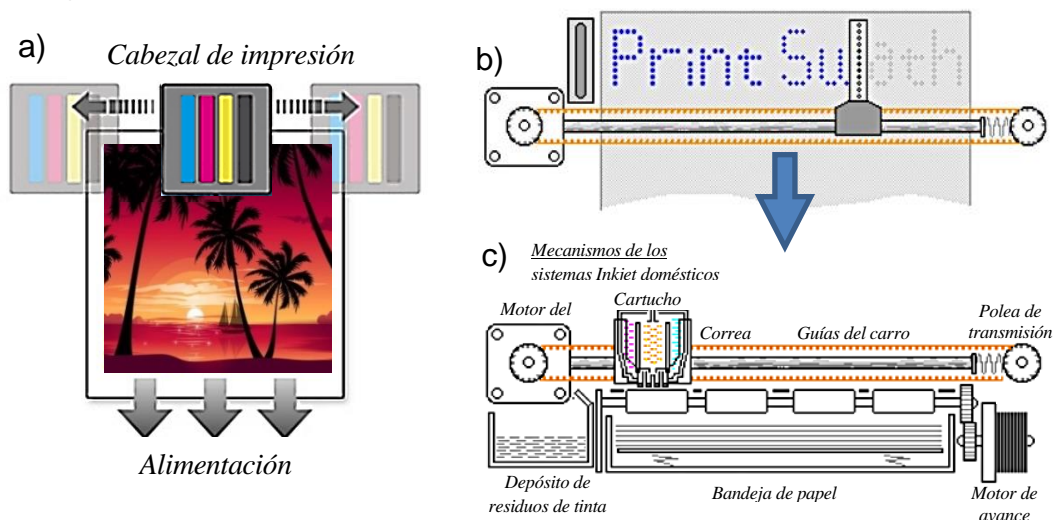


variables (digamos tintas CMYKW en caso de proporcionar un atributo cromatico) las cuales han de ser depositadas a voluntad para que en combinación y graduación reproduzcan lo definido por el archivo digital ciertamente un enfoque más complejo.

#### 1.4.3.3.1. Sistemas de impresión digital domésticos e industriales sin contacto por tecnología DOD

De modo que, siguiendo con los principios de la impresión con la tecnología Inkjet DOD por piezoeléctricos, a diferencia del sistema particular anterior (particularización de sistema Nhibird32D) donde el sustrato es fijo y carro de impresión se desplaza en un plano paralelo a éste. Por lo general en las impresoras domesticas el cabezal de impresión recorre las hojas de papel (sustrato) en franjas horizontales, usando un motor para moverse lateralmente, mientras que otro motor hace pasar el papel en saltos verticales, de esta manera el cartucho alojado en el cabezal recorre el dominio del area de impresión reproduciendo puntos, caracteres o imágenes.

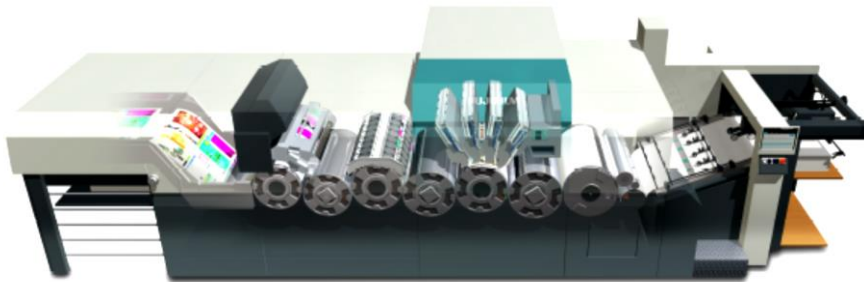
Afin de acelerar el proceso de impresión, el cabezal puede imprimir una línea de puntos o una matriz de puntos (banda) en ambos sentidos de su desplazamiento horizontal (sistema Scan Printing). Por otro lado, la anchura de la banda se define mediante en número de nozzles activos en el cabezal y la separación de estos. Cabe destacar nuevamente que en sistemas domésticos los cartuchos son sustituibles y en la actualidad se caracterizan por existir 4, es decir; los que proporcionan las tintas de color Cyan, Magenta, Yellow, Black, ver Figura 47).



**Figura 47:** Representación esquemática del sistema Scan Printing, común en todas las impresoras de tinta de uso doméstico y en muchas de las impresoras de gran formato (a), Vista en planta de un sistema de impresión DOD multinozzle (b), Vista frontal esquemática de una impresora doméstica con sistema DOD Scan multicolor [Fuente: elaboración propia].

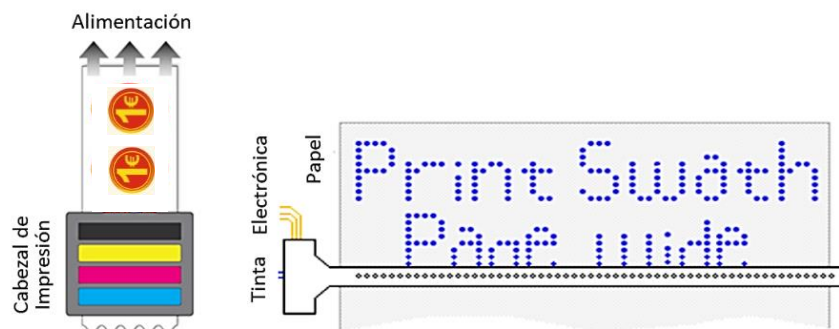
Por otro lado, en cuanto a los sistemas de impresión alejados del ámbito doméstico, tenemos a las impresoras de gran formato y a las impresoras destinadas a grandes

volúmenes cuyo material impreso tiene fines comerciales, llamémosles a estos sistemas industriales. Luego por otro lado, como ya sea comentado también tenemos un gran número de impresoras funcionales es decir, adaptadas a un fin concreto como puede ser la electrónica impresa, textil, decoración o codificación en el mundo del packaging por ejemplo (ver Figura 48). En general podemos decir que se diferencia de los sistemas anteriores en el precio, las capacidades de impresión en cuanto a números de nozzles (cientos de miles), resolución, calidad de imagen y velocidades de impresión, así como su volumen, dimensiones, nivel de complejidad, precisión, repetitividad, etc., entre otras muchas otras diferencias.



**Figura 48:** Imagen conceptual de una impresora digital con fines comerciales de tecnología Inkjet de alta productividad con sistemas Single-pass Printing [116].

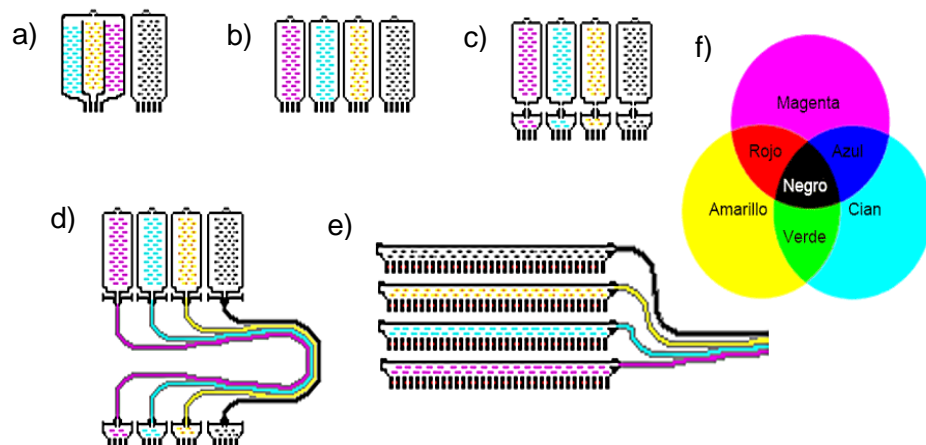
Muchas de estas impresoras han adoptado soluciones que hacen que su funcionamiento diste de las impresoras convencionales a los ojos de un usuario doméstico, por ejemplo en impresoras de alta productividad es común encontrarse con sistemas Single-pass Printing, en donde, indistintamente de que posea la capacidad de moverse (sustrato/cabezal), la deposición se realiza sin alternancias sobre toda el dominio de impresión, cubriendo esta área por completo. Por otro lado, en aquellos casos donde el cabezal se mantiene fijo el sustrato a menudo se desplaza a mayor velocidad al no existir problemas inerciales de la masa en movimiento aumentando la productividad (ver Figura 49).



**Figura 49:** Representación esquemática del Sistema Single-pass Printing (a), Vista en planta del mismo con un cabezal multinozzle (b) [Fuente: elaboración propia].

Por otra parte, los sistemas de alimentación y suministro de tinta también influyen en las capacidades de la impresora (velocidad, coste de impresión, etc.), habiendo múltiples tipos (ver Figura 50) y entre los cuales es posible resaltar:

1. **Cartuchos tricolores más negro:** una de las formas más baratas, agrupando a parte el color negro (K). Sin embargo, esta configuración plantea una problemática ante un consumo irregular de tinta al no permitir el intercambio de los colores individualmente. Por otro lado, también limita la velocidad del cabezal debido a la cantidad de masa en movimiento (problemas inerciales).
2. **Cartuchos separados:** en esta configuración todos los cartuchos son independiente e intercambiables. Con el remplazo individual, se solventa el problema del consumo irregular, aunque a menudo requiere de un cabezal de mayores dimensiones y peso, o de cartuchos más compactos, que reducen el volumen de sus depósitos, limitando en definitiva la capacidad del sistema o la productividad del mismo (solución para el ámbito doméstico).
3. **Cartuchos y cabezales de impresión separados:** en muchos sistemas puesto que los cabezales con tecnología PIJ es decir DOD por piezoeléctricos, son muy costosos en comparación a los sistemas TIJ, esto no suelen ser desechables y por tanto los cabezales son independientes de los depósitos siendo éstos los desechables. En estos sistemas, el cabezal de impresión, alojan al conjunto sistema de eyección y al depósito, una de sus principales ventajas es la capacidad de sustituir los depósitos en caso de caducarse la vida útil de las tintas.
4. **Cartuchos de gran capacidad en la base de la impresora:** éstos sistemas constituyen un paso intermedio entre los cartuchos de depósito intercambiables y los cabezales de grandes dimensiones, es decir, son aquellos en donde el depósito intercambiable se encuentra lejos del carro de impresión y unidos al sistema de eyección del cartucho mediante tubos flexibles. En esta solución el poco peso aportado al carro de impresión permite aumentar la velocidad de impresión y la capacidad del sistema utilizando depósitos de mayores volúmenes de tinta. Sin embargo, la necesidad de sistemas auxiliares de control hacen de éstos equipos unos más complejos y costosos, tomando protagonismo en impresoras de gran formato o del tipo industrial.
5. **Cabezales de grandes dimensiones:** estos sistemas también son conocidos como sistema Single-pass Printing, en los cuales el cabezal no escanea al sustrato en un plano paralelo a éste, debido a que el tamaño de éstos es de la anchura del sustrato el carro que los contiene puede permanecer inmóvil mientras el sustrato se desplaza linealmente debajo de éste o pueden ser el carro de impresión el que se desplace linealmente mientras el sustrato esta fijo, por otro lado, dado que pueden contener un elevado número de boquillas hasta 10.000 por cabezal, sus velocidades de impresión son muy elevadas pudiendo igualar o incluso superar a los impresoras láser.

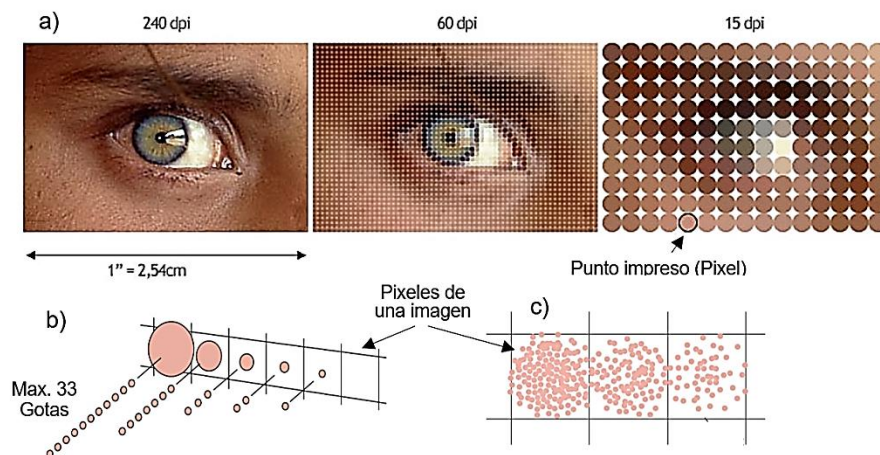


**Figura 50:** Distintos sistemas existentes de suministro de tinta: (a) Cartuchos tricolores más negro, Cartuchos separados (b), Cartuchos y cabezales de impresión separados (c), Cartuchos de gran capacidad en la base de la impresora (d), Cabezales de grandes

*dimensiones (e), Colores formados a partir de la combinación de las tintas Cian, Magenta, Amarillo (CMY) [Fuente: Elaboración propia].*

El elemento crucial de las impresoras por chorro de tinta ya sean destinadas al ámbito doméstico o al ámbito comercial/industrial es, como ya se ha dejado intuir el cabezal de impresión, el cual es un dispositivo electromecánico (MEMS) de micro-ingeniería, que toma prestado técnicas de fabricación de los chip de silicio, el cual al igual que en los chip. Las primeras impresoras poseían 12 Nozzles no siendo estas suficientes para sustituir a las hoy arcaicas impresoras matriciales, sin embargo hoy en día debido a su gran evolución en cuanto a miniaturización los cabezales/cartuchos pueden llegar a tener cientos o miles de nozzles con las cuales alcanzar una calidad de reproducción de calidad fotográfica.

La calidad de la reproducción de un sistema de impresión es inversamente proporcional al tamaño de las gotas que sus cabezales eyectan, es decir dejando al margen la interacción de éstas con el sustrato, con ellas definimos el número de puntos o píxeles por pulgadas (DPI) siendo el píxel la unidad de color (reproducido a través de la deposición de un conjunto de gotas) cuyas dimensiones vienen definida por la capacidad de resolución del sistema. De modo que, mientras más pequeñas las gotas, píxeles más pequeños, mayor resolución. En este aspecto las gotas suelen poseer volúmenes comprendidos entre los 100 pL pudiendo alcanzar hasta 1pL, en la actualidad existen sistemas donde el volumen de la gota eyectada puede ser variada a voluntad, lo cual permite que áreas grandes puedan ser cubiertas con gotas de grandes dimensiones afín de incrementar su eficacia y/o controlar mejor aproximación del color en el interior del píxel (Figura 51).



**Figura 51:** (a) Calidad de reproducción de una imagen en función del número de puntos por pulgada [117], (b) Variación del volumen de tinta depositada y (c) variación de la densidad de puntos en el interior de cada píxel, distintas formas de modificar nivel del gris en una imagen monocromática, hoy en día se combinan para una mejor calidad de reproducción [75].

Las gotas por otro lado, han de ser eyectadas dentro de un rango de velocidad y de volumen con una variación que por lo general suele ser entorno al 2% afín de evitar distorsiones en la reproducción y en cuanto a la velocidad de eyección esta suele estar entre 2 y 10 m/s. En la reproducción de las imágenes, textos o gráficos sobre los sustratos también se ven influenciados por la formación de colas o gotas satélites tras la eyección de las gotas, siendo la presencia de éstas negativas e indeseables en la reproducción de imágenes de alta calidad. Así como también lo es la rectitud con la que se produce la eyección, típicamente dentro de los 10 mrad de tolerancia respecto a un eje perpendicular al sustrato.

De manera que, como se ha comentado con anterioridad, una de las características que diferencian a los sistemas domésticos de los comerciales son la productividad y la estabilidad, donde la productividad de una impresora Inkjet se encuentra determinada por la frecuencia con que ésta eyecte las gotas, el número de nozzles del cabezal y la capacidad de resolución del mismo (definido por la densidad de integración de los nozzles), es decir de una forma sencilla podría definirse la productividad como:

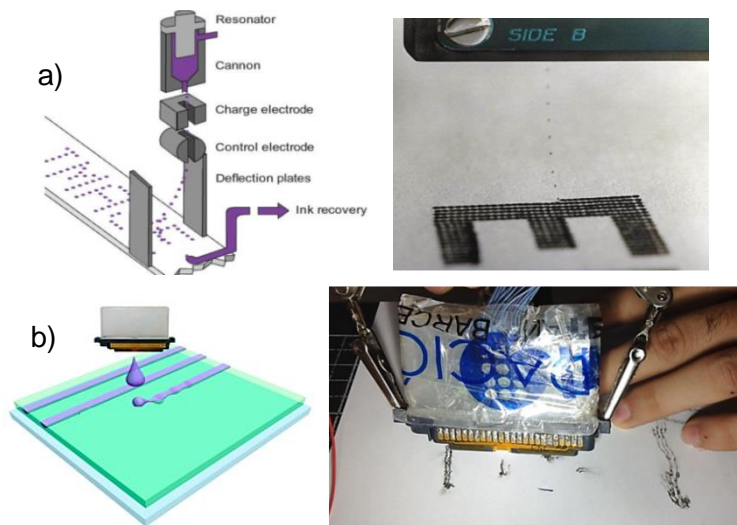
$$t_{print} = \frac{A_{print}}{\mu \left( \frac{N_{nozzle}}{Dpi^2} \right)} \quad 1.1$$

Donde el tiempo de impresión ( $t_{print}$ ) viene definido por el área a imprimir ( $A_{print}$ ) entre el rendimiento del sistema ( $\mu$ ) y la densidad de integración de los nozzles en el cabezal, su frecuencia de eyección y su resolución. De esta forma mediante la expresión anterior es posible se establecer la productividad del sistema de impresión en metros cuadrados o pulgadas cuadradas de sustrato impresión por segundo.

En este aspecto en los sistemas Inkjet, el rendimiento del sistema es función del modo en el que el cabezal realiza el escaneo de la superficie a imprimir. Por ejemplo, el rendimiento en los sistemas Single-pass Printing son muy superiores a los Scan Printing. Por otro lado, la resolución de este tipo de impresoras digitales puede ir desde unos 60 ppp o DPI hasta valores superiores a las 5000 ppp como es el caso de la Impresora FUJIFILM Dimatix DMP-2800.

La estabilidad es también un parámetro importante en estos sistemas de reproducción digital, típicamente en las impresoras domesticas se suele establecer un cierto número de gotas eyectadas antes de que se admita la posibilidad de un fallo, típicamente 1 entre mil millones, si bien el fallo en la eyección de una gota de picolitros de volumen es imperceptible al ojo humano (ver Figura 52) en muchas aplicaciones industriales este nivel de fallo no es admisible, llegando al trillón de gotas.





**Figura 52:** Imagen conceptual [118] y real del sistema single-jet con tecnología CIJ [119] (a), imagen conceptual y en funcionamiento del sistema multinozzle DOD con tecnología PIJ utilizado en la presente tesis con tres nozzles activos (b) [Fuente: elaboración propia].

En la imagen anterior podemos apreciar dos diferentes tecnologías Inkjet distintas, por un lado tenemos los sistemas continuos (CIJ) donde el chorro de tinta se desintegra en gotas de manera continua mientras que estas se depositan sobre el papel a voluntad, cosa que obliga a recircular las gotas no utilizadas, siendo el caso mostrado uno particular puesto que utiliza un único nozzle y por tanto un único chorro. Por otro lado, también se muestra la tecnología DOD donde las gotas son eyectadas desde un principio a voluntad por lo que no requiere de recirculación de la tinta y en este caso se muestra un sistema multinozzle accionado por piezoeléctricos por tanto perteneciente a la subcategoría PIJ. En ambos sistemas no se produce contacto alguno con el sustrato luego, este puede ser de materiales, geometrías y rugosidades variadas.

#### 1.4.3.3.2. Conceptos básicos en la reproducción de imágenes digitales

Hasta ahora se ha tratado a las impresoras de tecnología Inkjet como dispositivos electromecánicos capaces de depositar de forma controlada en cuanto a cantidad o volumen y ubicación los materiales fluidos (tintas) sobre los sustratos, sin que en ello se produzca contacto alguno con éstos. Desde un punto de vista más amplio estos dispositivos electromecánicos suponen un elemento periférico de los ordenadores, capaces de reproducir un archivo electrónico que contiene la información digital de una imagen. Los ordenadores en este aspecto pueden hacer uso de dos formatos a la hora de definir una imagen digital, es decir, pueden hacerlo de dos modos: como mapa de bits (imagen ráster o imagen de píxeles) y como de imagen vectorial. De manera que, mediante el correspondiente software estos archivos digitales son tratados y pueden ser reproducidos tanto en una pantalla o como en el caso que nos ocupa sobre un sustrato mediante una impresora.

### Imagen vectorial.

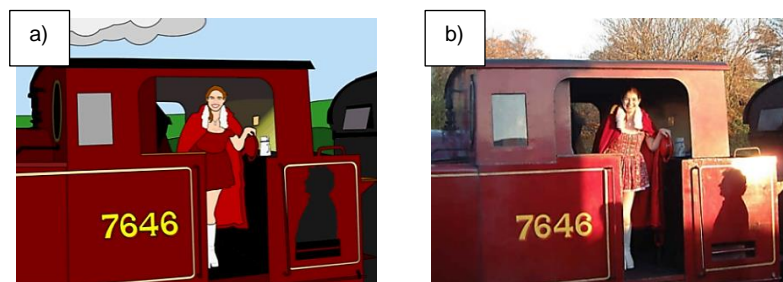
Del latín imago: imagen, se define como figura, representación, semejanza o apariencia de algo. El término también se emplea para nombrar a la representación visual de un objeto mediante técnicas como; la fotografía, el video, la pintura u otra disciplina.

Una imagen vectorial es una imagen digital formada por objetos geométricos independientes (segmentos, polígonos, arcos, etc.), cada uno de ellos definido por distintos atributos matemáticos, de forma, de posición, de color, etc. Por ejemplo un círculo de color rojo quedaría definido por la posición de su centro, su radio, el grosor de línea y su color.

Este formato de imagen es completamente distinto al formato de las imágenes de mapa de bits, también llamados imágenes matriciales, las cuales están formadas por píxeles. El interés principal de los gráficos vectoriales es el de poder ampliar el tamaño de una imagen a voluntad, sin sufrir la pérdida de resolución, calidad o fidelidad en la reproducción de la misma como si sufren las de mapas de bits. De la misma forma, estos formatos permiten mover, estirar y retorcer imágenes de manera relativamente sencilla. En ello radica su muy extendido uso en la generación de imágenes a través del CAD (Computer Aided Design, diseño asistido por computadora) y en imágenes tres dimensiones tanto dinámicas como estáticas.

A través de este formato dibujantes y diseñadores que se dedican al arte digital pueden crear, dibujar o escanear geometrías para luego “vectorizarlas”, es decir, convertirlas en una imagen vectorial digital y con ello modificar sus propiedades mediante herramientas gráficas, coloreándolas, agregándoles sombras, texturas etc., incluso hasta dotarles de movimiento.

En la actualidad puesto que las impresoras son dispositivos periféricos de salida, capaces de reproducir un archivo digital fundamentalmente basado en su capacidad de subdivisión física de una realidad continua definida vectorialmente o no, en una discreta, es el caso de las imágenes en el que dicha reproducción se hace mediante píxeles.



**Figura 53:** Locomotora a vapor en formato de imagen vectorial, originalmente en formato Windows Metafile (WMF) convertido a PNG. (a) y foto original tomada en formato matricial JPG (b) [Fuente: Wikipedia].

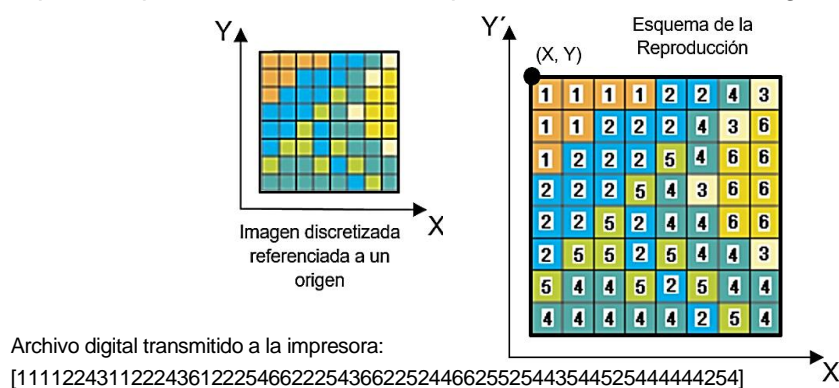
Dado que una imagen vectorial es, en realidad, el resultado de una serie de cálculos matemáticos relativos a la posición y los atributos de cada punto (o vértice) que la compone,

se puede comprobar a través de la imagen anterior (Figura 53) la falta de realismo fotográfico que en comparación con su equivalente en formato matricial presenta, aunque si ampliáramos estas cientos de veces veríamos que esta no pierde definición cosa que ocurriría con la imagen en formato de mapa de bits.

Por otro lado, puesto que en la presente tesis se centra en la reproducción de archivos digitales, a raíz de la necesidad de combinar en un dispositivo (Equipo Nhibrid32D) dos tecnologías de reproducción distintas, es decir mediante la solidificación de resinas fotosensible a través un sistema de impresión tridimensional por DLP, en combinación con la deposición controlada de gotas a través de un sistema de impresión bidimensional Inkjet DOD por piezoeléctricos, el formato de imágenes digitales en mapa de bits resulta más interesante a tal fin, puesto que en él se fundamenta el funcionamiento de dicho dispositivos, por este motivo que a continuación se aborda la estructura o formato de mapa de bits afín de comprender ésta en mayor profundidad.

### Imagen ráster, de mapa de bits o imagen de píxeles.

Una imagen en mapa de bits o imagen de píxeles a diferencia del formato anterior, es una estructura o fichero de datos que representa una matriz de píxeles o unidades de color. A través de ella es posible visualizar en un monitor, o en papel a través de una impresora u otro dispositivo periférico de salida, la representación de dicha imagen digital (Figura 54).



**Figura 54:** Digitalización de una imagen topográfica a muy baja resolución en formato de mapa de bits o imagen ráster [Fuente: elaboración propia].

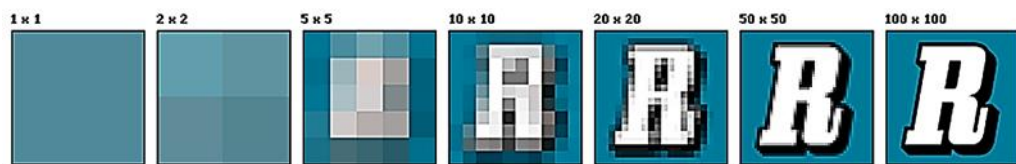
Las imágenes representadas bajo este formato o estructura requieren como se puede apreciar en la imagen anterior de tres parámetros fundamentales con los cuales definir los píxeles que constituyen la imagen, por un lado es necesario definir la ubicación de cada píxel respecto a un origen, así como también las dimensiones geométricas de éstos (alto y ancho) y con ello entra en juego la resolución y el ratio de aspecto de la imagen, y por otro lado, se requiere la definición de la profundidad de color de los píxeles.

Debido a que las impresoras han de recibir los archivos digitales, procesarlos y reproducirlos en este caso mediante la deposición de tinta sobre un sustrato, es necesario afín de



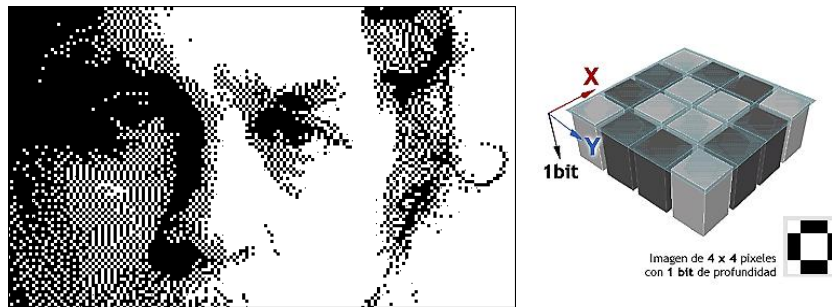
comprender el funcionamiento de éstas, recordar algunos conceptos básicos de la electrónica e informática.

En este aspecto, en primer lugar tenemos a los bits unidad mínima de información en cuyos dos estados 0,1 se fundamenta la electrónica y la informática. Posteriormente tenemos los bytes un conjunto de 8 bit (este conjunto o agrupación constituye una unidad de información, letras y números pueden ser transmitidos de este modo). De forma que, en todo dispositivo electrónico puesto que se fundamenta en sistemas binarios debe cumplirse que la capacidad de estos es siempre  $2^X$ ; donde X pertenece a todos los número enteros positivos  $X \in \mathbb{Z} > 0$ ; en este ejemplo 8 bits =  $2^3$  bits = 1byte. Los píxeles por otro lado, son la una unidad de color, y como hemos visto anteriormente poseen una superficie asociada, al agrupar los píxeles en una matriz se reproduce una imagen digital, la calidad de esta reproducción está en parte asociado al número de píxeles que se utiliza (más píxeles más resolución, más nitidez, mejor calidad de detalle, Figura 55). La resolución de una imagen se mide en función de la matriz, es decir del número de píxeles verticales y horizontales lo que nos lleva al ratio de aspecto, habitual en la reproducción de imagen en pantallas, por ejemplo 4:3 o 16:9 suelen ser relaciones comunes entre el número de píxeles verticales respecto a los horizontales (una pantalla de alta definición HDTV con un ratio de aspecto 16:9 equivale a  $1920 \times 1080 = 2.073.600$  píxel totales por imagen proyectada).



**Figura 55:** Incremento de la fidelidad de la reproducción o de la resolución, de una imagen en función del incremento de píxeles utilizados (Resolución final 100x100 píxeles) [Fuente: Wikipedia].

Por otro lado, todo píxel lleva asociado consigo más información, no solo su ubicación sino también la profundidad de color es decir, una agrupación de bits con la cual definir de qué color es esa diminuta área de la imagen a reproducir (más bits más colores distintos en cada píxel). En este aspecto tenemos que las imágenes monocromáticas (blanco y negro) pueden ser representadas en su forma más elemental por píxeles con una profundidad de color de 1 bit por píxel es decir,  $2^1 = 2$  colores o dos estado 0 ó 1 (estado fundamental de un sistema binario) como se puede apreciar en la imagen de a continuación (Figura 56), donde se muestra una imagen representada a través de una matriz de píxeles con 1 bit de profundidad. Como se puede apreciar, la fidelidad de la reproducción es limitada en términos de calidad de imagen actuales, aunque por otro lado, suponiendo que la imagen está constituida por una matriz de 100 X 100 píxeles de resolución y siendo cada píxel de 1 bit tenemos que el archivo digital que contienen la información de esta imagen posee un tamaño de 10.000 bits.



**Figura 56:** Representación de una imagen con una profundidad de color de 1 bit y una resolución de 100 X 100 píxeles (a), representación esquemática de una matriz de píxeles referenciadas a un origen en una pantalla (b) [120].

Continuando con las imágenes monocromáticas, en la representación de estas también se pueden utilizar píxeles con mayor cantidad de información asociada, es decir, con una mayor profundidad de color, aunque si bien el aumento del número de bits asociado a cada píxel y utilizados para describir el color de éste, por un lado aumenta la fidelidad de la reproducción, por otro lado aumenta las dimensiones del archivo y los requerimientos del sistema no solo de transmisión y procesamiento de la información sino también de las capacidades de reproducción del equipo, en este caso de la impresora. De modo que, si aumentamos la profundidad de color a 2 bits por píxel, es decir a  $2^2 = 4$  colores o CGA (Color Graphics Adapter) podemos interpretar esta situación en base a un sistema binario y utilizando una impresora en su forma más básica, con un único cartucho de tinta de color negro y donde el papel es blanco. Como un sistema que ha de ser capaz de reproducir píxeles con 4 estados (ver Figura 57) que bajo un canal de información sería: blanco equivalente a 00, gris claro 01, gris oscuro 10, y gris muy oscuro o negro equivalente a 11. Como puede intuirse este sistema ofrece una menor limitación al sistema anterior pudiendo representar cuatro colores o cuatro tonalidades de grises.

Otro parámetro importante a resaltar es la forma en que la información es transmitida, en este aspecto una imagen es transmitida como un paquete de información a través de una secuencia de impulsos eléctricos que varían entre dos niveles. Esta transmisión puede ser en serie bit a bit, o en paralelo en un mínimo de un byte a la vez (8 bits) en sistemas de impresión.



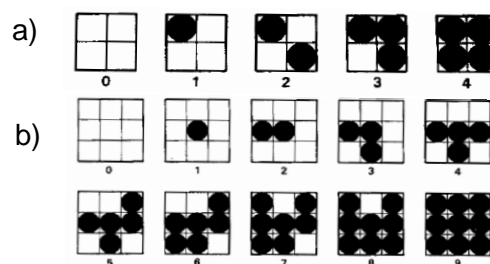
**Figura 57:** Reproducción de la imagen anterior con la misma resolución pero con una profundidad de color de 2 bits por píxel (dimensiones del archivo 100 x 100 x 2 bit por punto = 20.000 bits) [120].

Como se puede apreciar en la imagen anterior (en una proyección fija como es el caso de una foto impresa), la regulación de la oscuridad mediante una profundidad de color de 2 bits es realizada mediante 4 tonos de grises, para ello es necesario subdividir la superficie de cada píxel de modo que éste pueda ser llenado mediante 4 formas distintas (una mayor densidad de puntos negros en el interior del píxel equivale a un tono de gris más oscuro). Lo mismo ocurre en una imagen proyectada a través de una pantalla, con la particularidad de que en este caso el sistema se invierte, 00 equivale a negro (no se emite luz) y 11 equivale a luz total luego a blanco por lo tanto una mayor densidad de luz equivale a un tono más claro en la imagen. Por último y en el mismo sentido, para una proyección o reproducción de una imagen móvil (un video), las imágenes fijas son proyectadas en secuencia a una frecuencia determinada, siendo en un film cinematográfico típicamente 24 fotogramas por segundo la velocidad suficiente para crea la ilusión de movimiento. De modo que, en este caso hablamos de un tamaño de archivo mucho mayor con una transmisión más elevada de información, es decir, de más bits por segundo.

Las dimensiones de un archivo que contiene una imagen digital dependerán de varios factores entre los que podemos destacar la resolución de la imagen, las dimensiones de la imagen (Largo x Ancho) y la profundidad de color (P). De modo que, aún de conocer la capacidad de memoria requerida por una impresora, vista como dispositivo periférico de salida capaz de reproducir dicho archivo digital, tenemos que:

$$\text{Tamaño} = (R^2 * L * A) * P \quad 1.2$$

Donde la resolución (R) puede asociarse a través del ratio de aspecto, de manera que mediante la profundidad de color de cada píxel y el número total de estos que constituye una imagen es posible calcular las dimensiones del dicho archivo. De modo que, la imagen de la Figura 57 cuyo archivo tiene unas dimensiones de 20.000 bits o lo que es lo mismo 2.500 Bytes o 2,44 Kbytes (1 Kilobyte equivale a  $2^{10}=1024$  bytes). Las elevadas dimensiones de los archivos bitmap a diferencias de los archivos vectoriales hizo necesario el desarrollo de algoritmos matemáticos capaces de comprimir dichos archivos reduciendo su tamaño, es por ello que estos archivos que contienen la información de una imagen digital suelen tener asociado una extensión característica que identifica dicho algoritmo, como es el caso de, JPEG, GIF, PNG, BMP, etcétera.

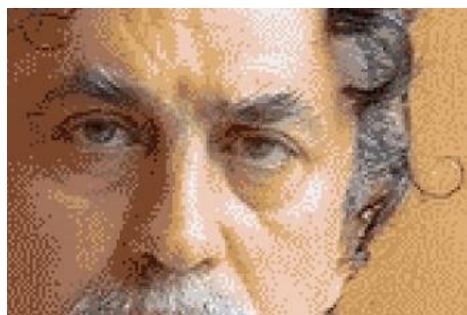


**Figura 58:** Representación esquemática del interior de un píxel monocromático reproducido mediante la deposición de gotas de tinta con distintos niveles de intensidad o con

*profundidades de color distintos.  $2^2=4$  Tonos de grises en una matriz 2X2 de 2 bit (a).  $2^3=8$  Tonos de grises + 2 tonos puros (blanco y negro) en una matriz de 3X3 de 3+1bit (b) [121].*

Mediante estas técnicas de subdivisión de los píxeles es posible representar múltiples colores mediante un sistema binario. De modo que, cuando la tensión de una señal excede de un umbral, el sistema de impresión activa los actuadores del cabezal de impresión eyectando una gota o múltiples gotas, las cuales al depositarse sobre el sustrato en una ubicación concreta dentro del área del píxel éstas determinan la tonalidad del mismo, y mientras la tensión de la señal permanezca por debajo de dicho umbral el cabezal de impresión se mantendrá desactivado y por tanto no eyectará gota alguna, lo que equivale a píxeles blancos. La simplicidad de esta técnica requiere de bajas solicitaciones en cuanto a capacidad de procesamiento y memoria para el dispositivo reproductor.

Posteriormente y sentadas las bases con las cuales controlar la saturación de un color o un tono dentro de un píxel, los sistemas de reproducción evolucionaron hacia la combinación de tintas de colores y por tanto desarrollaron la capacidad de reproducir imágenes a color. Por otro lado, debido a la rápida aceptación prácticamente universal de los bytes (unidad básica de información constituida por 8 bits) los valores de profundidad de color en sistemas de reproducción multicolor siguieron este camino siendo hoy en día en su mayoría múltiplos de 8 bits: 1, 2, 4, 8, 16, 24 y 32 bytes, con la excepción de la profundidad de color de 10 o 15, usada por ciertos dispositivos gráficos como en el ejemplo anterior monocromático Figura 58b.



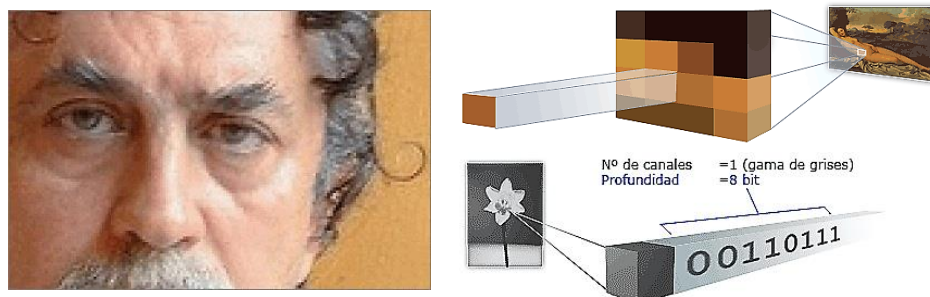
**Figura 59:** Representación en color de la imagen del ejemplo anterior con la misma resolución ahora una profundidad de color de 4 bits (dimensiones del archivo 100 x 100 x 4 bit por punto = 40.000 bits) [120].

De modo que, ampliando nuevamente el número de bit de la profundidad de color a 3 bit por píxel, los primeros ordenadores pudieron representar 8 colores distintos ( $2^3=8$ ) a partir de la combinación del rojo, verde y azul, (sistemas RGB), posteriormente se aumentó la capacidad de graduar estos colores primarios con lo cual se elevó la profundidad a 4 bit lo que equivale a 16 colores distintos (Figura 59), la cual es la mínima profundidad aceptada por el estándar EGA (Enhanced Graphics Adapter), después se amplió a 5 bits por píxel, luego a 6 bits, luego a 8 bits equivalente a 256 colores distintos y si el sistema es monocromático equivalente a 256 tonalidades de grises siendo 0 el blanco absoluto y 255 el

negro, hoy en día una televisión de ultra alta definición (UHDTV) es capaz de representar imágenes con una profundidad de color de 10 bits por píxel, es decir de  $2^{10} = 1024$  colores distintos, pudiendo llegar hasta lo que se conoce como color verdadero o true color de 24 bits por píxel (el modelo utiliza un byte por color primario lo que supone  $256 \times 256 \times 256 = 16.777.216$  colores distintos). Por otro lado, en la proyección de imágenes fijas a través una pantalla, puesto que la combinación de los tres colores primarios emitidos por ésta produce luz blanca y la ausencia de los colores emitidos produce negro (modelo de reflexión o aditivo). En el caso de los sistemas de impresión el modelo es el inverso como ya se ha comentado, de modo que debido a que no se emite luz y el papel es blanco, se requiere del uso de tinta negra afín de aportar oscuridad (modelo sustractivo), aunque si bien la combinación de los tres colores primarios daría origen a un punto oscuro o negro, el exceso de tinta podría llegar humedecer el papel en demasía. Por otro lado, debido a que la reproducción de textos y caracteres en su mayoría se realiza en negro, afín de homogeneizar el consumo de la tinta en los cartuchos de las impresoras, se requiere de la adición del cuarto color. Por último también existe una razón económica, puesto que producir un punto de color negro requeriría de la combinación de tres puntos de color y además, las tintas negras son de un coste menor que las de color.

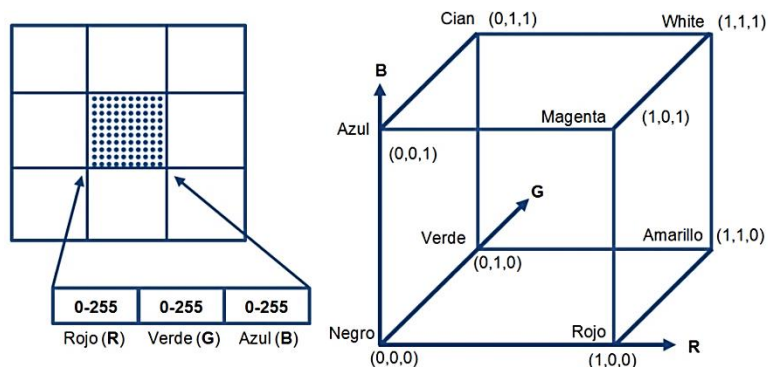
Los pigmentos típicos o comunes en la coloración las tintas CMYK como se comenta en apartados posteriores son el cian de ftalocianina de cobre (pigmento azul 15:4), magenta de quinacridona (pigmento rojo 122), amarillo diarilado, (amarillo 12) y negro de carbón.

De manera que, en la mayoría de los sistemas de impresión domésticos utilizan el modelo de color CMYK (siglas de Cyan, Magenta, Yellow y Key (black)) a fin de reproducir imágenes a color, siendo éste modelo la evolución del antiguo modelo tradicional de coloración RYB (Red, Yellow, Blue), utilizado aún en algunas pinturas y artes plásticas. Cabe resaltar que se le llama key al negro, en vez de usar la letra B de black, por ser un nombre corto del término key plate utilizado en la impresión antiguos. Esta placa maestra imprimía el detalle artístico de una imagen, usualmente en tinta negra (también ayuda a evitar confusiones con la letra B utilizada en el acrónimo RGB de las pantallas).



**Figura 60:** Representación en color de la imagen del ejemplo anterior con la misma resolución con una profundidad de color de 8 bits (dimensiones del archivo  $100 \times 100 \times 8$  bit por punto = 80.000 bits) (a), Detalle ampliado de un píxel a color y de un píxel monocromático de 8 bits de profundidad de una imagen digital (b) [120].

Hoy en día un píxel puede ser representado con una profundidad desde 8 bits ( $2^8$  colores) resultando un poco pobre en los estándares actuales, hasta con 48 bits ( $2^{48}$  colores) pudiendo llegar en fotografía avanzada y digitalización de imágenes profesional a profundidades aún mayores (96 bits), aunque expresadas siempre en valores de bits/canal de color en lugar de la suma de los tres canales, siendo los de 24 bits ( $2^{24}$  colores, 8 bits por canal de color) los más comunes en imágenes fotográficas.



**Figura 61:** Representación esquemática de una imagen digital constituida por una matriz de píxeles cuya profundidad de color de 24 bits es representada mediante el sistema RGB (a).

Representación espacial del sistema RGB y de los colores CMYK mediante el uso de un cubo de color tridimensional [Fuente: elaboración propia].

Es importante resaltar que un azul puro en un sistema RGB de 24 bits equivale al 0, 0, 255 mientras que en un sistema de CMYK dicho color es imposible de reproducir siendo el equivalente más cercano un tono azulvioláceo, es por ello que ninguno de los dos modelos representa un espacio de color absoluto, puesto que tanto si se utiliza el sistema RGB o CMYK la representación de la paleta de colores disponible en el sistema de reproducción son aproximaciones de estos.

La representación de estas imágenes sobre el papel por otro lado, no llega a las capacidades ofrecidas por los sistemas digitales, debido principalmente a las limitaciones dimensionales de las gotas que condicionan a los sistemas de impresión, así como también debido a la interacción de estas con el sustrato, ya en aquellos donde la tinta moja mucho las dimensiones del punto pueden llegar a ser excesivas debido a efectos capilares. Por otra parte, el modelo de color CMYK comúnmente utilizado en los sistemas de impresión al ser un sistema no estándar para todo los reproductores, ya que la conversión del sistema RGB a CMYK se realiza de forma diferente en cada fabricante, la capacidad de reproducción de los sistemas de impresión ofrecen cierta variabilidad, variabilidad que se ve acrecentada cuando entra en juego tintas de distintos proveedores y distintos sustratos, es por ello que en sistemas de impresión con fines comerciales a menudo requieren de un ajuste adicional por parte de operadores especializados a fin de obtener las calidades deseadas en el material reproducido.



### Conversión de una imagen RGB a CMYK.

Como se ha podido apreciar en la imagen anterior (Figura 61) la representación de un píxel mediante el sistema RGB se realiza mediante la combinación de los colores; rojo, verde y azul, siendo en un sistema de 8 bit por color capaz de reproducir hasta  $2^{24}$  colores distintos. En dicho equipo la representación de cada uno de estos colores se realiza mediante la superposición de  $2^8=256$  densidades o graduaciones de cada color primario dentro de cada píxel siendo estos representados en un sistema binario de 0 a 255. Por otro lado, estos tres colores primarios al ser representados de forma vectorial, constituyendo una base ortogonal de origen  $(0,0,0)=$ negro o ausencia de color y siendo  $(255,255,255)$  el vértice más alejado del cubo representando el blanco.

En la conversión de una imagen RGB a CMYK se utiliza un valor intermedio basado en CMY en donde la densidad o graduación de cada color varia en una escala de 1, de modo que siendo 0.0 la graduación de un color inexistente o desactivado y 1.0 el color totalmente saturado, para después haciendo uso del sistema de cuatro colores CMYK y mediante la deposición de cuatro capas superpuestas una de cada color, como se puede apreciar en la imagen de la Figura 62 ser capaces de reproducir una imagen a color a través de un sistema binario:

$$\begin{aligned} t_{\text{CMYK}} &= \{C, M, Y, K\}; & [0, 1]^4 \\ t_{\text{CMY}} &= \{C, M, Y\}; & [0, 1]^3 \\ t_{\text{RGB}} &= \{R, G, B\}; & [0, 1]^3 \end{aligned}$$

**Paso 1:** Convirtiendo RGB  $\rightarrow$  CMY, con los mismos vectores de color.

$$t_{\text{CMY}} = [1 - (R/255), 1 - (G/255), 1 - (B/255)]$$

De forma que, los valores de 0 a 255 del sistema RGB pasa ahora a valores CMY de 0.0 a 1.0.

**Paso 2:** Convirtiendo CMY  $\rightarrow$  CMYK, introducción del cuarto color (variable K (negro)).

$$\text{Var } \left\{ \begin{array}{l} K \left\{ \begin{array}{l} C < \text{var } K \rightarrow \text{var } K = C \\ M < \text{var } K \rightarrow \text{var } K = M \\ Y < \text{var } K \rightarrow \text{var } K = Y \end{array} \right. \\ C = (C - \text{var } K) / (1 - \text{var } K) \\ M = (M - \text{var } K) / (1 - \text{var } K) \\ Y = (Y - \text{var } K) / (1 - \text{var } K) \\ K = \text{var } K \end{array} \right.$$

**Paso 3:** Representación vectorial del sistema de 4 colores

$$\begin{aligned} t_{\text{CMYK}} &= C, M, Y, K \in \mathbb{Z}_{>0} \\ C &= 255 \cdot C_{\text{CMYK}} \\ M &= 255 \cdot M_{\text{CMYK}} \\ Y &= 255 \cdot Y_{\text{CMYK}} \\ K &= 255 \cdot K_{\text{CMYK}} \\ t_{\text{CMYK}} &= C, M, Y, K \in [0, 255] \end{aligned}$$

Color	Nombre	(R,G,B)	(C,M,Y,K)	Hex
	Del color			
	Black	(0,0,0)	(0,0,0,1)	#000000
	White	(255,255,255)	(0,0,0,0)	#FFFFFF
	Red	(255,0,0)	(0,1,1,0)	#FF0000
	Green	(0,255,0)	(1,0,1,0)	#00FF00
	Blue	(0,0,255)	(1,1,0,0)	#0000FF
	Yellow	(255,255,0)	(0,0,1,0)	#FFFF00
	Cyan	(0,255,255)	(1,0,0,0)	#00FFFF
	Magenta	(255,0,255)	(0,1,0,0)	#FF00FF

**Tabla 3:** Representación vectorial de algunos colores en RGB, CMYK y en hexadecimal  
[Fuente: elaboración propia].

De modo que, haciendo uso de K lo máximo posible y en la menor proporción posible CMY es posible aproximar y convertir un color RGB al sistema de cuatro colores CMYK útil en sistemas de impresión como se puede ver en la tabla anterior, y en donde por ejemplo un gris cuya cantidad de blanco y negro es la misma, haciendo uso del vector de color sería representado como (0, 0, 0, 0.5) y no como (0.5, 0.5, 0.5, 0.5).



**Figura 62:** Representación de una imagen a color mediante la superposición de 4 capas de color; Cian, Magenta, Amarillo, Negro (CMYK) [Fuente: elaboración propia].

### Reproducción mediante el modo de color CMYK.

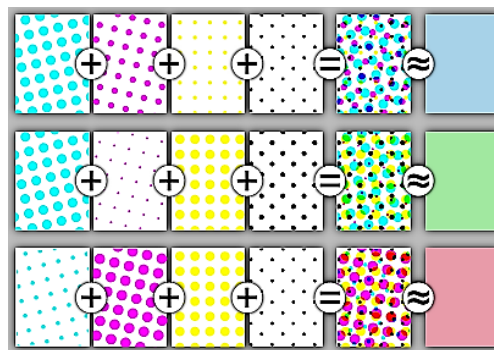
Como se ha podido apreciar hasta ahora, los sistemas de impresión Inkjet permiten ya sea modificando el volumen de la gota eyectada (nivel) o depositando múltiples gotas sobre una misma locación, modificar el tamaño de un punto, por otro lado también permite variar la densidad de puntos en el interior de cada píxel subdividiendo a éste, método utilizados en sistemas monocromáticos. Por otro lado, también se ha abordado de forma superficial las bases en la que se sustenta la reproducción de las imágenes a color, en donde ya sea por el modelo aditivo en pantallas, basado en los tres colores primarios o sistema RGB, o por el modelo sustractivo en sistemas impresos donde se recurre del aporte de un cuarto color y por tanto utilizan generalmente el sistema CMYK, la reproducción de las imágenes digitales se lleva a cabo mediante la combinación de los colores disponibles y la graduación adecuada afín de aproximar cada píxel de la matriz que subdivide a dicha imagen.



De modo que, basándonos en el modo en el que los sistemas de impresión offset reproducen las imágenes de color (superposición 4 capas de color Figura 62), los sistemas Inkjet a través del software propio de cada fabricante y mediante la deposición controlada de gotas de tinta de la cuatricromía (CMYK) realizan la aproximación del color de cada píxel que constituye la imagen digital a reproducir en una única capa.

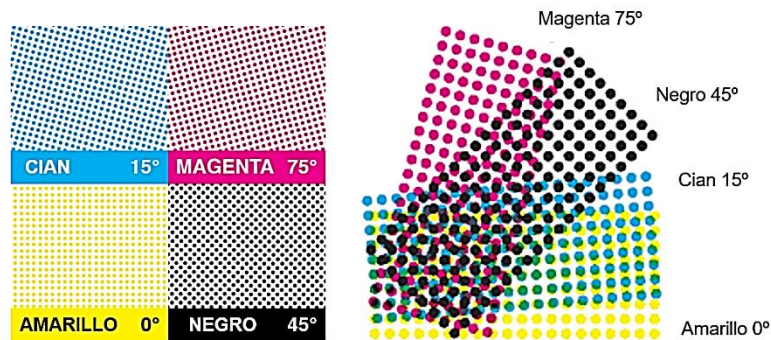
De forma que, asignando un valor de porcentaje al tamaño del punto reproducido de cada color, es posible controlar la saturación de éste, es decir colores más claros requieren porcentajes de punto pequeños (baja saturación), mientras que los píxeles más oscuros requerirán de porcentajes mayores, así mediante la combinación de la cuatricromía en cada píxel, equivalente a la superposición de las capas y no físicamente gota sobre gota, sino repartidas dentro del área que constituye al píxel, es posible reproducir toda la paleta de colores que el sistema de impresión es capaz de reproducir.

Por ejemplo, la reproducción de un píxel rojo brillante (RGB (255,0,0)) mediante un sistema de impresión por Inkjet basado en el modelo CMYK puede contener puntos que en conjunto equivalen a un 2% de cian, 93% de magenta, 90% de amarillo y 0% de negro, lo que vectorialmente equivale aproximadamente a (0,1,1,0), aunque se ha despreciado el pequeño aporte del cian ya que como se ha comentado puede ser ésta una particularidad del software del fabricante del sistema de impresión utilizado en este caso.



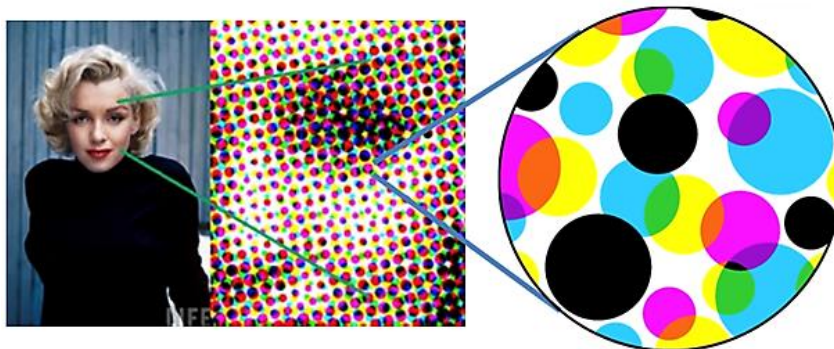
**Figura 63:** Reproducción esquemática y conceptual de 3 colores distintos mediante la hipotética deposición de tintas CMYK en un sistema Inkjet. De izquierda a derecha: el componente cian, el magenta, el amarillo, el negro, que combinados en distintos porcentajes reproducen el píxel de color mostrados en los tres ejemplos y el equivalente percibido por el ojo humano a suficiente distancia [Fuente: Wikipedia]

De modo que, como se puede apreciar mediante la Figura 63, ésta técnica recurre a la capacidad integradora de la óptica humana, con la cual afín de alcanzar la apariencia de un tono continuo, se busca con la variación del tamaño de punto, la combinación de colores y la inclinación de las tramas de cada color, así un sistema Inkjet equivalente es capaz de reproducir el color más próximo al píxel digital mediante la deposición controlada y discreta de gotas de tinta de los 4 colores base.

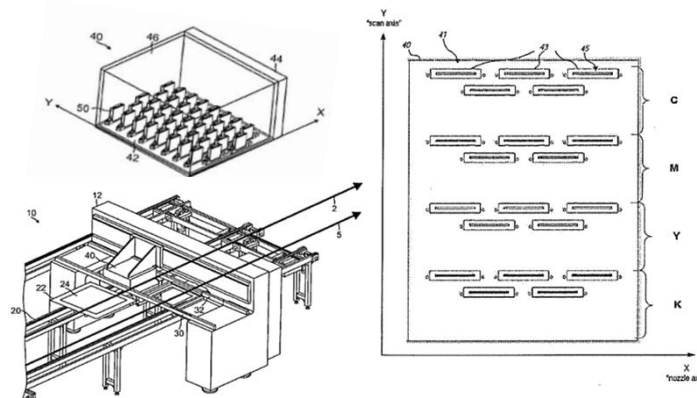


**Figura 64:** Ángulos habituales de las tramas en sistemas Offset [Fuente: Elaboración propia].

Como se puede apreciar en las imágenes anteriores (de los sistemas offset), la sucesión ordenada de los puntos que constituyen a una trama establecen respecto al ojo del observador un patrón inclinado, siendo las que se encuentran en línea o bajo una inclinación de cero grados las más evidentes a la vista, es por ello que las tintas amarillas por ser las menos perceptibles a nuestros ojos (menor contraste en papel blanco) son las que en general utilizan esta inclinación. Por otro lado las tramas inclinadas a 45° son las menos perceptibles a la vista siendo la inclinación que se proporciona tradicionalmente a la tinta más oscura o más evidente sobre un sustrato claro, es decir, la tinta negra. Las otras dos tintas restantes suelen repartirse en el espacio restante lo más espaciadamente posible, es decir, a 15° y 75° para el cian y el magenta respectivamente. En sistemas con fines comerciales por otro lado, ofrecen inclinaciones variables de las tramas. Por último puesto que la coloración en los sistemas Inkjet se obtienen de la deposición controlada de las gotas siendo estas de volumen variable o no, las tramas pueden conseguirse mediante el control de la ubicación de éstas en el interior de la superficie correspondiente al píxel reproducido que a su vez constituye a la imagen.



**Figura 65:** Representación esquemática de los puntos de color de distintos tamaños, que constituyen las tramas que a su vez constituyen los píxeles de una imagen impresa sobre papel, observadas a distintas escalas [122].



**Figura 66:** Representación de una impresora Inkjet de Sistema Single-pass printing, destinado a usos comerciales utilizando el sistema CMYK (a), Ampliación del carro de impresión constituido por 20 cabezales (b), Disposición de los cabezales en el carro de impresión 5 por cada color (c) [123].

#### 1.4.3.4. Del píxel al vóxel

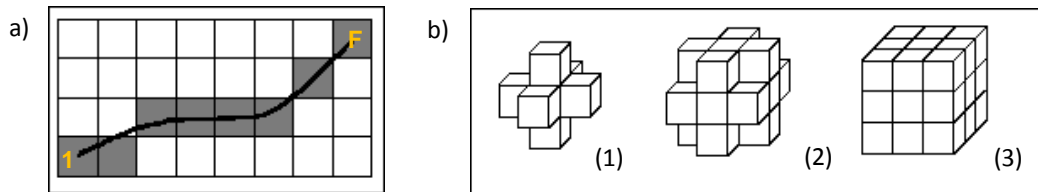
Como hemos podido apreciar la reproducción de las imágenes digitales sobre un sustrato cualquiera, son llevadas a cabo gracias a la subdivisión de estas en píxeles, unidades de color cuya capacidad de representación y dimensiones determinan la fidelidad de dicha reproducción. El vóxel por otro lado, supone el equivalente tridimensional al píxel. Es decir, si una imagen se encuentra constituida por un conjunto de píxeles dispuesto en forma matricial y esta ocupa una superficie plana bidimensional en el espacio, el vóxel equivale a un píxel volumétrico, de modo que mediante la unión de estas unidades discretas según un patrón determinado por el archivo digital permite la reproducción de un objeto tridimensional en el espacio.

##### 1.4.3.4.1. Digitalización de un objeto tridimensional

Continuado con la línea de pensamiento descrita hasta ahora, las impresoras; dispositivos electromecánicos capaces de reproducir ahora objetos, haciendo la función de un elemento periférico de salida un ordenador, han de ser capaces de recibir, procesar e imprimir el archivo digital que contiene la información que describe al elemento a reproducir. En este aspecto los objetos son definidos mediante el equivalente tridimensional de las imágenes vectoriales, es decir bajo un eje de coordenadas fijo y utilizando entidades geométricas vectoriales se pasa de generar puntos, líneas, arcos y polígonos, a generar superficies y con los polígonos cerrados, generar volúmenes. De modo que, mediante atributos matemáticos de forma y de posición, es posible describir una geometría. Posteriormente a esta geometría se le añaden otros atributos como son el color, el material etc., labores que se realiza con el CAD.

Tras la generación del archivo CAD llega la etapa de voxelización, es decir, en donde se convierte a la representación continua de la geometría del objeto, en un conjunto de

elementos discretos, de manera que agrupados éstos, reproduzcan de la forma más próxima la geometría continua inicial del objeto a reproducir. Este proceso imita a la píxelización de una imagen bidimensional.

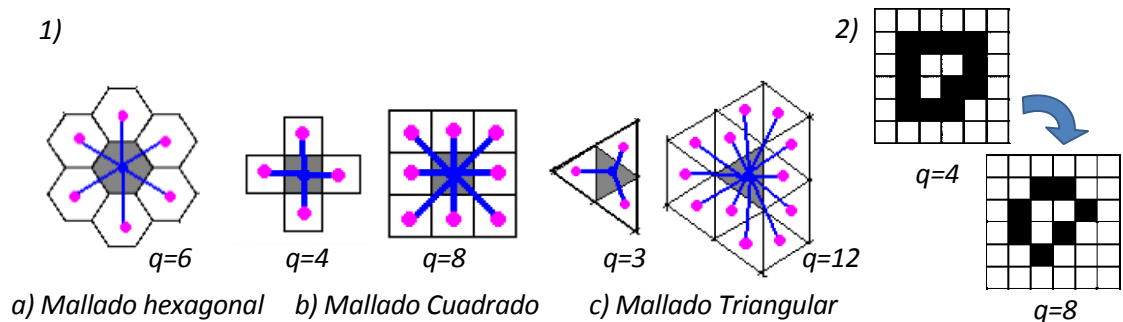


**Figura 67:** Representación grosera de una línea continua mediante píxeles monocromáticos (a) y proceso equivalente en un sistema tridimensional, distintas formas de representar un punto en el espacio (1b) mediante seis vóxeles asociados a uno central, (2b) mediante 19 afín de representar una esfera, (3b) mediante la asociación de 27 vóxeles para una esfera de mayor diámetro [Fuente: elaboración propia].

De manera que, la representación de un objeto digital mediante su voxelización puede definirse como una agrupación secuenciada de elementos discretos (vóxeles) en los que intervienen los atributos de éstos, como por ejemplo; posición, tamaño, forma, tipo de asociación con los otros, material, color etc., procesos que se lleva a cabo a través de un algoritmo pertinente. La disciplina que lidia con las problemáticas del procesamiento digital de las imágenes (2D) y objetos (3D) se conoce como topología digital o discreta, la cual mediante el uso de las matemáticas y la informática buscan mediante el análisis de las propiedades de los objetos a reproducir, pasar de uno conceptualmente analógico a uno digital equivalente, mediante la segmentación del mismo.

La topología se fundamenta en el concepto de continuidad y este a su vez en el de la proximidad, de modo que en primer lugar hemos de abordar el concepto de distancia afín de definir el elemento unidad mínima de volumen o vóxel. En este aspecto usualmente en espacios  $\mathbb{R}^3$  se utiliza la distancia euclídea ( $d_{1-2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$ ) para definir un espacio métrico  $V$ , de radio  $d$  y entrado en el punto 1, o en nuestro caso en vez de utilizar un espacio esférico podemos utilizar su equivalente topológico, un cubo ( $d_{1-2} = \max\{|x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|, |z_2 - z_1|\}$ ) de forma que, dado un espacio métrico cubico ( $V, d$ ), podemos decir que todo punto perteneciente a este espacio discreto o próximo al punto 1 mantendrá unos valores o propiedades continuas. Por otro lado, se dice que todo espacio discreto está conectado si dos de sus puntos existe en un camino. De modo que, si observamos la imagen de la Figura 67a se puede apreciar que la reproducción de la línea continua bidimensional se ha llevado mediante una interpolación lineal cuyos puntos son compartidos por las superficies discretas que constituyen a los píxeles monocromáticos negros. Esto nos lleva a definir como se relacionan estos elementos discretos haciendo uso del concepto de adyacencia.

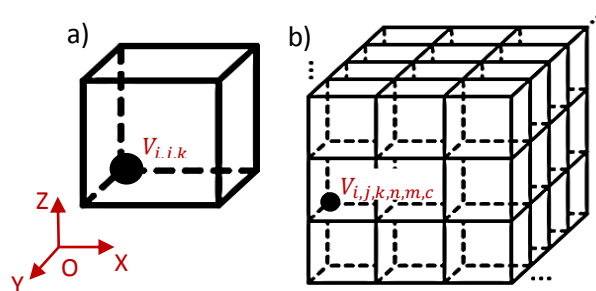
Si un conjunto de punto pueden constituir un arco y un conjunto de arcos un superficie y a su vez un conjunto de estos un volumen. Un sólido cualquiera constituido por un número inmenso de puntos, debido a que a efectos prácticos es imposible almacenar la información de todos los puntos que los constituyen, mediante la división del espacio en elementos discretos que en función de su distancia, establece una red de puntos equiespaciados en el espacio permite discretizar dicho sólido inicial reduciendo la información a almacenar. De manera que, cada nuevo punto en un espacio de números enteros  $\mathbb{Z}^3$  puede ser referenciado mediante coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$ . Pero como se ha comentado anteriormente, la forma en el que éstos elementos discretos se unen definen al elemento reproducido, de forma que se requiere del uso del parámetro de adyacencia de un píxel o un vóxel  $N_q(V)$ , es decir, sea  $N$  el número de elementos  $q$ -adyacentes al vóxel  $V$ , un camino se define como una sucesión de elementos discretos todos distintos con una propiedad en común (por ejemplo el color en la representación en la línea de la imagen de la Figura 67a), de manera que mediante esta sucesión de elemento adyacentes podemos ir del punto inicial 1 al final  $F$ . En este aspecto el número de vecinos posibles  $q$  depende del tipo de mado que se utiliza o de la forma del elemento discreto (en un plano, elementos hexagonales poseen  $q=6$ , cuadrados  $q=4$  u  $8$ , triangulares  $q=3$  u  $12$ , ver Figura 68), en el caso de usar un elemento cubico este puede estar asociado con 26 elementos adyacentes, con los cuales comparte cara con 6, borde con 18 y cuyas esquinas o aristas pueden ser compartida con otros 7 elementos, en la Figura 67b se muestra las asociaciones o adyacencias del tipo 6, 18 y 26 en un sistema tridimensional afín de reproducir una esfera.



**Figura 68:** Representación del concepto de adyacencia mediante distintos mallados bidimensionales, resaltando como un elemento discreto con un atributo de color (negro) se relaciona con sus homologos proximos blancos (1), influencia de la adyacencia en la representación de un contorno cerrado (2) [Fuente: elaboracion propia].

De forma que, un conjunto de elementos discretos digamos vóxeles con un atributo de color binario (0=negro, 1=blanco), agrupados con un parámetro de adyacencia de 8 solo pueden representar una imagen en un plano bidimensional, mientras que si aumentamos  $q$  a 26 la representación a través de esta agrupación de vóxeles puede ahora ser tridimensional.

Por último se ha de resaltar que en la representación digital de objetos a través de vóxeles, amenudo afín de reducir el tamaño de los archivos, los algoritmos suelen solo tener en cuenta el cúmulo los atributos asociados a los elementos discretos que componen la superficie exterior del objeto ya que en principio no podemos ver a través de la materia. Además de la posición, forma, dimensiones, adyacencia y color de cada uno de los elementos discretos que define al objeto, éstos pueden tener adjuntos muchos otros atributos asociados lo que en conjunto podría requerir transmitir, procesar y almacenar una cantidad de datos excesiva para muchos dispositivos (Figura 69).



**Figura 69:** Representación de un vóxel cubico referenciado a una base fija (a) y de dicho vóxel dentro de una red en la que además de su posición se le han añadido otros atributos como por ejemplo, como se encuentra unido a otros (adyacencia), el material que lo constituye y el color (b) [Fuente: elaboración propia].

En línea con lo descrito con anterioridad, los archivos STL (formato desarrollados por 3D System y extensamente utilizados como input de los elementos de reproducción de objetos tridimensionales) suponen un primer paso en la discretización de geometrías continuas a través de la disciplina anteriormente comentada, la topología digital o discreta. Este formato permite la vinculación entre el CAD y la secuencia de instrucciones que obedecerá el elemento reproductor llamémosle; de prototipado rápido (RP) o de fabricación aditiva (AM).

Estos ficheros básicamente están formados por una estructura fundamentada en caras triangulares, a través de tres nodos enumerados y referenciados en el espacio según una base ortonormal fija. Mediante la ley de la mano derecha (triedro directo) se establece un vector normal a dicha superficie triangular y a su vez a través de éste se define si la cara es exterior o interior. En conjunto, la triangulación de una nube de puntos puede describir una asociación de superficies triangulares unidas por sus vértices y en consecuencia representar una superficie tridimensional cerrada. De la misma manera, la descripción del interior de dicha geometría tridimensional puede ser descrita mediante un polígono rectangular de cuatro vértices, un tetraedro. A través de estos elementos discretos y sus asociaciones los archivos .stl describen cualquier sólido tridimensional continuo como un poliedro complejo.

Los archivos STL sin embargo, proporcionan solo la información de la geometría de la pieza, sin proporcionar a este ningún otro atributo. En este aspecto existen al menos dos variaciones del formato STL a saber, capaces de añadir un atributo de coloración. Los



paquetes de software VisCAM y SolidView en este aspecto dotan a cada triángulo una profundidad de color de 16 bits en el cual utilizan un sistema tricromático RGB, es decir recordando el sistema de mapa de bits éstos sistemas utilizan los primeros 5 bits para la regulación del color azul (B) de 32 formas distintas. Los siguientes 5 bits para el verde (G) y los siguientes 5 para el rojo (R), dejando el último para la validación de la existencia o no de la coloración (1 existe coloración 0 no, y por tanto el archivo constituye un STL standard).

El software de Materialize Magics por otro lado, utiliza un encabezado de 80 bytes en la parte superior del archivo a través del cual no solo se describe el nombre del objeto y el número de triángulos, sino también el color general de toda la pieza. Si se utiliza coloración en la representación de dicha geometría, ésta está constituida por la combinación y graduación de cuatro elementos, tres de color (rojo, verde y azul) y un cuarto de transparencia (color RGBA). Por otro lado, mediante la anulación de una coloración global y la dotación a cada cara exterior triangular de un atributo visual sería posible representar un objeto tridimensional multicolor con un mayor detalle superficial a través de una estructura de mapa de bits RGBA aunque de una discretización crómica bastante basta. La sustitución de éste atributo visual general por otro lado, por un atributo material, permitiría dotar a cada uno de los poliedros complejos que definen al elemento tridimensional representado, con una profundidad de materiales fija en todo su volumen, y bajo éste principio al igual que en el caso anterior mediante la dotación de un atributo material a cada tetraedro se podría aumentar la capacidad de graduación de los materiales aunque con saltos discretos. Los archivos de extensión AMF (Additive Manufacturing File Format) basado en el lenguaje XML de código abierto, en este aspecto suponen una evolución de los STL al dotar a éstos archivos de 5 niveles de profundidad, capaces de liberar el potencial de la fabricación aditiva, es decir:

- 1º. **Objeto:** fundamentado en los principios aplicados en los archivos STL, los ficheros AMF son capaces de definir la geometría tridimensional del elemento a reproducir o de los elementos mediante la identificación de los mismos.
- 2º. **Material:** Tras la definición de la geometría a través de los ficheros AMF es posible dotar a los volúmenes poliédricos identificados y definidos en la etapa anterior de una profundidad de material por lo general de forma global, aunque los principios que permitirían asociar la deposición de materiales a una ubicación concreta en el interior del dominio definido por la pieza son los mismos a los expuesto en el nivel siguiente si consideramos la deposición de materiales a través de un sistema Inkjet.
- 3º. **Textura:** el atributo de textura por otro lado, hace alusión a la coloración del objeto a reproducir. En este nivel a través de un proceso de mapeado, se lleva a cabo la generación de múltiples capas bidimensionales píxelizadas de esta forma es posible alcanzar un nivel de graduación en las tonalidad casi continuas e imperceptibles al ojo con las cuales definir no solo la superficie exterior del objeto sino también la interior desde el punto de vista cromático, opción que por lo general se obvia afín de disminuir las dimensiones del fichero.

- 4º. **Constelación:** En este nivel se permite la asociación de múltiples objetos importados sin posición relativa, mediante el establecimiento de jerarquía y el posicionamiento relativos de dichos elementos.
- 5º. **Metadato:** finalmente en este nivel u opción hace referencia a la capacidad de comprimir dichos archivos afín de reducir las dimensiones de éste, siendo una propiedad opcional y específica de la información contenida más no de los elementos descritos por éstos archivos.

Por otro lado, más recientemente se ha creado una alianza en la que nos encontramos empresas como Autodesk, HP, Dassault Systems, General Electric, Shapeways, SLM Solutions, Microsoft, Siemens, entre otras, cuyo objetivo es el de generar formato común capaz de utilizarse en todos los elementos de reproducción de piezas tridimensionales. De modo que, con el nombre de 3MF Consortium esta agrupación busca bajo los principios de los ficheros AMF generar un formato unificado en el que se vincule desde el diseño de un elemento hasta su impresión sin pasar por conversiones intermedias y perder información por el camino es decir: CAD + AMF = 3MF (Manufacturing Format Document). Por otro lado, pretende ganarse la aprobación de la industria al utilizar un formato abierto basado en el lenguaje XML y formatos conocidos como PNG y JPEG para que los fabricantes y desarrolladores no tengan problemas en su implantación y compatibilidad en sus equipos. Microsoft por otro lado, ha asegurado que la integración de ambos sistemas en ficheros comunes como el 3MF mejorará la impresión 3D y hará posible lo que ahora no lo es, como la reproducción de microestructuras con gradientes de material.

#### 1.4.3.4.2. Conceptos básicos en la reproducción de objetos digitales

Antes de continuar, es importante resaltar que debido a que la reproducción de objetos tridimensionales a través de cualquiera de las tecnologías existentes sean éstos funcionales o no, se fundamenta en la superposición de capas bidimensionales de espesor constante como hemos podido apreciar en apartado anteriores, siendo éstas depositadas una encima de la precedente en sentido perpendicular a la plataforma de construcción. Dicho fundamento condiciona la eficiencia del sistema a la geometría de la pieza, es decir, existe una relación directa entre la esbeltez el elemento a reproducir y la estrategia seguida en la reproducción de dicho objeto, modificando la duración del proceso y en consecuencia el coste y la calidad del mismo (ver Figura 14).

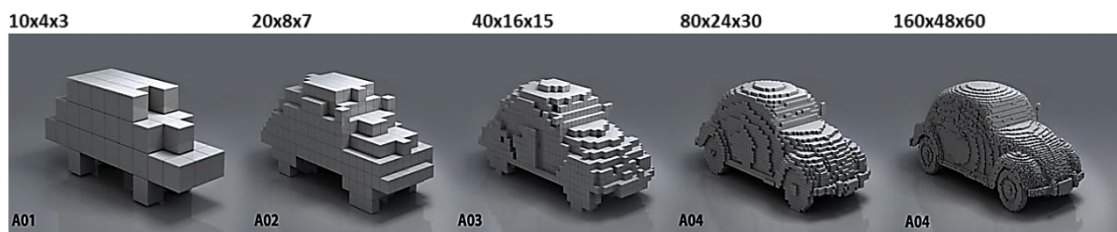
En el capítulo 3 por otro lado, se hace referencia a los principios utilizados en el desarrollo del software implementado a través de la herramienta matemática MATLAB para el equipo de impresión híbrido multimaterial Nhibrid32D, capaz a partir de un archivo de extensión STL, discretizar éste en un conjunto de imágenes de extensión PNG, que al ser emitidas por el proyector DLP sobre una cuba de resina fotosensible y mediante el control de la profundidad de curado y en consecuencia del espesor de las capas polimerizadas, permite que dicho elemento tridimensional definido previamente sea reproducido. Del mismo modo en el capítulo 2 se hace alusión a los mismos fundamentos, pero ahora aplicados en el



sistema de deposición de materiales Inkjet, y a través de éstos se explora la posibilidad de, mediante la deposición de múltiples materiales reproducir objetos tridimensionales voxelizados y dotados de múltiples atributos locales.

Continuado con el formato de las imágenes de mapa de bits, la reproducción de un objeto tridimensional a partir de un archivo digital requiere de varios parámetros fundamentales con los cuales definir los vóxeles que constituyen al objeto. Por un lado, es necesario conocer la ubicación de cada vóxel respecto a un origen fijo y asociar éste al del dispositivo reproductor, así como las dimensiones de estos (alto, ancho y profundo, en el caso de ser cúbicos) y al igual que en los píxeles con ello entra en juego la resolución o la fidelidad con la cual el objeto es reproducido y por otro lado, también es necesario determinar el equivalente a la profundidad de color o desde un punto de vista más amplio la profundidad de los distintos atributos asociados a cada elemento discreto, llamémosle profundidad de material, de color, etc.

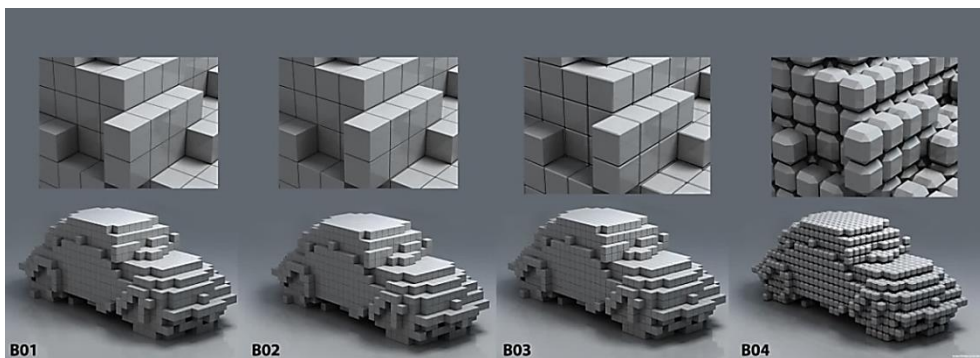
En primer lugar y atendiendo al tamaño de los vóxeles, podemos decir que al igual que en los sistemas de reproducción de imágenes, mientras más pequeños sean estos en proporción al objeto reproducir mejor será la fidelidad de la reproducción, pero a su vez mayor será los requerimientos de sistema, desde un punto de vista computacional; el número de vóxeles empleado será mayor, lo que se traduce en una mayor capacidad de procesamiento, almacenamiento y transmisión de los datos del archivo que describe al objeto. Un ejemplo de ello se ve representado conceptualmente a través de la Figura 70, donde a partir de un incremento gradual el número de vóxeles empleados en la reproducción de un objeto podemos apreciar como este evoluciona hasta alcanzar una cierta fidelidad o calidad de reproducción.



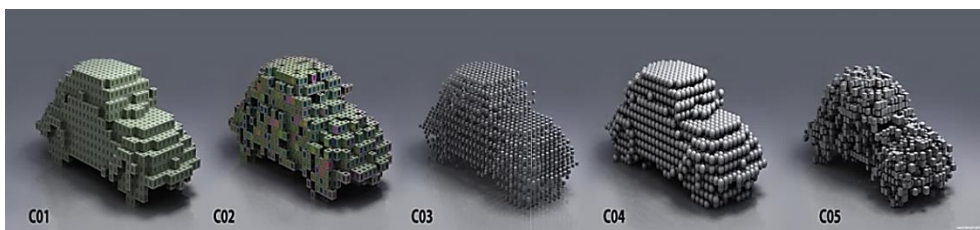
**Figura 70:** Reproducción digital de un Volkswagen escarabajo mediante el uso de vóxeles resaltando el concepto de fidelidad o calidad de la reproducción tras el aumento del número de vóxeles empleados de izquierda a derecha respectivamente [124].

Como se puede apreciar en la imagen anterior con el uso de 160x48x60 vóxeles, la calidad de los detalles del objeto reproducido es lo suficientemente alta como para que, a nuestros ojos podamos percibir que se trata de la reproducción de un automóvil y en concreto uno en particular. De modo que, queda patente que la resolución tanto en imágenes bidimensionales como en objetos tridimensionales es un concepto relacionado con el número de píxeles o vóxeles empleados y las dimensiones de estos en relación a las dimensiones de la imagen o del objeto según sea el caso.

Otro concepto importante a resaltar es la forma del vóxel, si bien éstos suelen representarse de forma cuadrada, bajo el concepto topográfico de homeomorfismo, digamos que; dos espacios cuyas propiedades son idénticas aunque sean de formas distintas son homeomorfos, los vóxeles como elementos discretos con una forma particular, éstos pueden ser representados de distinta manera, cuadrados, en forma de triángulos, de hexágonos o redondos bidimensionalmente, o cúbicos, piramidales, esféricos o a través de cualquier otra forma geométrica regular en un espacio tridimensional. Por otra parte, la modificación de las dimensiones del vóxel produciría el escalado del elemento reproducido y en el caso de esta modificación no sea proporcional en todas las dimensiones, el vóxel de ser cubico dejaría de ser regular distorsionando al objeto reproducido, ver Figura 71 y Figura 72.



**Figura 71:** Reproducción del automóvil anterior mediante el uso de vóxeles homeomorfos o simplemente con aristas matadas de distinta magnitud [124].



**Figura 72:** Uso de distintos vóxeles en la reproducción del automóvil anterior. De izquierda a derecha el empleo de vóxeles cúbicos (C01), V. cúbicos con las seis caras del cubo identificadas por colores (C02), V. esféricos de dimensiones reducidas y sin continuidad o contacto entre sus adyacentes (C03), V. esféricos continuos (C04), V. cuadrados no regulares de distintas dimensiones (C05) [124].

Por otro lado, digitalmente y como se puede apreciar en la Figura 72-C03 y Figura 72-C05, una vez conocida la posición del centro geométrico de los vóxeles que constituyen un objeto modificando la forma y dimensiones de éstos, se pueden llegar a perder el contacto con sus equivalentes adyacentes o pueden dejar de ser regulares (iguales los unos a los otros), pero en ambos casos en la reproducción física de un objeto, dichas situación no podría tener lugar, principalmente porque violan las leyes de la física, los vóxeles requieren de sustento (no pueden estar suspendidos en el aire) y bajo el principio en el que los vóxeles como cubos construidos aditivamente, es decir, mediante el solapamiento de capas

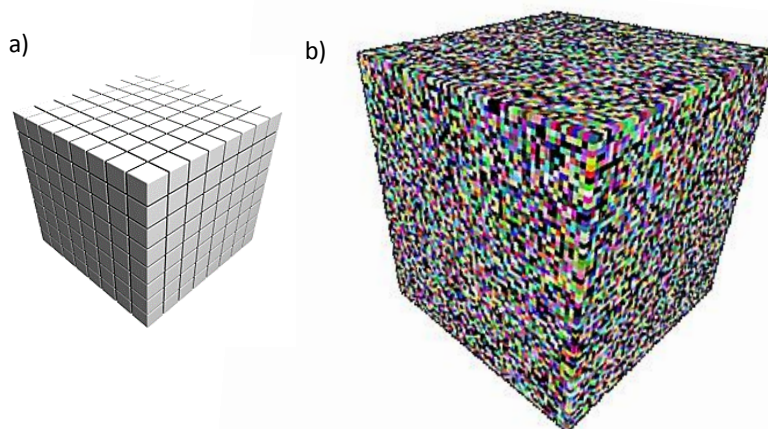
bidimensionales de un espesor fijo, y donde a su vez cada una de estas capas se encuentra subdividida matricialmente de igual forma que los píxeles de una imagen, éstos, los vóxeles, han de ser regulares. Así como también afín de permitir la unión y superposición de los mismos, los cuales harán en algunos casos las funciones de soporte y de constituyente estructural del objeto en otras, han de estar unidos de forma continua formando boques, de manera que el solapamiento de las capas de vóxeles permitirán reproducir la pieza de forma regular y los soporte en las zonas de la misma que se encuentren en voladizo.

Esta situación nos lleva a una nueva particularidad que tiene lugar a la hora de interpretar la reproducción de objetos digitales, es decir la interpretación de la ausencia de masa, del vacío.

En la reproducción de una imagen a través de una pantalla (modelo de reflexión o aditivo), la combinación de los tres colores primarios emitidos por ésta (RGB) produce el blanco y la ausencia de emisión de los tres colores a la vez el negro, en los sistemas impresos donde la imagen se reproduce sobre papel a través del modelo sustractivo, a la inversa, la combinación de los tres colores cian, magenta y amarillo produce el negro y la ausencia de estos tres elementos equivale al color del papel en este ejemplo blanco, pero en el caso de la reproducción física de un objeto tridimensional a partir de la deposición de materiales, la situación es distinta, ya que el objeto en su inicio no existe y para que éste sea reproducido ha de materializarse vóxel a vóxel, capa a capa, es decir, tras la deposición de materia, por lo tanto debe existir un aporte de cualquier tipo sobre un sustrato inicial, soporte o plataforma en donde se erige el objeto, mientras que por otro lado, la ausencia del aporte de materia equivale a vacío.

De modo que, el negro del sistema RGB o RGBA (donde la variable alfa representa traslucidez en sistemas de representación digitales) en nuestro caso, en el blanco del modelo sustractivo basados en la cuatricromía CMYK pero ahora aplicados a la reproducción de un objeto físico, dicho blanco ausencia de aporte equivale a la nada, es por ello que para que exista en una reproducción dicho atributo cromatico ésta debe estar acompañada por su correspondiente masa añadida. En este aspecto éstos sistemas de reproducción se valen de la introducción de una nueva variable en el equipo siendo ahora CMYKW o en algunos casos como en el equipo XJET comercializado por Inkcups a través de 6 cabezal en un sistema CMYKWW afín de equilibrar el consumo de estos [40]. De manera que, para resumir la ausencia de material en el caso de reproducir geometrías tridimensionales mediante aportación de tinta o cualquier otro material (generalmente fotopolimérico en fase líquida), equivale a vacío. Y tratándose en estos casos de una reproducción física de un archivo digital en donde el material cobra relevancia puestos que es uno de los atributos que define a éste objeto reproducido, proponemos llamar a estos sistema del tipo MMMM, donde las variables M harían alusión a los materiales involucrados en dichos procesos y que el sistema es capaz de depositar.

La capacidad de reproducir objetos tridimensionales a partir de archivos digitales que mediante la división de su geometría en vóxeles y estos a su vez subdivididos o constituidos por múltiples materiales, combinados entre sí y en graduaciones distintas, abre un mundo de posibilidades hasta ahora solo posibles por la naturaleza. Aunque por otro lado, plantea retos sin precedentes y en muchos aspectos a día de hoy cuestionan su viabilidad. Por ejemplo en las graduaciones como tal, equivalentes al porcentaje del tamaño de un punto de la cuatricromía de un sistema bidimensional, representando en negativo una graduación del vacío en el interior de un vóxel, es decir, graduaciones en la densidad del elemento o de los elementos que lo constituyen y a su vez que constituyen al objeto a reproducir. La problemática que se plantea de fondo tiene que ver con la continuidad de la masa y las características mutuamente excluyentes de las mismas asociadas a una propiedad determinada. Por ejemplo, si bien idealmente un dispositivo es capaz de depositar pongamos el equivalente a un punto bidimensional de la cuatricromía en el espacio (una esfera de un material M) en una localización concreta dentro del vóxel, ésta ha de estar unida a otra afín de generar un cubo de masa continua y con los atributos correspondientes asociados la profundidad en este caso de material o color que sea el sistema capaz de proporcionar, a fin de hacer al vóxel macizo. La densidad de dichas esferas de material depositadas en el interior de un vóxel con una función X, y una propiedad visual de opacidad es excluyente en cuanto a combinación de materiales si se pretende obtener un vóxel con una propiedad visual inerte (transparente). Por otra parte, si se pretendiese crear un vóxel monomaterial cuyas propiedades requieren modificar una propiedad física como la densidad de la misma, requeriría emplear materiales sacrificables lo cual ya se emplean como son aquellos cuya función es la de sustentación (soportes) habiendo un límite físico, pero si estos vóxeles se encuentran en el interior del dominio definido por la geometría del elemento a reproducir, dichos materiales no podrían ser evacuables, imposibilitando hacer vóxeles porosos o al menos aquellos donde una propiedad Y requiera de la existencia de una material inerte a dicha propiedad Y en la que se solicite su evacuación.



**Figura 73:** Ilustración de un cubo reproducido mediante la agrupación de vóxeles con una profundidad de materiales de 1 bit o desde un punto de vista dimensionalmente menos

*amplio un vóxel monomaterial subdividido (a). Reproducción del mismo objeto cubico constituidos de múltiples vóxeles monomaterial en un sistema con una paleta de materiales amplia, o un píxel multimaterial con una profundidad de materiales de muchos bits (b)*

[Fuente: elaboración propia].

Por otro lado, dotarle la posibilidad a estos dispositivos electromecánicos de reproducción (impresoras 3D) de la posibilidad de combinar múltiples materiales y a través vóxeles reproducir un objeto, plantea una nueva limitación y en este caso referido a los materiales más no a las propiedades a reproducir. Conceptualmente éstos deben ser compatibles entre sí, es decir no es posible combinar en un vóxel materiales como plata, madera, chocolate y sangre, simplemente porque fundamentados en la tecnología Inkjet estos materiales no son compatibles. En estos dispositivo Inkjet DOD la reproducción de los vóxeles se lleva a cabo mediante la deposición controlada de los materiales en forma de gotas, de modo que los materiales han de ser fluidos y como se podrá apreciar en apartados siguientes de baja viscosidad. De modo que, estos deben de cambiar de fase al contacto con el sustrato, ya sea por enfriamiento, a consecuencia de una reacción química, por reacción a algún tipo de radiación que desencadene la solidificación del mismo como por ejemplo en materiales poliméricos o en el caso de utilizar suspensiones o materiales bifásico que por evaporación de los solventes las partículas sólidas inmersas en su interior se fijan al sustrato generando un depósito estable o finalmente a través de cualquier otro proceso a saber, sea cual sea el mecanismo que se utilice en la deposición de los materiales, éstos han de poder ser afines unos con otros, de manera que puedan a su vez establecer uniones capaces de constituir a el vóxel en cuestión. Por tanto, indistintamente del número de materiales con los que cuente el sistema de reproducción (N por ejemplo) y sean esto de sacrificio, funcionales o inertes para los distintos atributos que sea el sistema capaz de proporcionar al vóxel, afín de poder combinar éstos o no, en su interior y con ello en la reproducción del objeto tridimensional han de ser como ya se ha comentado afines entre sí (sistema  $N \times M \rightarrow M \times M \times M$ ).

Finalmente, como última particularidad de los sistemas de reproducción multimateriales, cabe destacar algunas de las posibilidades que puede en un futuro estos sistemas ofrecer, es decir, de pasar de la definición de un objeto a partir de la subdivisión del mismo en elementos discretos, a reproducir éstos elementos discretos y en consecuencia al objeto a partir de la deposición materiales distintos y/o diseñados a voluntad a partir de otros materiales elementales o base. De modo que, afín de vislumbrar en mayor medida el poder de a día de hoy de éstas utópicas posibilidades, hemos de comprender el antiguo afán del humano por antropomorfizar el entorno que lo rodea y a su vez transformándose a sí mismo, inicialmente de una forma superficial a través de los sentidos como el tacto (texturas, rugosidades), la vista (geometrías, dimensiones y colores, consecuencia de nuestra apreciación de las distintas longitudes de onda de la luz proyectada o reflejada por un objeto), el gusto (dulce, salado, ácido, etc.) y el olfato.

A través de estos sentidos el humano pudo crear herramientas, conformar objetos y eventualmente construir artilugios y mecanismos, con los cuales reducir la hostilidad del entorno “humanizándolo”, tras comprender el concepto de energía y sus posibles transformaciones, los mecanismos evolucionaron a máquinas y a través de ellas, las capacidades del humano se incrementa notablemente, desembocando en la revolución industrial donde se comienzan a producir objetos en masa, y en consecuencia aparece en los objetos una función comunicativa afín de diferenciarse de otros objetos con el mismo propósito o función. Posteriormente con el desarrollo de la electrónica y tras la invención del transistor, las máquinas adquieren otra dimensión, aumentando el poder del hombre sobre su entorno, y siguiendo con el afán antropomorfizador del humano, sus avances tecnológicos le permite conferirle a estas la posibilidad de hacer cálculos y a través del software establecer una nueva interacción con ellas otro nivel, a un nivel más profundo ya no superficial a través de los sentidos (vista, tacto, gusto y olfato), sino a través de un lenguaje (la interacción hombre-máquina cambia por completo, el hombre pasa a comunicarse con ellas, dejando de estar supeditados a la manipulación de éstas a través de la repetición de movimientos).

Con la miniaturización de la electrónica y el aumento de las capacidades computacionales de las máquinas, estas ganan en autonomía frente al hombre y la comunicación con éstas se lleva a cabo de una forma más sencilla y directa; indicadores, displays, sensores y controladores predictivos, dan fe de ello. Finalmente, con el desarrollo de las TIC's (tecnologías de la información y la comunicación) y con la aparición de internet, al permitir la comunicación entre los ordenadores, procesando, almacenando y transmitiendo información, supone un nuevo salto evolutivo en para el hombre en su afán de humanizar el entorno que le rodea, pudiendo dotar a los objetos, artefactos, aparatos y/o máquinas la capacidad de trabajar en red y llevar la interacción con el humano a límites sin precedentes en términos de cercanía e intimidad. Estado en el que nos encontramos a día de hoy.

Siguiendo con la línea de pensamiento establecida, la fabricación aditiva permite la reproducción a partir de un archivo digital de objetos tridimensionales personalizables, con una cierta ilimitación geométrica y con una relativamente baja intervención humana. Plantean una desconexión entre el diseño del objeto y la fabricación del mismo, aunque extrañamente reduce la distancia entre lo concebible y lo realizable. Desde un punto de vista más amplio el desarrollo de estas técnicas tienen el potencial de; a partir del almacenamiento virtual de las piezas, la deslocalización del sistema productivo (hablamos de la reequilibración del tejido industrial a nivel global, ya que permite reducir las ventajas salariales de algunos países emergentes y subdesarrollados e incluso al permitir la ubicación de los centros productivos en cualquier lugar del globo tiene el potencial de estar dentro de nuestras casas o al menos en las inmediaciones del consumidor y con ello abre la posibilidad de anular los costes de transporte, trasladar los costes asociados a la fabricación, al almacenaje, a la energía y los desperdicios al usuario o al consumidor final

(una especie de aldea global interconectada, donde los prosumers satisfacen sus necesidades), digamos que una versión más radical del concepto IKEA en donde el ensamblaje de sus productos corre de parte del consumidor, permitiendo de esta forma abaratar sus costes y ser más competitivos). De esta forma rompe las economías de escalas, reduciendo y en algunos casos, hasta eliminado por completo las estrategias especulativas ante posibles escenarios por parte de las empresas, permitiendo el ultra-postponement en la cadena de suministros es decir, el retraso máximo de todo tipo de inversión y proceso productivo al momento de la demanda.

Por otro lado, la unión en red de estos centros productivos supone un avance sin precedentes en cuanto a cooperación, multiplicando los medios de fabricación disponibles (imaginemos un caso extremo; la necesidad de construir un dique ante un inminente huracán, inundación o un vertido de chapapote por ejemplo, bajo el principio del DIY (Del inglés “Do it Yourself” o “hágalo usted mismo”) por decreto gubernamental la cooperación de una comunidad dotadas de impresoras domesticas trabajando en red permitiría ante un caso de emergencia, generar los elementos constructivos y ensamblables del mismo en cuestión de horas y puesto que la intervención del humano es en dicho proceso es cuanto menos escasa, la variabilidad inducida por éste en el producto final se ve reducido al mínimo centrándose la problemática solo en los materiales y su acopio).

Así pues, la reproducción de elementos físicos a partir de un archivo digital supone una nueva vuelta de tuerca en la capacidad del hombre en su afán de humanizar al mundo, la imagen utópica de máquinas fabricando máquinas sin la intervención del humano pertenecientes a día de hoy a la ciencia ficción, no parece estar muy lejos si analizamos la cronología de los logros del humano, hecho que sin duda supondría otro punto de inflexión en la historia de la humanidad o como bien resalta M. Kaku en su libro la física del futuro [125] en el que predice la aparición antes del cambio de siglo de lo que llama “el replicador”, un aparato domestico basado en la nanotecnología capaz de reproducir cualquier cosa (siendo el término “cosa” suficientemente ambiguo capaz de abarcar cual cualquier tipo de consumible desde objetos y alimentos hasta incluso órganos) a partir del ensamblado de partículas y moléculas de los elementos base que constituirían los vóxeles de la cosa a reproducir, de forma desatendida y con la eficiencia propia de las máquinas, es decir en cuanto a fiabilidad, precisión y velocidad, supondría el mayor logro de la ingeniería y la técnica, la culminación definitiva de todas nuestras luchas desde que empuñamos la primera herramienta durante la prehistoria.

Si bien dicha máquina pertenece hoy en día a la ciencia ficción, ante el incipiente desarrollo de la computación cuántica a través de la cual permitiría lidiar con archivos de unas enormes dimensiones, ya hay quien filosóficamente se plantea cuáles podrían ser las consecuencias de su existencia, ya que, en este sentido hay quien afirma que podría alterar los cimientos de la propia sociedad.

Afortunadamente, como el progreso parece que será lento y aún falta mucho para la llegada de dicho hipotético aparato replicador, por suerte para la sociedad, tendrá tiempo para debatir las implicaciones de esta tecnología y adaptarse a una nueva realidad afín de que ésta pueda ser digerida de la mejor forma posible.

Mientras tanto a día de hoy algunos nos conformamos con la posibilidad de reproducir objetos simples a partir de la combinación y en distintas graduaciones de materiales afines, y con ello jugar con algunas propiedades, aunque muy básicas a ojos de la ambición de algunos libres pensadores.

#### **1.4.3.5. Reproducción física de objetos tridimensionales a partir de archivos digitales en formato de mapa de bits**

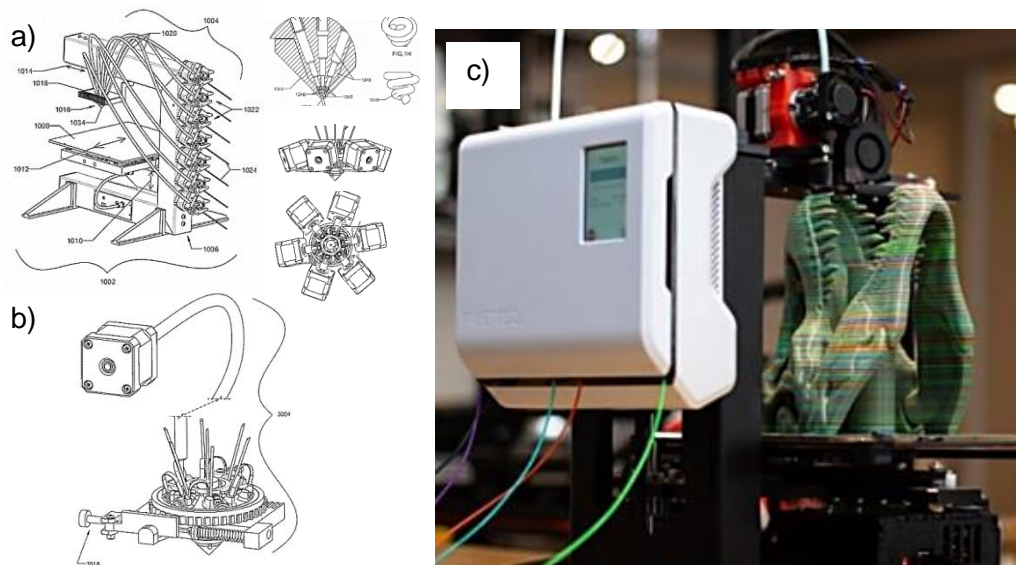
El estado de la técnica actual, como hemos podido apreciar en apartado anteriores, nos permite reproducir objetos tridimensionales monomateriales a partir de archivos digitales mediante múltiples tecnologías, las cuales basadas en el modo en el que los materiales son aportados; por punto, línea o lecho, limitan la posibilidad de su uso y en consecuencia la reproducción de objetos o piezas mediante el concepto de la voxelización (entendiendo al vóxel como un elemento posiblemente multimaterial). Por otro lado se ha de decir que, en este aspecto se están realizando importantes esfuerzos, que en consecuencia están generando aportaciones cada día más frecuentes avanzando el estado de la técnica acercándola más y más a la posibilidad del reproducir los ansiados vóxeles multimateriales.

##### **1.4.3.5.1. Tecnología FDM/FFF**

Haciendo un pequeño inciso en las tecnologías de reproducción Inkjet, y en relación a las tecnológicas capaces de combinar materiales, en cuanto a las tecnologías de aporte de material por punto y en concreto a las de hilo fundido FDM/FFF, Autodesk en septiembre del 2014 presento una patente bajo el título de “Material Dispensing System” innovadora en este campo [126], en donde se detalla un novedoso cabezal basada en esta tecnología capaz de dispensar múltiples colores a través de una boquilla. A pesar de que se han visto intentos por múltiples fabricantes en dotar a los sistemas FDM de una tecnología capaz de combinar múltiples colores estos en su mayoría estos eran dispensados de forma independiente, la tecnología presentada por Autodesk es caso mostraba una evolución.

Se trata de un cabezal con la capacidad de mezclar múltiples filamentos dentro de un único hotend (boquilla calefactada que permite la extrusión del filamento termoplástico) en concreto hasta 7 de ellos. Por otra parte, más recientemente la empresa Mosaic con base en Toronto Canadá, ha mostrado una solución más ingeniosa en su equipo Palett 2 ofreciendo la posibilidad de combinar unir múltiples filamentos de colores en uno único externo en un dispositivo de forma anexa a la impresora FDM.





**Figura 74:** Distintas soluciones planteadas a la problemática de reproducir piezas multicolor mediante la tecnología FDM /FFF (a), Representación solución planteada por Autodesk (b) [126] c) Dispositivo Palette2 de Mosaic [127].

Cabe destacar que, si bien ambas soluciones son ingeniosas resolviendo el problema la combinación de materiales afines u colores, debido a que la deposición de éstos se realiza de forma continua, ante un cambio drástico o discreto por ejemplo en la tonalidad del color, el sistema requeriría de purgas programadas afín de superar dicha eventualidad, lo que en principio supone interrumpir el proceso de deposición, disminuyendo la productividad del sistema, además de generar desperdicios y por tanto hace de éste un sistema uno ineficiente.

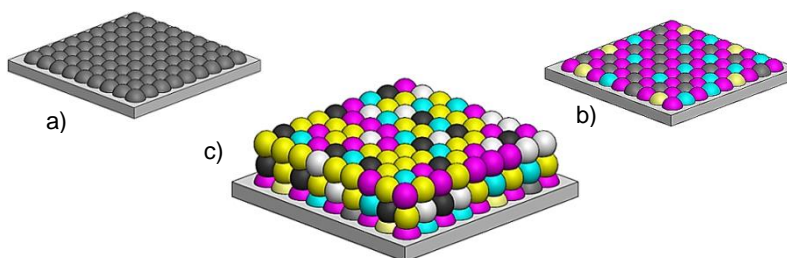
Por otro lado, por mucho que llegue a miniaturizarse el sistema de aporte, se ve imposibilitado a día de hoy de utilizar múltiples boquillas a la vez puesto que supondría un número inasumible de bobinas de filamento y no es posible coordinar los procesos de deposición y purga en distintas boquillas a la vez estando éstas ubicadas en un mismo cabezal mientras se desplaza. De modo que, se puede decir que en cierta forma la deposición del material a través de estos sistemas es y será lenta, puesto que solo se puede realizar a través de una boquilla, y a día de hoy basta o grosera puesto que el diámetro de la boquilla es por lo general varios ordenes de magnitud superior al diámetro de los nozzles de los sistemas Inkjet. De manera que, los intentos por dotar a éstos sistemas de una mayor capacidad reproductiva se ven frustrados desde sus fundamentos, incapacitándolos de alcanzar estándares de resolución, velocidad y capacidad de combinación de materiales posibles en otras tecnologías.

### 1.4.3.5.2. Tecnología Polyjet

En cuanto a las tecnologías en donde el aporte del material se realiza en por línea, es decir mediante múltiples boquillas que de forma independiente y a voluntad realizan la deposición de dicho material mientras que el cabezal se desplaza, los sistemas Inkjet toman un protagonismo casi absoluto, ya sean CIJ o DOD y dentro de éstas ya sean por TIJ o PIJ, gracias a su capacidad de minimización y a la rápida evolución de estas tecnologías en el ámbito bidimensional sobre todo en las últimas décadas, se presenta a día de hoy como la única tecnología con la capacidad de reproducir objetos multimateriales a través del concepto vóxel, aunque limitados por las imposiciones reológicas de los sistema Inkjet.

La tecnología Polyjet como se ha podido apreciar en apartados anteriores se fundamenta en los sistemas de impresión bidimensionales, capaces de reproducir puntos, líneas y patrones, a través de los cuales se generan imágenes y en donde se recurre a la capacidad integradora de la óptica humana para reproducir los colores de estas. La deposición controlada de las gotas sobre el sustrato generan puntos discretos de distintos tamaños, y bajo un patrón concreto estos puntos genera las tramas de la cuatricromía, que al solaparse buscan alcanzar la apariencia de un tono continuo a nuestros ojos.

A diferencia de las impresoras bidimensionales en las tridimensionales, basadas en sistemas Inkjet no se puede recurrir a dicha capacidad integradora del ojo, por lo tanto a fin de reproducir las distintas tonalidades sobre las superficies del objeto tridimensional suponiendo que esta es lisa y continua, han de realizarse de modo que las gotas no permanezcan separadas aunque si pueden estarlo sus colores, luego en cuanto propiedades cromáticas estos sistemas suponiendo que utiliza tintas poliméricas fotosensibles siendo todas las existentes en el sistema compatibles, requieren como mínimo de al menos 4 colores distintos digamos CMYW donde W representa el blanco, pudiendo el sistema estar dotado del negro K por motivos de ahorro de tinta u otras tintas como por ejemplo una tinta extra tinta translucida con el fin aumentar el rango de posibilidades desde un punto de visto óptico. De modo que bajo este ejemplo podemos, reproducir vóxeles de múltiples colores, siendo estos opacos y a su vez, mediante la incorporación del equivalente cromático a la nada, vóxeles traslucidos con distintas tonalidades y graduaciones a partir de un sistema CMYKWA, donde A digamos que representa la tinta translucida.

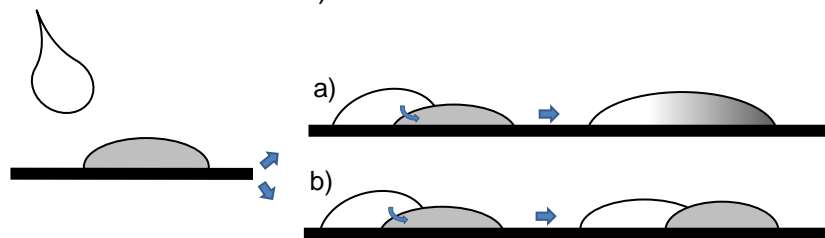


**Figura 75:** Representación esquemática de la primera capa de un vóxel monomaterial y monocromático (a), de igual manera primera vóxel multicolor monomaterial (b), construcción

*del vóxel anterior multicolor monomaterial en un estado más avanzado (c)*

[Fuente elaboración propia].

La figura anterior representa una imagen conceptual del ejemplo comentado con anterioridad, donde se ha representado anárquicamente gotas depositadas de las distintas tintas presentes en el sistema. Por otro lado, dicha representación dista en gran medida de la realidad, puesto que se han representado como esferas superpuestas. En la realidad el comportamiento de las tintas por lo general poliméricas en muchas impresoras comerciales, tras la deposición de estas sobre el sustrato adoptan geometrías en forma de casquete esférico achatado, principalmente influenciada por su reología y su interacción con el sustrato (mojabilidad), así como también por el grado de polimerización de la misma tras la recibir radiación ultravioleta (ver Figura 77) ya que si el grado de conversión no es suficiente para generar las cadenas poliméricas que aportan la rigidez necesaria al material depositado en forma de gotas, éstas pueden hacer los vóxeles inferiores de la geometría reproducida se deformen, colapsando tras la impresión. De modo que en realidad, nos encontramos ante vóxeles macizos compuestos por gotas cuyo depósito constituyen en principio semiesferas achatadas donde estas pueden fusionarse con las adyacentes forman un depósito mayor, cuya forma viene impuesta por una gran cantidad de parámetros abarcados por la dinámica, la reología, termodinámica de superficies e interfases, la química de las tintas y sustratos, etc., para después tras los mecanismos de fijado constituir una capa más o menos rígida y fija, capaz de soportar las capas posteriores. O por otro lado, a través del control de la velocidades de solidificación y las secuencias de deposición de las gotas adyacentes, también se puede formar depósitos discretos constituidas por gotas unidas físicamente por adhesión más no fusionadas de formas dispares, de esta forma la generación de las capas desde un principio están constituidos por gotas de geometrías diferentes pero que en conjunto configuran una capa de un espesor medio constante cuyas propiedades desde un punto de vista cromático son discretas (en la figura de a continuación se busca representar ambas situaciones).

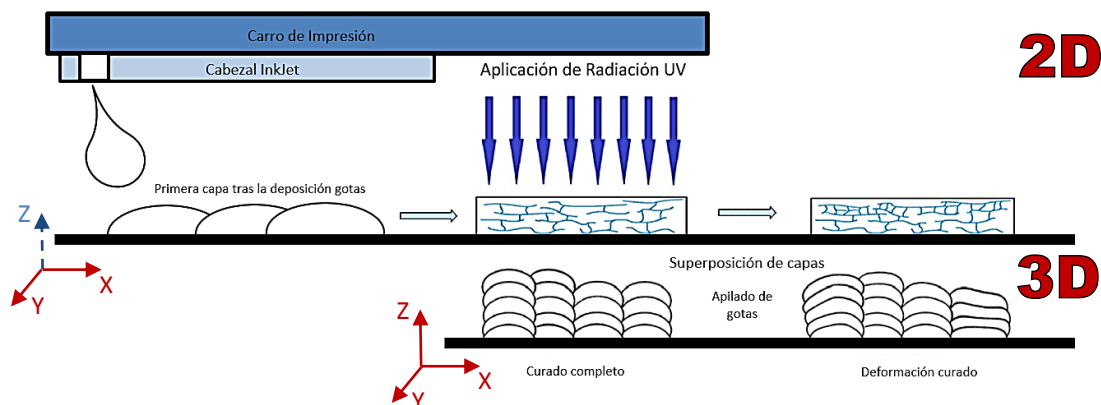


**Figura 76:** Representación esquematizada de la generación de los depósitos continuos (a) o discretos (b) en cuanto a propiedades cromáticas que constituyen y conforma a un vóxel

[Fuente: elaboración propia].

Los sistemas Inkjet por otra parte, por lo general requieren de fluidos poco viscosos afín de facilitar su eyección, lo que en principio limita el rango de materiales utilizables, pero a su vez y sobre todo cuando su uso es destinado a sistemas de impresión tridimensional debido

a que el proceso requiere de altas velocidades de deposición, necesitan que las solidificación de éstas, las gotas, sean rápidas sin importar el mecanismo que utilice la tinta para el cambio de fase, ya sea por temperatura, por reacción química o por radiación lumínica. De manera que el material no ha de poder evolucionar en cuanto a locación una vez han impactado en el sustrato (o lo menos posible), así como también una vez finalizada la capa que éstas generan, ha de poder sostener el peso de las capas posteriores afín de que estas no se aplasten, modificando o incluso llegando a colapsar la geometría a reproducir. Es por ello que en el caso de tintas poliméricas se busca un elevado grado de conversión en cada capa a bajos tiempo de exposición, afín de que las cadenas poliméricas formadas ofrezcan una rigidez lo más próxima al estado final del objeto ya que por lo general estas piezas no requieren de postratamientos de curado. De esta forma mediante la deposición de materiales en forma de gotas líquidas, capa a capa va configurando los vóxeles que a su vez constituirán la geometría a reproducir.



**Figura 77:** Principios de la reproducción de objetos tridimensionales basados la tecnología Inkjet y representación esquemática de la generación de un vóxel con la problemática de la deformación, consecuencia de una conversión insatisfactoria de las tintas poliméricas.

[Fuente: elaboración propia].

Como se puede apreciar en la figura anterior, la generación de los vóxeles se realiza mediante la superposición de capas generadas de la misma forma en la que se generan las imágenes bidimensionales reproducidas en este caso, inicialmente sobre la plataforma de construcción y posteriormente sobre las capas previamente impresas. De modo que en principio, el proceso radica en el control de la eyección discreta, de la trayectoria y de la deposición precisa de las materiales respecto a los ejes X,Y de una base ortogonal cuyo origen es fijo, y tras esto, en el control del depósito generado, evolución de su locación y de sus propiedades tras el cambio de fase, etc., para finalmente, tras repetir la secuencia de pasos anteriores a distintas alturas introduciendo la coordenada Z al proceso, reproducir la geometría tridimensional deseada. Por otro parte, es importante resaltar la dificultad de programación de los vóxeles, en cuanto a la capacidad cromática de estas, si bien en una imagen bidimensional está constituida por un conjunto de píxeles colocados matricialmente,

en una geometría tridimensional debe estar constituido por un conjunto de vóxeles que bidimensionalmente constituirán 6 imágenes distintas una por cada cara del píxel cúbico que en conjunto formaran las vistas del objeto, es decir; el alzado, la planta y el perfil más sus opuestos complementarios. De la misma forma éste concepto puede ser extrapolado en la combinación y graduación de cualquier otra propiedad que se quiera reproducir más allá de las cromáticas.



**Figura 78:** Reproducción digital de baja resolución del automóvil anterior mediante distintos vóxeles monomateriales dispuestos convenientemente, en los que se resalta las propiedades ópticas de éstos (opacidad, coloración y traslucidez) [124].

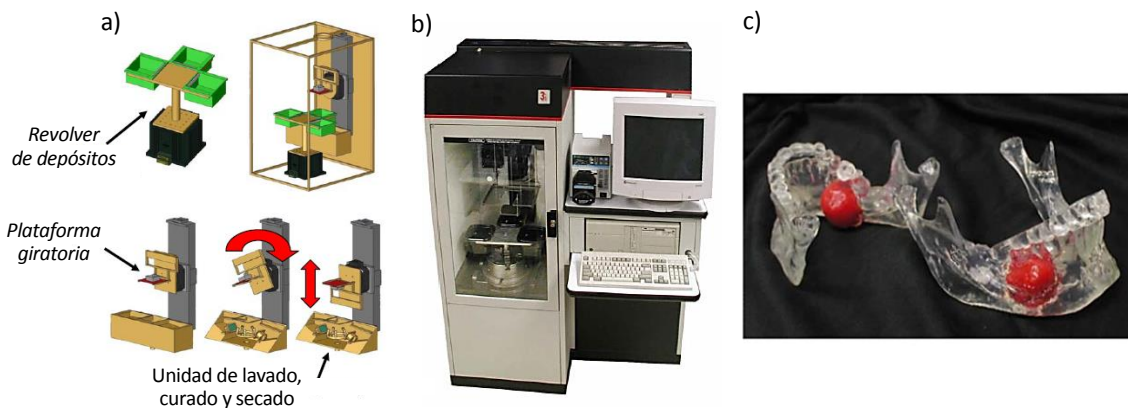
#### 1.4.3.5.3. Tecnología de aporte de material por lecho

Las tecnologías de reproducción de objetos tridimensionales donde el material de aportación se realizan por lecho, es decir mediante capas completas de espesor constante ya sean de polvo o de resina, también se han experimentado la necesidad de reproducir geometrías con múltiples materiales y colores. Las tecnologías SLA y DLP en este aspecto mediante el uso de múltiples cubas o depósitos cargados con materiales y colores distintos, han explorado la posibilidad de reproducir piezas multimaterial. Por otro lado, las tecnologías de lecho de polvo y en concreto los sistemas 3DP o MFJ (Multi fusion jet) mediante el uso de distintas tintas y distintos materiales en polvo también se han sumado en la búsqueda de ampliar las capacidades de estas tecnologías en cuanto a materiales y combinaciones de éstos en el objeto reproducido.

Por ser la tecnología pionera en la reproducción de objetos tridimensionales, la esterolitografía o SLA fue una de las primeras en combinar materiales por un lado cargando las resinas y creando composites y por otro mediante el uso de múltiples depósitos como se puede apreciar en la imagen de a continuación [128], [129]. Esquemáticamente mediante el proceso reiterado de sumergir la plataforma de construcción y solidificar la capa de resina más próxima a la superficie libre del depósito, las geometrías de las piezas tridimensionales eran y son generadas mediante esta tecnología, pero afín de reproducir objetos multimateriales y/o multicolor al proceso se le añadió la posibilidad de sumergir dicha plataforma en múltiples depósitos, pudiendo estar estos dispuestos de forma lineal, matricial o circular constituyendo un revolver, como es en este caso del ejemplo que se



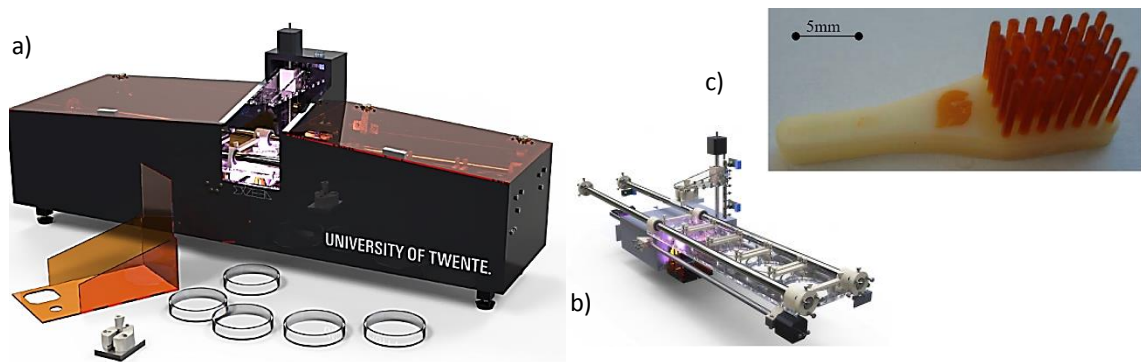
muestra en la Figura 79. De modo que, para reproducir digamos una primera capa constituida por dos materiales combinados, la deposición sobre la plataforma de éstos debe llevarse a cabo de forma separada, y afín de no contaminar la resinas fotosensibles de ambos depósitos en medio de ambas etapas las plataforma debe de pasar por un proceso de escurrido y secado.



**Figura 79:** Representación conceptual del sistema multidepósito implantado en una máquina de estereolitografía afín de reproducir piezas multimaterial y multicolor (a), Imagen de dicho sistema reproductor por tecnología SLA realizado por la compañía 3D System (b), y reproducción en dicho sistema de una mandíbula de un paciente de 15 años con el tumor resaltado en rojo (c) [128].

Este planteamiento permite ampliar la capacidad reproductiva de estos sistemas proporcionando la posibilidad combinar de múltiples materiales, pero por el contrario aumenta inmensamente la duración del proceso de reproducción, aproximadamente tantas veces como materiales o colores se ven requeridos en cada capa por el número de capas utilizadas en la reproducción del objeto. Por otro lado, las etapas intermedias de limpieza y secado limitan el tamaño mínimo de reproducción lo que a su vez imposibilita la capacidad de equiparar estos sistemas con el poder reproductor de los sistemas Inkjet en cuanto a la combinación de colores y/o materiales.

La tecnología DLP por otra parte, como hermana menor de los sistemas SLA también se ha visto inmersa en la necesidad de dotar a éstas la posibilidad de imprimir con múltiples resinas, presentando a su vez los mismos inconvenientes que su hermana mayor. Por otro lado y en este aspecto, a continuación se muestra a modo de ejemplo una impresora DLP desarrollada en Holanda en donde se combinan múltiples depósitos dispuestos en línea a través de una configuración Botton Up, de ésta forma proporciona al sistema posibilidad de imprimir con múltiples colores y resinas.



**Figura 80:** Imagen de una impresora DLP multimaterial de configuración Bottom Up y con múltiples depósitos, desarrollada por la universidad de Twente (a) y detalle de la estructura y disposición en línea de dichos depósitos (b) [130]. Pieza impresa mediante un sistema DLP similar al mostrado pero en este caso bimaterial (c) [131].

En cuanto a los sistemas de impresión donde el aporte de material se realiza por lecho de polvo, sus distintas tecnologías también se ha visto evolucionadas hacia la posibilidad de reproducir objetos con materiales de distintas propiedades y características asociadas a la posición. En este aspecto el desarrollo de la técnica se ve condicionada por la naturaleza o la forma en la que la energía que une las partículas de polvo es aportada.

En los sistemas fundamentados en la sinterización selectiva del polvo (SLS), debido a los distintos puntos de fusión que presentarían múltiples materiales y debido al gradiente térmico que en dicho proceso de sinterización se produce, limita y condiciona la posibilidad de combinar materiales distintos en estos sistemas, imposibilitando en muchos casos establecer límites discretos entre las capas a solidificar y las que no. Por otra parte, otro de los obstáculos que se presenta radica en el aporte del material, debido a que al realizarse por capas completas, imposibilita la subdivisión de éstas afín de reproducir el equivalente a una imagen píxelada por graduaciones y combinaciones de los materiales base.

Los sistemas de impresión en donde la unión de las partículas se realiza mediante la dosificación de aglutinantes (3DP, MFJ) al contrario de los sistemas anteriores, si permiten cierta modificación de las propiedades del material base utilizado de forma local. En este aspecto al ser los sistemas de 3DP una tecnología que combina el aporte de material por lecho con la particularidad de que el aporte de la energía se realiza por línea y siendo el concepto de línea una disposición de múltiples boquillas cuya elemento dosificado se realiza de forma discreta y a voluntad, no presenta limitaciones en la píxelización de las capas desde un punto de vista cromático. Por otra parte, al variar la cantidad y volumen de las gotas que recibe la capa de polvo por unidad de área junto con la combinación de distintas sustancias depositadas interaccionando con las partículas del lecho, permite también y a su vez, modificar las propiedades base de éste en cierta medida y no solo desde el punto de vista cromático. En las imágenes de a continuación se muestran distintas geometrías creadas a partir de azúcar en polvo usando un aglutinante comestible y pigmentado, como



ejemplo de la incorporación de propiedades cromáticas al elemento reproducido por estas tecnologías.



**Figura 81:** Piezas impresas comestibles usando chocolate o azúcar en polvo como material base (a) [132]. Cadena multicolor impresa mediante la tecnología MFJ utilizando polvo de poliamida como material base y bajo la adición de un aglutinante de mayor poder de unión y en una concentración mayor, imagen de un eslabón similar monocromático impreso capaz soportar el peso de un automóvil (b) [133].

Por otro lado, la tecnología MFJ desarrollada por HP (Hewlett-Packard), representa una evolución de los sistemas 3DP, en los que al involucrar los efectos de la temperatura junto con la radiación lumínica como catalizador del proceso aglutinador efectuado por el material depositado por los sistemas Inkjet, permite ofrecer al sistema una mayor versatilidad diferenciándola de la anterior. Pese a ello desde un punto de vista general mantiene las limitaciones propias de los sistemas de aporte por lecho ya comentadas en la tecnología anterior, junto con el condicionante de las dimensiones mínimas del polvo afín de reproducir piezas y detalles de dimensiones muy reducidas.

Finalmente cabe destacar que la tecnología LOM gracias a la incorporación de sistemas Inkjet con los cuales en un proceso previo al del corte y deposición de las láminas en este caso de papel, dota a estas (las hojas) la posibilidad pintarlas y con ello permite aumentar las capacidades de cromáticas del sistema de impresión.

#### 1.4.3.6. Aplicaciones de la tecnología PIJ dentro del printing electronics

La impresión funcional como ya se ha comentado es un concepto que engloba un conjunto de tecnologías aditivas en donde la función del elemento reproducido generalmente determinado por los materiales empleados, antecede a la acción de reproducción. Así pues bajo este concepto, los materiales toman el absoluto protagonismo. En el campo de la electrónica impresa las tintas funcionales pueden cumplir una función tanto pasiva como activa.

**Elementos pasivos.**

Imaginemos un mundo sin la electrónica, es a día de hoy cuanto menos difícil. Pocas tecnologías en la historia de la humanidad pueden rivalizar con el impacto que ésta, la electrónica, ha tenido. Conformando nuestra cotidianidad inmersa en casi todos nuestros actos.

Dentro de la electrónica como tal, el término elementos pasivos aglutina a aquellos útiles para el manejo y distribución de los electrones ya que no producen ganancia de estos. Se ha de decir que hasta la fecha, la vasta mayoría de estudios se centran en esta área, es decir, en la reproducción de elementos pasivos digitalmente, mediante la deposición de materiales funcionales más o menos conductores.

Entre los elementos pasivos por excelencia se encuentran los elementos conductores, en este aspecto las pistas conductoras de un circuito cualquiera son reproducidos mediante el empleo de tintas conductoras en su mayoría suspensiones, donde las partículas metálicas se encuentran inmersas en un medio fluido. Plata, cobre, oro y níquel son por su elevada conductividad y facilidad de sinterización los metales base más utilizados a tal fin. Por otra parte, en función de las características del sustrato y del elemento a reproducir existen una amplia variedad de tintas funcionales en el ámbito comercial con la capacidad de ofrecer conductividad eléctrica, como por ejemplo: tintas basadas en el óxido de indio y estaño (ITO, por sus siglas en inglés, Indium Tin Oxide) utilizadas en aplicaciones donde se requiere de transparencia y alta conductividad junto con elevado índice de adherencia al sustrato. O en donde a diferencia de todas las anteriores, se requiera de cierta flexibilidad y en este sentido aparecen tintas poliméricas como el PEDOT:PSS o Poli(3,4-etilendioxitiofeno)-poli(estireno sulfonato) capaz de ofrecer además de una cierta conductividad eléctrica una alta ductilidad. Tintas de grafeno o con nanotubos de carbono también pueden ser traídas a colación aunque para aplicaciones más exóticas, de elevado coste y por lo general centradas en la investigación.

En el caso de las suspensiones, no solo su composición química y su reología afectan a la eyectabilidad de las mismas por parte de los sistemas Inkjet. La forma, el tamaño de las partículas por lo general de escala nanométrica, y el material base de éstas, condicionan la conductividad eléctrica de los patrones reproducidos a través de ellas, así como también el sustrato y su interacción con él en función de las condiciones de impresión, el proceso de sinterización de las mismas tras la fijación de las partículas y la formación de los depósitos es a su vez también fundamental en la obtención de dicha propiedad eléctrica. En definitiva, alrededor de la reproducción de un elemento conductor mediante estas técnicas aditivas tienen lugar un conjunto de fenómenos en los cuales, un gran número de variables han de ser tenidas en cuenta y debidamente controladas. Por otra parte, cabe destacar que la reproducción bidimensional de pistas conductoras en sustratos que mediante la superposición de capas conforman un circuito multicapa, ha permitido la reproducción no

solo de circuitos sino también de bobinas, digamos pseudo tridimensionales (ver Figura 82), que mediante técnicas aditivas híbridas y como la que en la presente tesis a través del equipo Nhibrid32D plantea puede permitir que la fidelidad de las espiras que conforma a dicho elemento pasivo podrían verse incrementada.



**Figura 82:** Representación de una bobina vertical y horizontal reproducida mediante la tecnología thick film multicapa en donde el elemento conductor ha sido reproducido bidimensionalmente por un sistema Inkjet sobre un sustrato plano

[Fuente: elaboración propia].

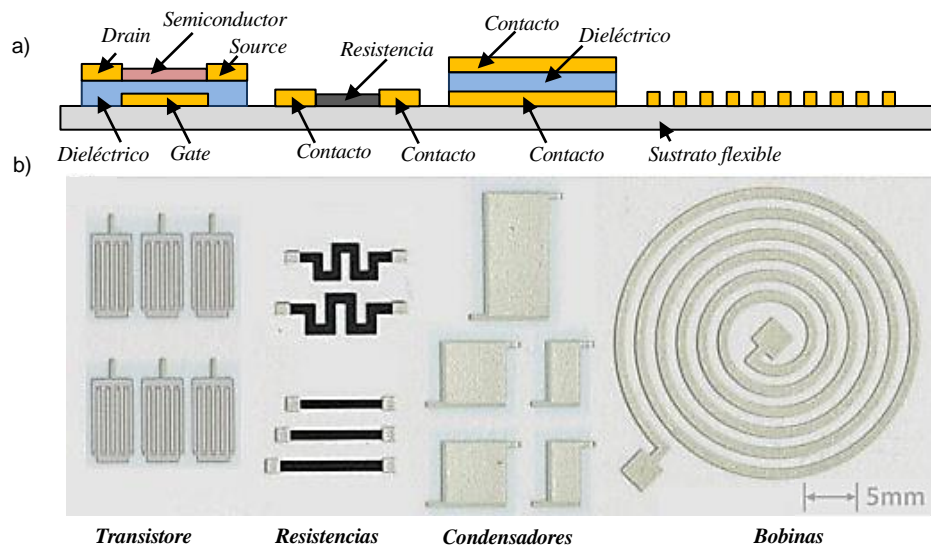
Continuando con los elementos pasivos, uno de los elementos pasivos reproducibles más básicos son las resistencias, que como su nombre los indica, surge de la oposición que ofrece los materiales que los componen, al paso de los electrones. La ley de ohm describe dicho comportamiento en donde un incremento de corriente supone un incremento proporcional de la caída de potencial entre sus bornes. Entre los parámetros que definen a estos elementos se encuentra su tolerancia (%) una medida de su variabilidad es decir, de su precisión, y por otra parte su coeficiente de temperatura ( $\alpha$ ) el cual representa una medida de estabilidad térmica, que cuantifica la variación de una propiedad física de un material respecto un cambio en la temperatura.

Pese a que el coeficiente de temperatura es una propiedad intrínseca del material debido a la variabilidad dimensional existente entre los sistemas de reproducción digital, ambos parámetros dificultan y condicionan la impresión de los mismos. El tamaño y dispersión de las gotas, las irregularidades del sustrato y las variabilidades propias del proceso de deposición, fijación de las partículas, formación de los depósitos y sinterización son algunas de las causas por las cuales la reproducción de las mismas al nivel alcanzado por otras tecnologías puede resultar complejo. Por otra parte, cabe destacar que en la reproducción de las mismas se utilizan tintas resistivas donde las partículas inorgánicas de la suspensión pueden ser altamente conductoras mezcladas con partículas moderadamente conductoras o aislantes, también se puede dar el caso en donde mediante la combinación de tintas se alcancen los depósitos con los parámetros resistivos deseados.

Los fusibles por otra parte, como elementos de prevención, debido a que en su versión más simple recurren a la geometría y a la reducción de la sección de un material conductor que lo conforma, puede ser visto como otro de los elementos pasivos susceptible a ser

reproducidos por estas tecnologías aditivas donde su versatilidad e ilimitaciones geométricas son su mayor baza.

Otro de los elementos pasivos presente en este campo son los condensadores, que constituidos por un par de superficies conductoras y separados por un material dieléctrico dichos elementos almacenadores de energía también son susceptibles a fabricados aditivamente. Aunque en la práctica debido a su actual nivel de sofisticación y el uso distintos materiales dificultan su reproducción que en superficies bidimensionales a menudo recurren a tres espirales interdigitadas a fin de optimizar su capacitancia (proporcional al área de los elementos conductores, la constante dieléctrica del aislante e inversamente proporcional a la distancia entre los conductores) o también recurren a un apilamiento vertical de múltiples capas, sea cual será la estrategia a seguir su reproducción solicita a menudo una alta precisión y repetitividad a los sistemas de impresión digital.



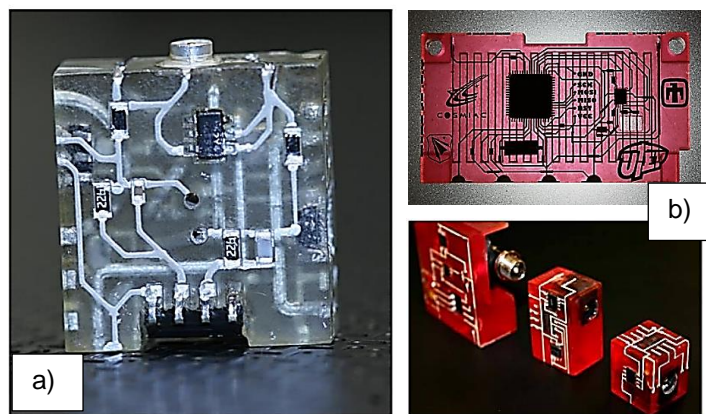
**Figura 83:** Representación de la sección transversal de múltiples dispositivos electrónicos impresos (a) y vista en planta de los mismos reproducidos sobre un sustrato flexible (b)

[134].

Finalmente entre los elementos pasivos hay uno que hemos dejado al margen y que en la actualidad constituye el corazón de todo dispositivo eléctrico o electrónico, las PCBs (del inglés Printed circuit board). Las placas de circuitos impresos tienen como finalidad establecer las conexiones entre los distintos elementos discretos activos o pasivos que constituyen a un dispositivo dándoles soporte físico. En la actualidad el tipo de aplicaciones que demanda la sociedad obliga a reducir cada vez más los componentes electrónicos e integrar sus distintos elementos de una forma más compacta, es por ello que las inicialmente rígidas y bidimensionales PCBs buscan evolucionar adoptando nuevas configuraciones, geometrías y utilizando nuevos materiales en este aspecto en el primer apartado del presente documento se aborda una tecnología que emergió con el fin de

aportar flexibilidad y un medio resistente a entornos hostiles basándose en el uso de la cerámica.

El desarrollo de sistemas de impresión tridimensionales que dentro de la impresión funcional permitiera el uso de múltiples materiales con la capacidad de reproducir tanto el sustrato como muchos de los elementos pasivos que los constituyen tendría mucho que aportar en este sentido, dotándoles a las PCBs no solo de una tercera dimensión, sino de la capacidad de cumplir una función estructural, ahorrando peso y espacio facilitando dicha integración heterogénea.



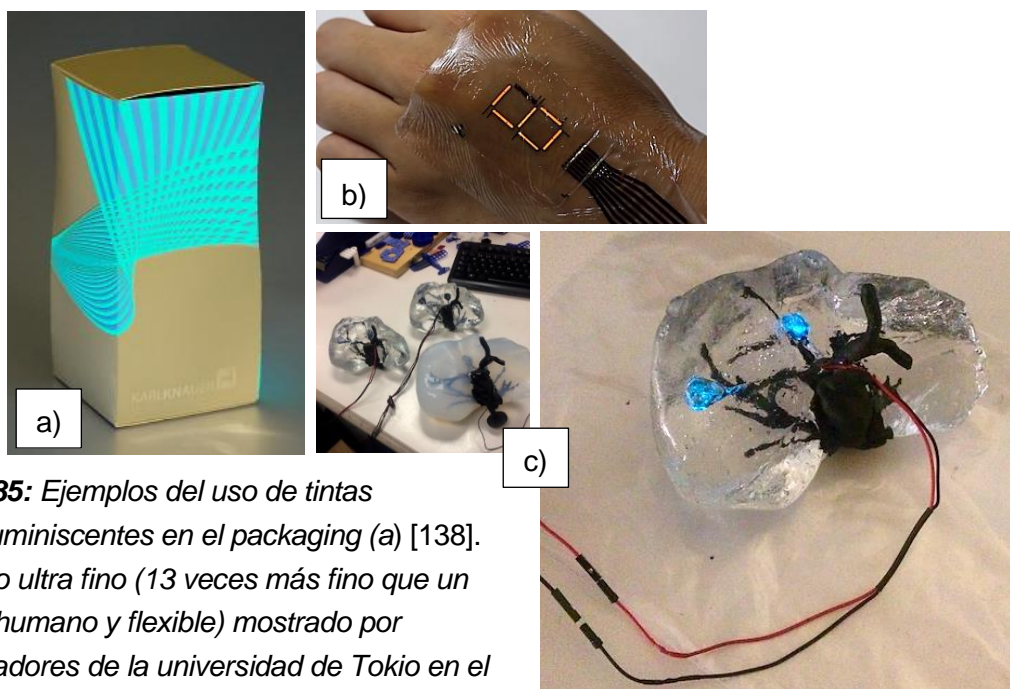
**Figura 84:** Dispositivo electrónico diseñado por ingenieros de la NASA, demostrador de la viabilidad en la combinación de la estereolitografía (SLA) con un sistema dispensador de tinta conductiva DIW (Direct Ink Writing) (a) [135]. PCB impreso tridimensionalmente y mediante el mismo sistema de impresión híbrido componentes electrónicos impresos para un satélite (b) [136], [137].

### Elementos activos.

Se espera que la electrónica adopte una presencia absoluta en nuestro entorno en un futuro próximo, estando en todas partes y a nuestros ojos en ninguna, inmersa en nuestra sociedad de una forma aún más omnipresente. En este sentido muchos consideran a la tecnología Inkjet como una de las tecnologías con el potencial de hacer de la electrónica de bajo potencial una más accesible, barata y generalizada. Por ser una tecnología capaz de reproducir de forma desatendida sin máscaras ni contacto y sobre cualquier sustrato, patrones mediante la deposición de un amplio rango de materiales ofreciendo con ello escalabilidad y permitiendo la fabricación en masa con una alta productividad y bajos residuos. Pero, para ello requiere del desarrollo de materiales imprimibles y capaces de, en combinación con otros, reproducir elementos activos y pasivos juntos. Anteriormente se han nombrado algunos de los elementos pasivos susceptibles a ser impresos basados fundamentalmente en el uso de tintas cuya función es la conductividad eléctrica, ahora en la reproducción de elementos activos además de dichas tintas otras ha de ser utilizadas con funciones distintas.



Entre los elementos activos susceptibles a ser impresos tenemos aquellos fundamentados en la propiedad electroluminiscente de las tintas empleadas. Recientemente la aparición de los tintas OLED (del inglés Organic Light-Emitting Diode) ha suscitado un gran interés en la fabricación de pantallas y displays tanto rígidos como flexibles. Sin embargo, cabe destacar que en la presente tesis y de una forma quizás un tanto rudimentaria, se ha intentado dotar a elementos reproducidos tridimensionalmente de la habilidad de emitir luz mediante la superposición de múltiples capas de un conjunto de tintas con distintas funcionalidades, las cuales además de transportar electrones y evitar su paso, también se ha añadido una capa que basada en una tinta de fosforo capaz de ante un campo eléctrico emitir radiación lumínica.

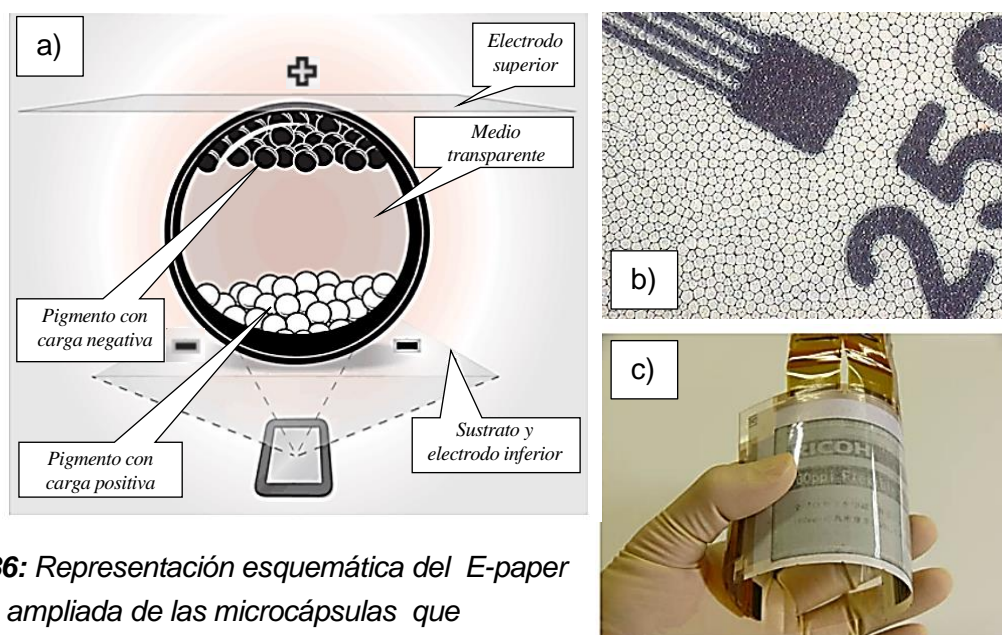


**Figura 85:** Ejemplos del uso de tintas electroluminiscentes en el packaging (a) [138]. Prototipo ultra fino (13 veces más fino que un cabello humano y flexible) mostrado por investigadores de la universidad de Tokio en el que se utilizan polímeros emisores diodos de luz (b) [139] e hígado de un paciente con metástasis cuyos tumores se resaltan a través de la luz que emiten (c) [Fuente elaboración propia].

De igual manera la reproducción de pantallas y displays basados en la impresión funcional requiere un mayor número de materiales lo cual aumenta su complejidad y dadas las dimensiones requeridas a día de hoy de estos dispositivos por otras técnicas, establecen un altísimo nivel de precisión en cuanto al posicionamiento de las gotas y volúmenes de estas, así como de los procesos de fijación de éstos materiales y curado de los mismos. En el este sentido se necesita de la superposición de al menos 4 materiales base para dotar a una superficie de la capacidad de emitir luz es decir; una capa conductora, una dieléctrica, un electroluminiscente y una conductora transparente, por lo general de ITO, son requeridos para cada color primario que constituye a un píxel, que volviendo al modelo reflexivo o

aditivo de las pantalla, éstas requieren de los tres colores primarios que las constituyen; el rojo, el verde y el azul (RGB). De modo que si añadimos un material encapsulante hablamos de la combinación de 7 tintas distintas para al menos ser capaces reproducir una pantalla digital, pese a ello existen importantes esfuerzos en dicho campo fomentado en principio por las necesidades actuales en la generación de pantallas y dispositivos flexibles.

Cabe destacar también que con el desarrollo del papel electrónico (E-paper), y el uso de las tintas especiales (E-Ink) fundamentadas en el fenómeno de electroforesis (el movimiento dentro de un fluido de partículas sueltas por influencia de un campo electromagnético), el desarrollo de estos dispositivos de consumo masivo se postula como uno de los principales motores habilitadores de la evolución de la impresión funcional.



**Figura 86:** Representación esquemática del E-paper (a), vista ampliada de las microcápsulas que constituyen la superficie de la cara vista del papel electrónicos (b) [140], Display electroforético flexible totalmente impreso [141].

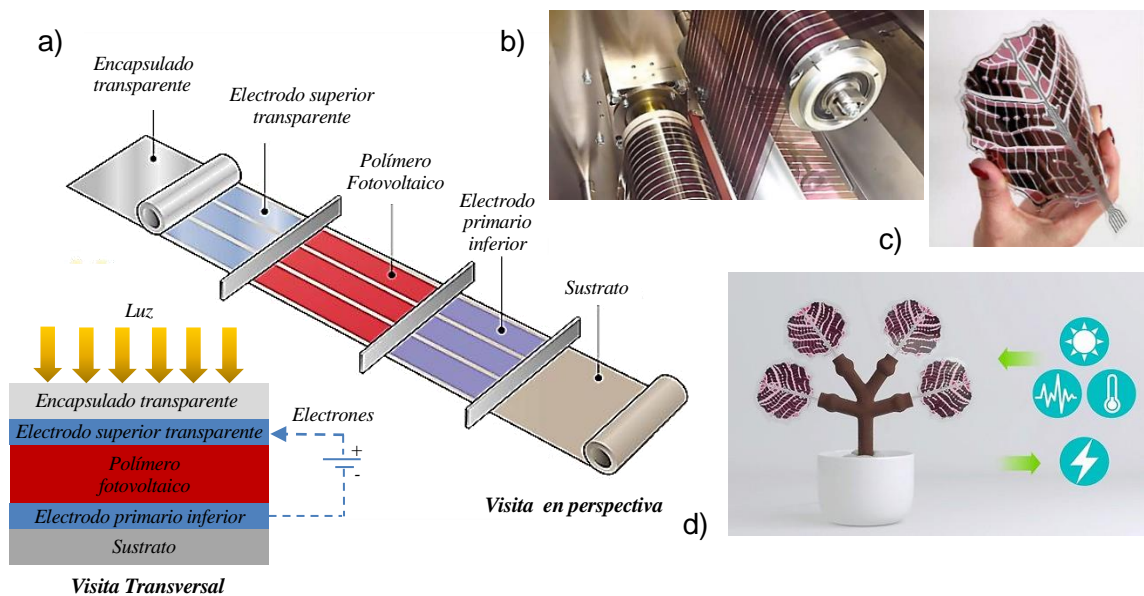
Pese a que la primera generación de libros electrónicos fuera un completo fracaso, la llegada de nuevas tintas y con ello el desarrollo de dispositivos más eficientes, vuelven a generar nuevas expectativas en un sector con un enorme potencial de crecimiento y en el cual ya se habla la inminente llegada del color. En cuanto al mundo de la impresión digital grandes esfuerzos se están llevando a cabo afín de dotar a esta incipiente tecnología un medio de reproducción rápido, barato y de alta versatilidad con la cual los libros, periódicos, revistas o incluso zapatillas y camisetas, pueden llegar a convertirse en interactivas.

Continuando con algunos los elementos electrónicos activos susceptibles a ser reproducidos mediante técnicas aditivas y el uso de materiales funcionales, también nos encontramos ante las aplicaciones basadas en materiales con propiedades fotovoltaicas.



Siendo el consumo energético uno de los parámetros que definen el grado de desarrollo de una región o país, y que éste a menudo se duplica al ritmo de crecimiento de su población. El desarrollo de sistemas de generación de energía limpios y eficientes se antoja como uno de los mayores retos a los que se enfrenta la humanidad en los años venideros. El potencial de la fotovoltaica en relación a dichas necesidades es incuestionable, aunque si bien a día de hoy los paneles de mayor rendimiento son costoso y de baja eficiencia.

El desarrollo de nuevos materiales y tintas con propiedades fotovoltaicas junto con sistemas de producción en masa basados en la impresión, resuenan como una asociación prometedora con el potencial de generar grandes superficies a muy bajo coste, con el cual hacer frente a las bajas eficiencias de estos mejorando la rentabilidad de los mismos.



**Figura 87:** Representación esquemáticas de una célula fotovoltaica impresa, vista frontal y en perspectiva de sus constituyentes (a) [142]. Imagen del proceso de fabricación R2R (b) [143] y panel solar flexible imitando aun hoja diseñado para imitar una hoja (c) e insertada en un tallo imitando un árbol (d) [144].

Al desarrollo de células fotovoltaicas flexibles e impresas, se acompaña la posibilidad imprimir dispositivos de almacenamiento de energía, como baterías y supercapacitores, lo cual a su vez surge como consecuencia del desarrollo de sensores impresos, autónomos, que desconectados de una fuente de alimentación son capaces de almacenar información y transmitirla, hablamos también de a través de las tecnologías aditivas reproducir diodos, transistores y con ellos memorias. En este aspecto, con la evolución de la sustancia depositada y la reducción de las limitaciones impuestas sobre los materiales imprimibles por parte de los sistemas PIJ ha permitido la reproducción de un gran número de aplicaciones electrónicas como la mostrada en la Figura 87, Baterías, supercapacitores basados en la celulosa acompañadas de tintas de grafeno o con nanotubos de carbono, así como también

diodos y transistores orgánicos ya son hoy una realidad. En este sentido, las tarjetas de identificación por radio frecuencia (RFID) son un ejemplo de ello.

Las denominadas tarjetas, etiquetas o transpondedores RFID, son un sistema almacenamiento y recuperación de datos remoto, cuyo propósito inicial es el de transmitir la identidad de un objeto mediante ondas de radio. Entre ellas se diferencian las pasivas que no necesitan alimentación eléctrica (la señal induce una corriente eléctrica suficiente para operar el circuito integrado CMOS capaz de generar y transmitir la respuesta, generalmente su identificación) y las activas que si requieren alimentación y por lo tanto están provistas de una batería. A menudo estos elementos poseen una memoria (volátil o no), y a diferencia de un código de barras estas no necesitan una visión directa entre el receptor y el emisor. Por otra parte, se diferencian también según la frecuencia que utilizan para comunicarse con el receptor, condicionando así sus aplicaciones en función de su alcance.

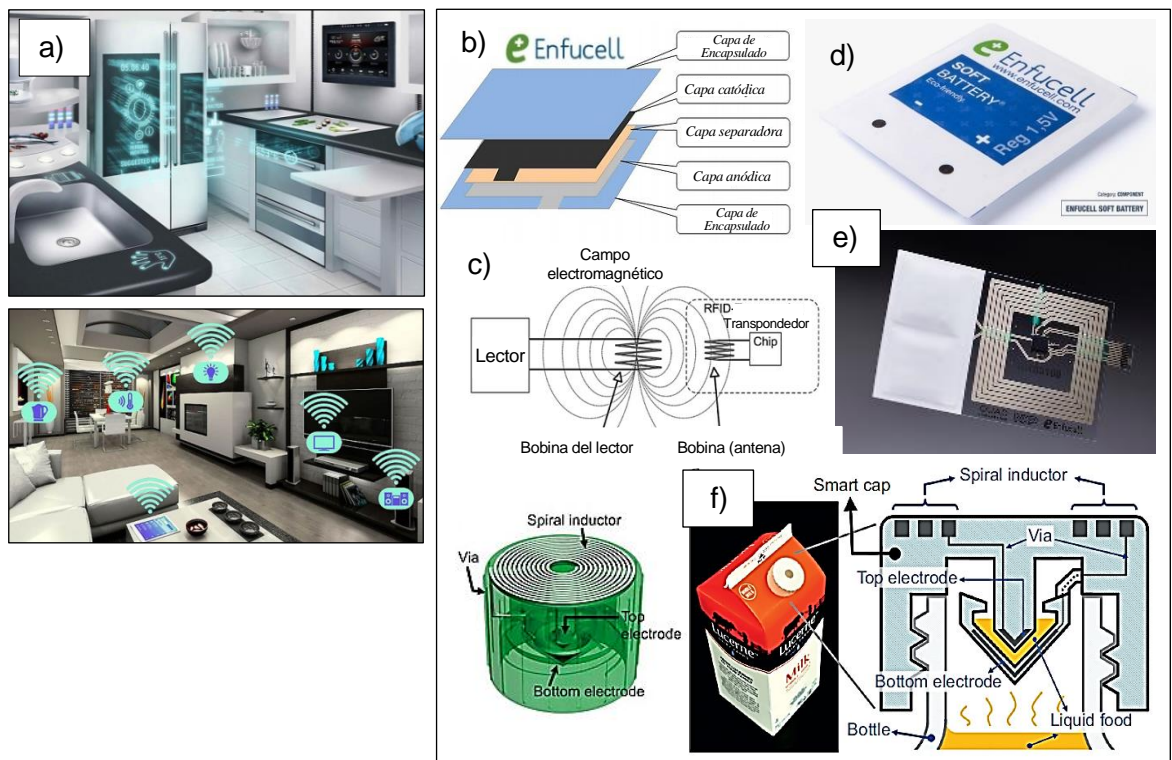
De manera que éstos dispositivos traídos a colación como un ejemplo exitosos de la implementación de las tecnologías de impresión funcional en nuestra cotidianeidad, se fundamentan en una antena reproducida sobre un sustrato, un chip de silicio y en algunos casos una batería. En los últimos 40 años el coste por transistor se ha reducido a tal punto que hoy en día están presente en una gran mayoría de productos de consumo masivo sin ello incrementa su coste, siendo la reproducción de la antena y la unión del chip al sustrato los procesos de mayor relevancia. Sin embargo, las necesidades de producción en masa a bajo coste de estas etiquetas inteligentes y amplia variabilidad en cuanto a formas y dimensiones han hecho de ellas un elemento propio para la impresión por sistemas Inkjet.

Cabe destacar por otro lado que, debido a los tremendos esfuerzos realizados por investigadores en todo el mundo en el desarrollo de éstos dispositivos, en los últimos años han surgido una gran cantidad de sensores basados a esta tecnología y en relación a la fabricación aditiva, la integración de antenas de radiofrecuencias tridimensionales y embebidas en geometrías tridimensionales son a día de hoy un campo de sumo interés, a continuación en este sentido se muestran algunos ejemplos.

Entre las aplicaciones más corrientes de estos sistemas tenemos el acceso y la inmovilización de vehículos. Desde el 1994 se empezó a utilizar este sistema alojado en la llave donde se gana en comodidad al no necesitar contacto físico lo que lo hace más a su vez más rápido de usar. Posteriormente han aparecido aplicaciones asociadas al correo, cartas, paquetes etc., donde la posibilidad de identificación de múltiples elementos a la vez y sin contacto supone un enorme ventaja, a continuación se filtró equipajes aéreos y hoy en día están presente en las etiquetas de la ropa y en múltiples productos de consumo masivo. Como posibles aplicaciones futuras, se planea mediante el marcaje total de todos los productos; pongamos como ejemplo productos del supermercado, que tras la correspondiente identificación mediante estas etiquetas, se pretende alcanzar el inventario automático, la distribución automática de mercancías identificadas e imposibles de robar y

que a su vez estando dotadas de sensórica, conocer su estado, su cercanía al vencimiento, de cara al cliente si se encuentra en promoción, ofertas etc., en incluso de forma remota conocer el valor a priori de la compra y la anulación completa de los cajeros, estableciéndose un nuevo método de pago, al salir de establecimiento simplemente por ejemplo.

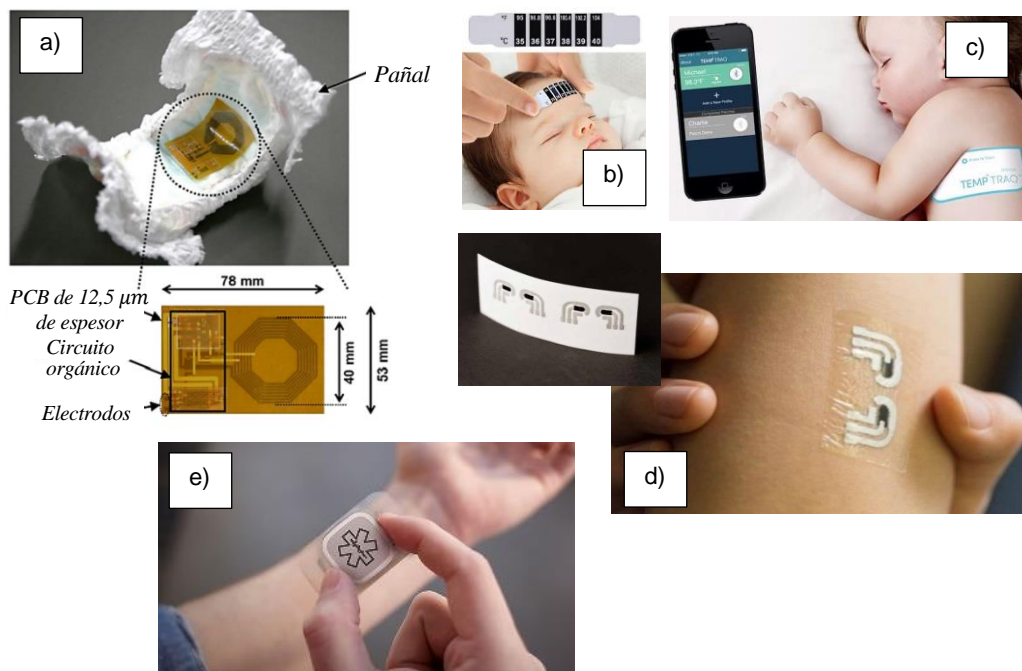
Imaginemos un mundo donde un producto perecedero por ejemplo un yogurt, que por estar próximo a su caducidad es promocionado afín de reducir al máximo las existencias y por ende no tener que desecharlo, cuando ahorro supondría para los grandes supermercados anualmente y lo que es más cuanto supondría el beneficio en conjunto con la sociedad dicho control, ciertamente muy interesante. Sin embargo, esta incipiente realidad no está exenta de polémica, la implantación masiva de tarjetas y etiquetas de RFID plantea retos sin precedentes en cuanto la privacidad del individuo haciéndose muy fácil monitorizar los hábitos de cada uno, un ladrón que podría conocer el valor de los elementos existentes en una casa sin ni siquiera entrar en ella. En este aspecto tras los atentados de 11S en Estados Unidos, éste país implanto un pasaporte con etiquetas RFID, que ha contribuido a aumentar la polémica al respecto, solo el tiempo decidirá el éxito de estas tecnologías.



**Figura 88:** a) Inmersión de la electrónica en los objetos cotidianos en donde la impresión se postula como una de las tecnologías habilitadoras del internet de las cosas, ejemplo de un hogar interconectado [145], [146], b) Representación esquemática de una batería reproducidas mediante screen printing [147], y b) esquema de un sistema RFID. c) Imagen de una batería impresa [148] y e) dicha batería inmersa dentro de una tarjeta NFC [149].

Finalmente, f) tapón inteligente impreso en 3D con la capacidad de detectar el mal estado de la leche y transmitirlo por radio frecuencia [150].

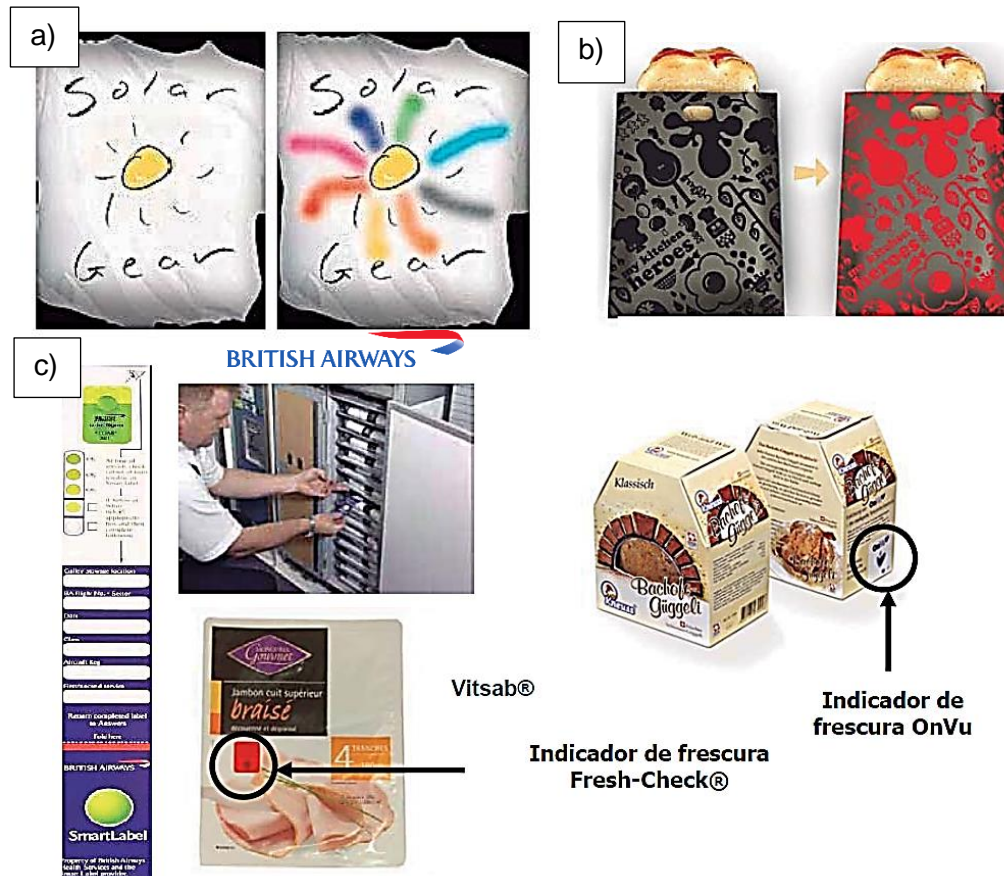
Continuando con esta línea, los sensores como herramientas de monitoreo juegan un rol cada vez más importante en nuestras vidas también, ya sea con fines preventivos o de cualquier otro tipo, su presencia aumenta día a día en multitud, aplicaciones y campos como; en la medicina, biología, farmacia, cosmética, seguridad, transporte, energía, packaging, etc. Basados en el uso de materiales funcionales, estos pueden detectar variaciones en la humedad, en la luz, en el pH, mediante el uso de materiales piezoeléctricos y piroeléctricos. en la presión y en la temperatura, entre otros. A menudo dichos sensores vienen acompañados por antenas que mediante un sistema de radiofrecuencia permiten la comunicación de sus mediciones a un receptor, como hemos podido apreciar anteriormente, en otros casos simplemente inmersos dentro de un elemento surgen como chivatos ante un estímulo externo. Recurriendo a propiedades ópticas, es el caso de uso de tintas fotoactivas en camisetas por ejemplo, en concreto fotocromáticas con el objetivo de proteger al usuario ante una exposición UV excesiva (ver Figura 90), o termocrómicas en envoltorios con el fin de evitar quemaduras, la frescura de un alimento, conocer si se ha roto la cadena del frío en alimentos perecederos o en fármacos, etc., lo cierto es que todo indica que presencia de estos elementos de monitoreo, control y prevención no pararán de aumentar con el objetivo de hacernos la vida más segura.



**Figura 89:** Distintos ejemplos de la impresión funcional en la reproducción de sensores. Pañal inteligente para la monitorización del bebe desarrollado por la universidad de Tokio dotado de múltiples transistores y diodos orgánicos (a) [151]. Termómetro adhesivo impreso disponible actualmente a muy bajo coste en ebay (b) y una versión más evolucionada de la



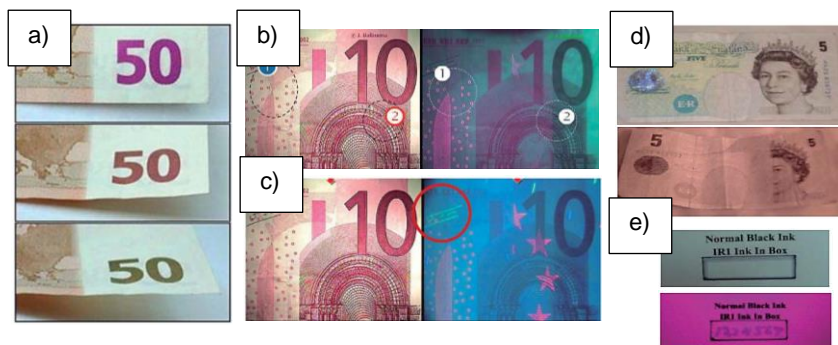
misma con la cual monitorizar de forma inalámbrica por 24h a través del móvil al bebe (c) [152]. Finalmente tatuaje temporal capaz de monitorizar los niveles de glucosa a través de la superficie de la piel (d) [153] y wereable adhesivo para el control de los ataques de epilepsia mediante la monitorización de actividad eléctrica muscular (EMG) durante las convulsiones (e) [154].



**Figura 90:** Ejemplo de una posible aplicación en wereables de las tintas fotocromáticas (a), uso de tintas termocrómicas en envases como elemento de prevención (b) y empleo de las mismas en el desarrollo etiquetas inteligentes e indicadores de frescura (dispositivos TTI: Time temperatura indicator) (c) [155].

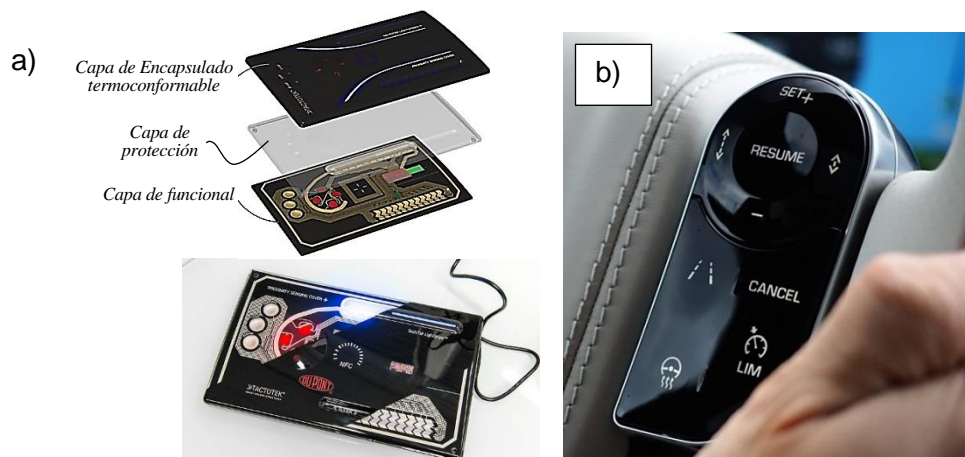
Entre los máximos exponentes de la impresión funcional cabe destacar por otra parte que se encuentran los billetes, pasaportes, documentos de identidad, etc. En la impresión del papel moneda por ejemplo, se aglutinan un gran cumulo de tintas, materiales, procesos y tecnologías afín de proporcionar al elemento reproducido la imposibilidad de su falsificación. Tintas ópticamente variables OVI (sus efectos ópticos exhiben un aspecto diferente según del ángulo de observación), tintas metaméricas (que se observan similares bajo una condiciones de luz (ejemplo de día) pero diferentes cuando se observan bajo otras condiciones (ejemplo bajo lámpara incandescente o fluorescente), tintas fluorescentes (poseen pigmentos que generan una emisión fugaz de luz bajo luz ultravioleta, tintas

transparentes o invisibles ante IR o tintas magnéticas por ejemplo son algunas de ellas empleadas a tales fines.



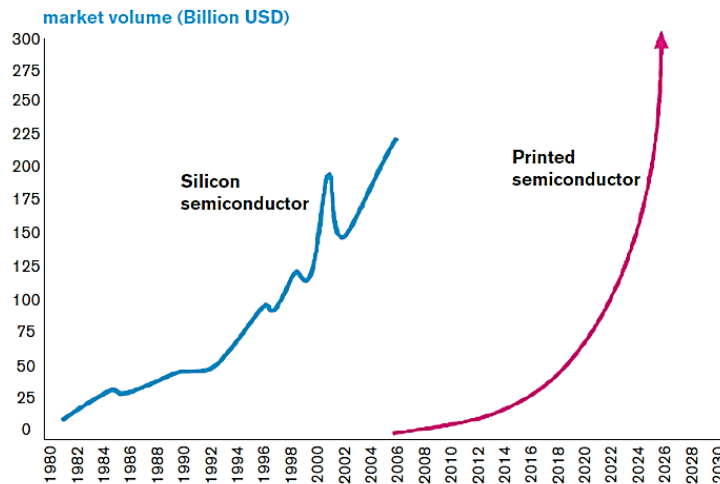
**Figura 91:** Tintas ópticamente variables (OVI) empleadas en un billete de 50 euros (a). Imagen de un billete de 10 euros bajo distintas condiciones de iluminación que hacen resaltar el uso de tintas metaméricas (b). Detalle fluorescente resaltado en el mismo billete bajo luz ultravioleta (c). Empleo de tintas transparente bajo luz infrarroja IR en un billete de 5 pounds (d) y finalmente ejemplo de tinta invisible bajo luz convencional y visible ante la exposición de IR (e) [155].

Finalmente cabe destacar también que el uso de estas técnicas aditivas en la impresión funcional también ha dado origen a otras aplicaciones, la plastrónica como algunos la llaman. En este campo se combinan los elementos impresos o no que cumplen una función electrónica con los procesos tradicionales de inyección y conformado del plásticos. Sus aplicaciones a día de hoy están centradas en el packaging, en la automoción y en aplicaciones donde se requiera el encapsulado de los elementos funcionales afín de proteger a estos. Algunos ejemplos son mostrados a continuación.



**Figura 92:** Combinación del termoconformado junto con el printing electronics en la fabricación de una carcasa funcional (a) [156]. Ejemplo de la integración de la plastrónica en el mundo automotor, evidenciándose la tendencia hacia la eliminación de interruptores, botones y mecanismos en el interior de los mismos (b) [157].

Desde un punto de vista económico, se espera que el mercado mundial del Printing Electronics (PE) alcance los 48 mil millones de dólares para el 2018 y en un horizonte temporal relativamente corto mantenga un elevado crecimiento alcanzando los 300 mil millones de dólares para el 2030, como se representa en la gráfica mostrada a continuación tomada de [158] en donde se compara la evolución de los semiconductores basados en el silicio con una evolución estimada de estos mediante el PE.



**Figura 93:** Evolución del mercado mundial estimada de los semiconductores impresos tomadas [158].

Dichas estimaciones se fundamentan principalmente en la destinación del printing electronics a la creación de dispositivos electrónicos de bajo rendimiento, en donde la capacidad de cubrir grandes áreas mediante las técnicas de impresión digital, permiten la fabricación de dichos componentes de baja sofisticación e integración de forma eficiente desde un punto de vista económico.

#### 1.4.3.7. Otras posibles aplicaciones de la tecnología PIJ

En apartados anteriores hemos visto como las impresoras anteriormente vistas como un elemento sustitutivo de las hoy arcaicas máquinas de escribir han dejado de reproducir textos, gráficos o imágenes sobre papel, ya no solo se le han dado una tercera dimensión o cuarta según algunos, sino que en su evolución ha dado origen a un enorme campo de aplicaciones y otras muchas por descubrir, lo que en definitiva generará nuevos nichos de mercado y potenciará el bienestar social. Así pues, afín de proporcionar una visión amplia no limitada al printing electronics y de las posibles aplicaciones de éstas tecnologías de reproducción, a continuación se abordan algunas otras aplicaciones alejadas del printing electronics, que si bien algunas de ellas pueden ser llamativas o simpáticas, evidencian el futuro próspero de dichas tecnologías.

A modo de curiosidad, recientemente han aparecido nuevas aplicaciones para las impresoras Inkjet en donde el fin último de las mismas poco o nada que ver tiene con la



reproducción de archivos digitales sobre papel. Un ejemplo de ello en el campo de la alimentación es la reproducción de imágenes sobre la espuma del café, o para algunos más presumidos el uso de estos sistemas en el pintado de las uñas.



**Figura 94:** Impresora para la decoración personalizada del café (a) [159] e impresora de uñas con WIFI (b) [160].

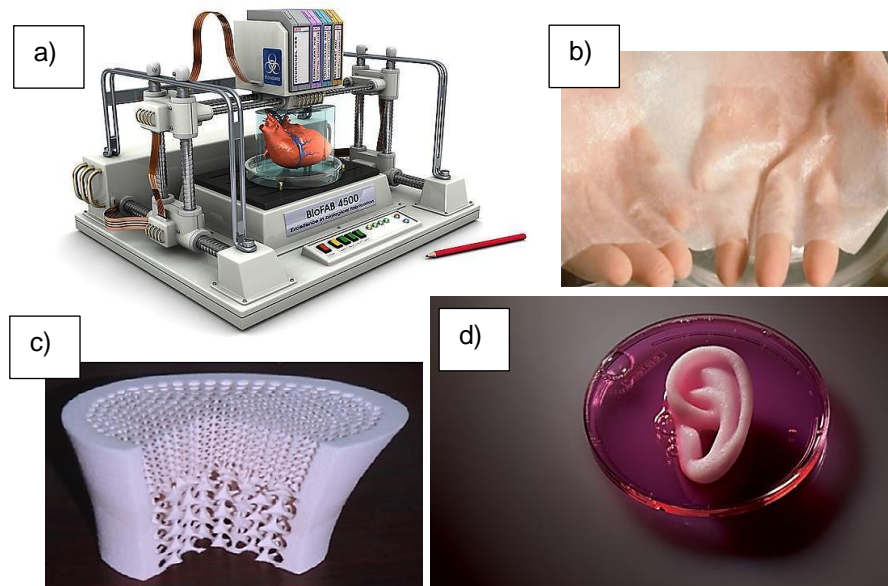
Por otro lado, términos como bioplotter, bioimpresión, ingeniería de tejidos son cada vez más habituales dentro del campo de la medicina y la biología, ya sea con fines regenerativos o en última instancia con el fin de reproducir tejidos vivos en un laboratorio y con ello órganos funcionales, son algunas de las aspiraciones que a día de hoy plantea la fabricación aditiva. En este sentido, la reproducción de estructuras tridimensionales personalizadas hasta el punto que dotadas de las propias células del paciente, las cuales bajo un flujo controlado de nutrientes y en condiciones controladas dan origen a biomoléculas absorbibles por el paciente sin rechazos, son algunas de las técnicas en las que médicos e investigadores trabajan, y en las que la fabricación aditiva por su capacidad de depositar materiales de forma precisas y a voluntad tienen mucho que aportar.

La gran evolución que ha experimentado los sistemas de impresión Inkjet dentro del campo de la electrónica impresa ha dado origen a una expansión de este sector a otros campos como hemos podido ver y en donde la sustancia impresa a menudo era una de las limitantes principales. Compañías como Fujifilm-Dimatix, Xaar, Seiko-Epson, capaces de disponer de cabezales y cartuchos accionados por piezoeléctricos con cientos o miles de boquillas llevan tiempo centrando su atención en este incipiente nicho de mercado, por otro lado empresas como Microdrop (Norderstedt, Germany), MicroFab (Plano, CA, United States) o Unijet (Sunghnam-si, Korea) ya ofrecen sistemas de dispensación de gotas mono-nozzle de bajo coste, pensados y diseñados para aplicaciones en laboratorio. Sin embargo cabe añadir,

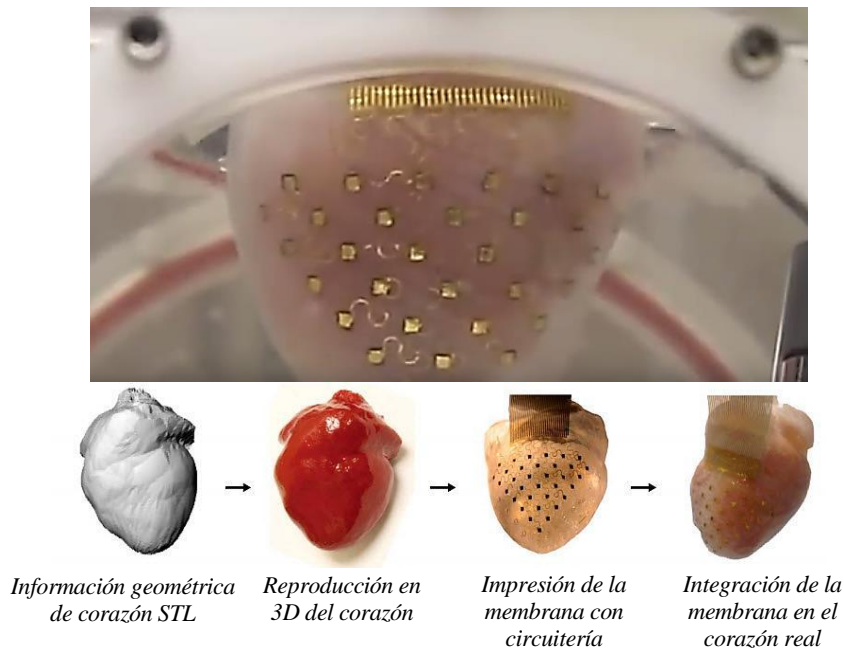
que aplicaciones en este campo mediante el uso de sistemas TIJ por parte de HP y Olivetti en el uso de biotintas también han sido llevados a cabo, aunque la necesidad de alcanzar temperaturas próximas a los 300°C para que se produzca la burbuja que en consecuencia generará la eyección del fluido limita sus aplicaciones. Así pues, la impresión Inkjet y dentro de ésta la accionada por piezoeléctricos, debido a su capacidad de esterilización y su versatilidad en cuanto a materiales se presenta como un de las tecnologías con mayor potencial en este campo, pudiendo reproducir grandes superficies de forma eficiente y precisa, y capa a capa multitud de estructuras tridimensionales mediante la combinación de múltiples materiales en distintas graduaciones.

Si bien este es un campo apasionante en donde debido a los tremendos esfuerzos que se están realizando día a día surgen novedades, con el fin de no ahondar en detalles a continuación se muestran algunos de los logros y aplicaciones que a día de hoy se han conseguido en laboratorios mediante el uso de éstas tecnologías aditivas en general, junto con el empleo de biotintas, biopolímeros, hidrogeles, suspensiones, etc., (ver Figura 95).

Por último cabe añadir que si bien el desarrollo de impresión la impresión funcional ha permitido el printing electronics y posteriormente el bioprinting, la combinación de ambos es también un campo sumamente fascinante y en desarrollo, en donde junto con la fabricación aditiva se aúnan la capacidad de reproducir dispositivos electrónicos y sensores dentro de elementos personalizados y biocompatibles, prótesis, ortesis pueden ser traídos a colación o incluso elementos intracorpóreos con la finalidad en definitiva, de mejorar la calidad de vida de su usuario (ver Figura 96).



**Figura 95:** Representación de un bioplotter imprimiendo un corazón (a) [161], material sustitutivo de la piel para pacientes con quemaduras (b) [162], estructura ósea impresa tridimensionalmente (c) [163] y reproducción del cartílago de una oreja mediante técnicas aditivas (d) [164].



**Figura 96:** Membrana flexible impresa dotada de la capacidad de monitorizar mediante sus múltiples sensores la actividad de un corazón vivo [165].

#### 1.4.4. Tintas y materiales susceptibles a ser impresos

No es el objetivo de esta tesis profundizar en demasía acerca de las tintas y materiales existentes en el mercado susceptibles a ser impresos debido a su extensión y variedad. Sin embargo, como elemento fundamental de la impresión funcional no podía ser obviado en el presente documento resumen del estado del arte. Por estos motivos, se ha considerado oportuno hacer una pequeña mención a ellos resaltando algunas de sus características y peculiaridades, que como veremos en el segundo capítulo para que dichos materiales en fase líquida sean susceptibles a ser depositados sobre un sustrato en las condiciones requeridas por los sistemas de Inkjet donde los volúmenes discretos de tintas salen de los múltiples nozzles a régimen de eyección, éstos (los materiales cuya función determinará el fin del elemento a reproducir) han de poseer unas propiedades y características reológicas particulares.

Como hemos podido apreciar en apartados anteriores existen múltiples tecnologías de impresión las cuales podemos dividir en dos; las convencionales de impacto donde existen contacto entre el master y el sustrato (litografía offset, flexografía y serigrafía son algunas de ellas) y los procesos de impresión sin impacto que a menudo definimos como digitales (las impresoras Inkjet pertenecen a este apartado, ver Figura 38). Las tintas por otra parte, debido a que se formulan en función de la tecnología empleada, ya que las solicitudes de éstas y los sustratos son muy variados.

En la tinta empleada en la flexografía por ejemplo, se formulan como un líquido de baja viscosidad y de muy rápido secado, para que esta pueda al penetrar en los poros del cilindro anilox y éste al transmitir la tinta a los rodillos en contacto con el sustrato, pueda reproducir generalmente sobre cartón o papel a altos volúmenes de producción los patrones e imágenes deseadas. La tinta de serigrafía, por otra parte, debe ser capaz de pasar a través de la plantilla de pantalla, por lo general son pastosas de rápida ruptura y de reología mantequillosa [166]. En cuanto a las tintas litográficas offset estas también son especiales y relativamente viscosas ya que se aplican en la misma placa de impresión en contacto con el sustrato y mediante la superposición de estas en una secuencia de rodillos se obtiene la reproducción deseada. En cuanto a las tintas empleadas en el huecograbado, éstas deben penetrar en las concavidades de los cilindros y liberar estas sobre el sustrato, dicha transferencias se produce a gran velocidad, lo que en consecuencia requiere de tintas muy fluidas mayores a las de las flexografía. Las tintas empleadas en los sistemas Inkjet son a menudo las que requieren de una fluidez mayor a todas las anteriores dependiendo de la tecnología empleada. En las CIJ (Continuous Inkjet) las tintas deben reaccionar a un campo eléctrico mientras que en los sistemas DOD, las gotas son eyectadas simplemente por el desplazamiento que produce ya sean por el efecto térmico de una resistencia (TIJ) o la contracción de la cámara de bombeo (PIJ), lo que en definitiva se traduce en una de las formulaciones más simple, aunque se ha de destacar que han de ser muy fluidas afín de facilitar la ruptura de los chorros en régimen de eyección.

<p><b>Impresión offset:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Impresión debido a las diferencias de mojabilidad entre las superficies en contacto, sistema indirecto de contacto.</li> <li>- Tintas de alta viscosidad de 40 a 100 Pa.s.</li> <li>- Capas delgadas de 50 <math>\mu\text{m}</math> con alta resolución.</li> </ul>
<p><b>Impresión Gravure o huecograbado:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de impresión directo y de contacto.</li> <li>- Tintas de baja viscosidad de 0.05 a 0.2 Pa.s.</li> <li>- Capas muy delgadas de 1 a 8 <math>\mu\text{m}</math> con alta resolución.</li> </ul>
<p><b>Impresión flexográfica:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de impresión directo y de contacto.</li> <li>- Tintas de baja viscosidad de 0.05 a 0.5 Pa.s.</li> <li>- Capas muy delgadas de 1 <math>\mu\text{m}</math> con alta resolución.</li> </ul>
<p><b>Serigrafía o Screen printing:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de impresión directo y de contacto.</li> <li>- Tintas de un amplio rango de viscosidades en función del material a depositar.</li> <li>- Capas gruesas de &gt;10 <math>\mu\text{m}</math>, baja resolución.</li> </ul>
<p><b>Impresión Inkjet :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de impresión sin de contacto, el tamaño de las gotas depende del material, el tamaño del nozzle y la forma de accionamiento.</li> <li>- Tintas muy poco viscosas de 1 a 20 mPa.s</li> <li>- Capas muy delgadas &gt;100 nm con alta resolución.</li> </ul>

**Tabla 4:** Resumen de algunas características de los procesos de impresión y sus tintas [167].

Tradicionalmente fueron formuladas con fines gráficos para proporcionar imágenes agradables o para entregar cierto mensaje, pero en la actualidad como hemos podido

apreciar, el estado actual de la tecnología de impresión requiere de tintas funcionales, es decir que son capaces de realizar ciertas tareas como conducir o bloquear el flujo de electrones. A menudo estas tintas han de ser compatibles con otras y con el sustrato para crear una funcionalidad específica, por otra parte suelen recurrir al uso de solventes cuando estas son suspensiones o cuando fundamentalmente son tintas poliméricas que después de ser depositadas pueden volverse hidrofóbicas y no aceptar la siguiente capa funcional.

Finalmente y otra categoría muy especial en cuanto a tintas viene de la mano de la impresión 3D, comúnmente con fines dentro del prototipado rápido. Dentro de ellas pueden aparecer tintas poliméricas fotosensibles y curables por UV, o tintas que a base de un termoplástico que se funden antes de ser depositadas y solidifican al contacto con el sustrato.

En general las tintas están constituidas por varios componentes principales tales como: pigmentos para añadir color, resinas o polímeros para dispersar el pigmento y llevar la tinta al sustrato donde debe ser anclada, y disolventes. En cuanto a las tintas fotosensibles, estas en la formulación suelen contener foto-iniciadores capaces ante un estímulo lumínico dar inicio a la formación de la cadenas poliméricas. La familia de tintas termofusibles por otro lado, que emplean polímeros termoplásticos no requiere disolventes pero si otros aditivos, como pueden ser ceras para mejorar su coeficiente de fricción. Entre otros de los aditivos que puedan estar presentes en las tintas según las tecnologías a la que vaya destinada, tenemos antiespumantes (tintas de base acuosa) y tensoactivos para favorecer la dispersión de los pigmentos o partículas inorgánicas que en ellas estén presentes, aunque en aplicaciones donde se requiera la coalescencia de las gotas depositadas, los dispersantes pueden afectar la funcionalidad de la mismas sobretodo en tintas conductoras.

#### **1.4.4.1. Componentes de tinta individuales**

##### **Pigmentos.**

Uno de los principales atributos del diseño gráfico es el color, a través del cual se puede resaltar un producto, ofreciendo mayor interacción con los clientes facilitando su comercialización por ejemplo. La sustancia en la tinta de impresión responsable del color es un pigmento o tinte. El pigmento es un material insoluble dentro de un vehículo, la dispersión de estas partículas es fundamental en el control del atributo crómico que se desea. Los tintes o colorantes por otra parte si son solubles en el vehículo aunque no son muy estables y se descomponen, de modo que la coloración ante una fuente de luz puede llegar a ser heterogenea con el paso del tiempo. Por ello, los pigmentos son actualmente los colorantes preferidos, éstos a su vez pueden ser clasificados según su composición química tales como inorgánicos y orgánicos, siendo los primeros más baratos y a menudo no ofrecen un color tan saturado como sus homólogos orgánicos y pudiendo también ser más abrasivos.

Los pigmentos inorgánicos más utilizados son dióxido de titanio, óxidos de hierro, hierro azul, amarillo de zinc o negro de carbono. Los pigmentos blancos, como el dióxido de titanio, aumentan el brillo de las tintas de color en las aplicaciones del packaging, éstas son depositadas como una primera capa sobre sustratos transparentes. En cuanto a los pigmentos orgánicos, se sintetizan del petróleo y gas natural entre otras muchas materias primas que contiene carbono. En la coloración de las tintas se emplean menudo para el color amarillo un pigmento en polvo llamado amarillo diarilado PY 12 ( $C_{32}H_{26}C_{12}N_6O_4$ ), para el color magenta es común utilizar un polvo rojizo llamado Litol-rubina BK ( $C_{18}H_{12}CaN_2O_6SCa$ ) o también conocido como PY 57, en cuanto al cian el pigmento azul utilizado suele ser el PB15 ( $C_{32}H_{16}N_8Cu$ ) también conocido como Ftalocianina de cobre o Azul ftalo de cobre. Finalmente en cuanto a las tintas negras, se usa por lo general los restos de algunos procesos de combustión, cuyo resultado se les conoce con el término negro de horno o de carbón.



**Figura 97:** Imagen de los pigmentos empolvo empleados en la fabricación de tintas CMYK y de su estructura química. Pigmento Amarillo PY12 (a), pigmento cian PB15 (b), pigmento PR48:1 empleado en el color magenta (c) y finalmente negro de carbón en polvo (d) [166].

Por otro lado, en el caso de tratarse de tintas para sistemas Inkjet los diminutos nozzles requieren de partículas muy pequeñas del orden de los 50-100 nm. Partículas más pequeñas contribuyen una mayor gama de colores, una mejor saturación del color y un mejor control de la viscosidad en ellas a su vez radica a menudo la dificultad y el elevado coste es estas tintas. Los pigmentos pueden ser catiónicos, aniónicos o no iónicos, hidrófilos o hidrófobos, en cuanto a su morfología éstas depende de proceso de obtención pudiendo ser muy variadas, desde esféricas hasta en forma de agujas. Tanto el tamaño, la

forma y como su regularidad son fundamentales y más aún en tintas funcionales donde las partículas muchas de ellas inorgánicas tienen un cometido más a la del color.

### **Polímeros / Resinas.**

Mientras que los pigmentos y colorantes aportan color a la tinta de impresión, las resina y/o polímeros son los vehículos que contienen a estos, los dispersan, transportan al sustrato y permiten tras liberar los solventes llevar a este último las propiedades finales que definen a la tinta flexibilidad, adhesión o brillo pueden ser algunas de estas.

Las resinas y los polímeros para tintas de impresión pueden ser naturales como la celulosa, el almidón, el caucho, la goma laca y otras resinas naturales, o pueden ser sintéticas provenientes de la química del petróleo tales como poliamidas, poliuretanos, acrilatos y otros polímeros de adición como polietileno.

En cuanto a las tintas a base de agua existen de dos tipos a saber, las que utilizan resina en solución y las que utilizan resinas en emulsión. Las primeras poseen cadenas cortas y se utilizan allí donde se necesite una agitación vigorosa de los pigmentos. Las segundas poseen cadenas largas y debido a su estado de emulsión no son adecuadas para mediante agitación dispersar los pigmentos, por otro lado no pigmentan en húmedo pero exhiben excelentes propiedades de secado. La presencia de ambas resinas en la tintas de base acuosa son necesarias y fundamentalmente en función de su formulación son las encargadas de impartir a las tinta tras el secado atributos como dureza, flexibilidad, resistencia al agua o brillo.

En la actualidad a consecuencia del desarrollo de la impresión 3D y a través de ella la capacidad de reproducir objetos físicos, se busca incrementar las propiedades físicas de éstos siendo necesario para ello aumentar las propiedades de las tintas dotándolas de nuevas funciones tras su secado, curado o solidificación. Por otro lado, otro de los objetivos es reducir el impacto ecológico de estos objetos reproducidos aditivamente, y en este aspecto el desarrollo de polímeros termoplásticos biodegradables cobra protagonismo.

### **Solventes.**

Las antiguas civilizaciones descubrieron que la fermentación de la materia vegetal podía producir etanol de este modo aparecieron los primeros solventes como el aguarrás o trementina derivados de fuentes como la madera o el mismo etanol derivado de los licores como el vino. Este último mucho más parecido al agua en muchas de sus propiedades resulto invaluable a la hora de disolver aceites y resinas. En este sentido lo ideal sería que todas las tintas utilizaran un solvente universal pero dicha situación no se cumple, el agua es el elemento que más se asemejaría a dicha función por disolver más sustancias que cualquier otro producto químico, sin embargo esta no es capaz de disolver cada producto químico, el aceite por ejemplo. El carácter polar de la sustancia lo impide, así pues existen básicamente solventes polares como el agua y algunos alcoholes, que disuelven sustancias



cuyas moléculas son polares como sales o polímeros con cualidades hidrofílicas (resinas acrílicas utilizadas en las tintas) y solventes apolares que disuelven sustancias cuyas moléculas carecen de polo positivo y negativo tales como grasas y otros compuestos orgánicos. Los hidrocarburos líquidos son un ejemplo común de solventes no polares empleados en la disolución de resinas no polares.

Cabe destacar que las tintas curables por UV no contienen disolventes en su formulación sino monómeros reticulables fluidos, que polimerizan al ser irradiado por luz ultravioleta sosteniendo a los pigmentos en su interior y sobre el sustrato. Las tintas de fusión en caliente tampoco utilizan solventes, ya que por utilizar polímeros termoplásticos los efectos térmicos hacen que estos fundan proporcionando la reología necesaria para su uso, actuando así como un disolvente en el momento de la impresión, sin embargo el uso del solvente adecuado disolvería las mismas. En este aspecto los requisitos de determinan a un buen solvente podrá decirse que son:

- La capacidad de disolución de la resina/polímero.
- La capacidad de disolución y/o degradación del pigmento.
- La velocidad de evaporación es compatible con las sollicitaciones del proceso de impresión.
- Proporciona la viscosidad requerida en las tintas.
- Es compatible con el sustrato.

Estas y otras restricciones como la influencia de los solventes en la tensión superficial de las tintas, o la interacción de éstas con otras o con partículas inmersas en las mismas, hace de la incorporación de solventes a las tintas, una tarea difícil que a menudo requiere de la combinación de varios de ellos.

### **Aditivos.**

Una regla empleada en la formulación de las tintas, es que éstas no contenga más de un 5% en aditivos [166], su presencia es común y numerosa en formulaciones de tintas, las cuales cumplen funciones específicas acordes con las características del proceso de impresión, por ejemplo, ceras para mejorar la fluidez y el coeficiente de fricción de las tintas termofusibles, o agentes humectantes para evitar la obstrucción de los nozzles en tintas Inkjet, mejorando la dispersión de los pigmentos. Estos últimos, los tensoactivos, disminuyen la tensión superficial de las tintas a base de agua, facilitando la adhesión de las mismas sobre sustratos porosos aunque en el caso de utilizar tintas funcionales donde la deposición ha de ser precisa y los cordones continuos, ésta disminución puede no ser conveniente. Las tintas a base de agua también emplean antiespumantes, otras en cambio emplean antioxidantes, fotoiniciadores y plastificantes, estos últimos buscan proporcionar flexibilidad a las tintas evitando la reticulación y facilitando la adhesión de las tintas a sustratos flexibles y problemáticos.

#### 1.4.4.2. Tintas para sistemas Inkjet

Las tintas empleadas en los sistemas de impresión digital sin impacto tienen propiedades especiales y distintas a las empleadas en otras tecnologías. Su característica más resaltante es su fluidez ya que han de ser eyectadas por diminutas boquillas sin obstruir estas (entre 1 y 20 cP) y con el menor rozamiento posible, además deben funcionar a rangos de temperatura muy variadas.

Las tintas empleadas para impresoras de oficina y domésticas se hacen principalmente de colorante soluble en agua, estas tintas basadas en colorantes, tienen colores brillantes y excelentes contrastes, son más económicas que las basadas en pigmentos y ofrecen una amplia gama de colores. Sin embargo, las tintas basadas en colorantes y tintes, tiende a perder color, a desvanecerse en el tiempo, y su velocidad de secado suele por lo general ser más lento (~100 veces) que las tintas que emplean pigmentos.

En las tintas Inkjet el espesor de las capas depositadas suelen ser de media micra aproximadamente, aunque dicho espesor varía dependiendo del tamaño de las gotas y el contenido en sólidos de la misma. El mecanismo de secado por otra parte, por lo general se fundamenta en la evaporación y en la absorción.

En cuanto las tintas a base de pigmentos se emplean en impresoras de alta gama, al ser más estables y de mayor duración, son adecuadas para aplicaciones exteriores donde su resistencia a la decoloración ofrece una vida útil más larga, aunque puede que en ellas la dispersión de los pigmentos tras el impacto puedan generar el fenómeno conocido como manchas de café, más evidentes en las tintas funcionales, donde las partículas inorgánicas tienden por los efectos dinámicos producidos en la deposición a alojarse en el contorno de la huella.

Cabe destacar que la tensión superficial de las tintas es otro de los parámetros fundamentales, siendo superior en típicamente en aquellas tintas a base de agua en comparación con las que emplean solventes, este parámetro junto con la viscosidad y las características del sustrato definen la idoneidad de las tintas en la calidad de la impresión que se desea alcanzar. El pH otro de los parámetros a tener en cuenta es importante sobre todo en tintas a base de agua y en la interacción con el sustrato.

Así pues como ya se ha comentado cada tinta se desarrolla de forma individual en función de las características y solicitaciones de la tecnología empleada, las tintas Inkjet no son una excepción, ya sean para sistemas CIJ o dentro de los sistemas DOD para TIJ o PIJ, éstas se desarrollan con características particulares. A continuación en la Tabla 5 se resume algunos de los elementos presentes en la formulación de las tintas a base de agua:

Constituyente	Proporción	Función
Agua	50-90%	Medio portador.
Pigmento/tintes	1-15%	Color.
Solventes/humectantes	5-50%	Mantener los nozzle sin obstruir mejorar la fluidez de las tintas.
Tensoactivos	0.1-2%	Mejorar la mojabilidad de la tinta.
Resinas	0.2-10%	Aumenta la estabilidad de la impresión. Aumenta el brillo de la impresión.
Elementos biocidas/fungicidas	0.02-0.4%	Control del crecimiento de microorganismos.
Agentes amortiguadores del pH	0.05-1%	Ajustes del pH
Agentes anticorrosivos	0.01-1%	Inhibe la corrosión
Total	100%	

**Tabla 5:** *Constituyentes genéricos en la formulación de tintas a base de agua [166].*

Las tintas curables por luz ultravioleta por otra parte, son cada más populares dentro de la impresión digital, el desarrollo de una nueva generación de fotoiniciadores les ha permitido ofrecer nuevas propiedades en las cuales podemos destacar: la no obstrucción de los nozzles, su rápido secado y baja ganancia de punto (crecimiento de la huella ya sea por mojabilidad o capilaridad), su alto brillo, resistencia a productos químicos y a la humedad, su elevada adherencia, etc. Ofrecen colores muy vivos en una amplia variedad cromática lo que se traduce en imágenes con detalles muy nítidos superiores a las tintas a base de agua. Estas tintas por otra parte, son fundamentales en la impresión tridimensional y extremadamente populares en la serigrafía. Por otro lado, en la actualidad son una excelente elección para embalaje e impresión de etiquetas y están reemplazando la impresión por transferencia térmica. En cuanto a su formulación éstas también resultan complejas y por lo general adaptada a las características y propiedades que se desean obtener en el depósito una vez curado.

#### 1.4.4.3. Tintas funcionales

En la mayoría de las tintas funcionales los pigmentos utilizados en las tintas gráficas o digamos con una funcionalidad cromática, son ahora sustituidos con otras partículas y/o materiales portadores de una funcionalidad particular. A modo de resumen podríamos decir que existen, tintas portadoras de materiales cromoactivos a través de los cuales aparecen las tintas termocrómicas (cambian de color con bajo la influencia de la temperatura), las tintas electrocrómicas (cambian de color a consecuencia de una corriente eléctrica) y las tintas fotocromáticas (cambian de color a consecuencia de una radiación lumínica). También existen tintas dotadas de materiales fotoactivos a través de los cuales aparecen las tintas electroluminiscentes (capaces de emitir luz ante un estímulo eléctrico), tintas fosforescentes (capaces de absorber energía almacenarla y posteriormente emitirla en forma de radiación) y las tintas fluorescentes (capaces de absorber energía en forma de radiación electromagnética y luego emitirla de la misma forma pero a distinta longitud de onda).

Existen también tintas dotadas de materiales electroactivos y en este grupo de tintas en donde se fundamenta la electrónica impresa, habiendo tintas, conductoras, semiconductoras y dieléctricas.

Las tintas conductoras pueden estar constituidas por nanopartículas inorgánicas constituyendo una suspensión generalmente de materiales metálicos tales como: plata, oro, platino, cobre, níquel, zinc, aluminio o también carbono. La plata es el material conductor más utilizado debido a su alta conductividad eléctrica y debido que su óxido también lo es. Sin embargo, estas tintas requieren de un período prolongado de curado a alta temperatura, lo que restringe los tipos de sustratos en los que puede imprimirse. Durante la sinterización de la misma, los aglutinantes y los estabilizantes se queman pudiendo aparecer junto con el fenómeno de las machas de café grietas debido a una contracción irregular de los depósitos de plata pudiendo estos romper la continuidad eléctrica de las pistas.

Las tintas de cobre por ejemplo suponen una alternativa de menor coste a las tintas de plata, pero a diferencia de éstas el óxido de cobre es aislante lo que obliga a esta a protegerlas encapsulándolas, porque si no irán perdiendo continuidad en el tiempo. Por otra parte, al igual que en las tintas de plata, éstas, las de cobre, también requieren del uso de altas temperaturas para su sinterización limitando sus aplicaciones. A parte estas tintas existen muchas otras que emplean otros metales como ya se ha comentado pero funcionalmente cumplen el mismo cometido transportar electrones con más o menos resistencia.

Por otro lado, recientemente también han aparecido tintas a base de polímeros conductores como el PEDOT:PSS o Poli(3,4-etilendioxitiofeno)-poli(estireno sulfonato). Estos polímeros a menudo poseen limitaciones debido a su baja conductividad eléctrica típicamente tres órdenes de magnitud por debajo de otras tintas aunque su conductividad puede ser aumentada mediante la adición de compuestos orgánicos, además son más difíciles de formular debido a la solubilidad de estos polímeros, su estabilidad y procesabilidad. La concentración de estos polímeros conductores suele ser baja típicamente entre el 1 y el 6% dando lugar a tiempos de secado mayores y espesores de capa muy finos que les permite ser transparente y con ello la posibilidad de ser utilizados en pantallas táctiles y papel electrónico en el que se intenta evitar el uso de metales raros que forman parte de compuesto como el óxido de indio y estaño (ITO, por sus siglas en inglés).

Cabe destacar también que en los últimos años han aparecido tintas dotadas de nanotubos de carbono y con partículas manométricas de grafeno. En cuanto a las tintas de nanotubos de carbono, el carácter conductor y semiconductor de estas, las hace especialmente útiles en el desarrollo y fabricación de tintas conductoras y semiconductoras siendo éstas últimas las que permiten el desarrollo de transistores impresos y células fotovoltaicas impresas entre otras cosas.

El grafeno por otra parte se presenta como uno de los materiales del futuro por sus sorprendentes propiedades; resistencia extrema, muy flexible y elástico, transparente, de alta conductividad eléctrica y térmica, gran ligereza, etc., su utilización en tintas es muy reciente y entre sus aplicaciones se encuentran: etiquetas inteligentes, supercondensadores, células fotovoltaicas, antenas, películas de revestimiento contra interferencias electromagnéticas (EMI), baterías, display y pantallas táctiles, entre otras. Al ofrecer una baja temperatura de curado o de sinterización las hace especialmente útiles para sustratos delicados, aunque actualmente son de un coste muy elevado.

Finalmente existe un tercer y enorme campo donde se espera que las tintas funcionales generen grandes contribuciones, dicho campo tiene que ver con la biomedicina, la biología, la ingeniería de tejidos y en definitiva con la bioimpresión.

Ya sea para construir estructuras tridimensionales duras, fibrosas, porosas o incluso gelatinosas, en donde contener células y de este modo en condiciones controladas generar biomoléculas o en definitiva para mediante la deposición controlada de biomateriales que puedan dar origen al autoensamblaje (en biología proceso de asociación espontánea de moléculas para conformar estructuras de gran tamaño, supramoléculas y éstas en combinación con otras generar estructuras celulares), la bioimpresión, los bioplotters y en concreto aquellas que al ser digitales y orientadas en el uso de una tecnología sin contacto, por deposición de gotas, ofrecen un enfoque muy prometedor por su capacidad de combinar materiales abarcando grandes superficies de forma eficiente y con altas resoluciones. El tamaño de los nozzles es un aspecto de estos sistemas a tener en cuenta ya que pueden ser muy variados y las células de algunos mamíferos por otro lado, también pudiendo ser desde unos micrones de diámetro para las células madre hematopoyéticas, hasta unos cientos de micrones para las células del músculo esquelético [168].

Sin ánimo de profundizar en dicho campo basta con decir que en cuanto a polímeros; los polímeros convencionales a menudo no son eyectables puesto que la viscosidad de los mismos aumenta con el peso molecular de ahí que se requiera el uso de soluciones diluidas, en la práctica estos materiales están enfocados a fines más industriales siendo el método más común utilizado para imprimir polímeros mediante tintas UV. Los biopolímeros deben considerarse en dos categorías, globulares y en espiral.

Los biopolímeros solubles en espiral incluyen a los polisacáridos solubles tales como alginatos (presentes en las paredes celulares de las algas marinas pardas), quitosano (un elemento estructural presente en el exoesqueleto de los crustáceos (cangrejos, gambas, langostas, etc), así como también en insectos, cuyas propiedades antimicrobianas y su capacidad de activar la hemostasia (conjunto de mecanismos capaces de detener los procesos hemorrágicos) aplicados en procesos de cicatrización de heridas han atraído una gran atención). Y diversas gomas; Polipéptidos solubles en agua tales como polilisina y poliglutamato; Y algunas formas de ADN. Dado que las impresoras pueden tolerar

soluciones acuosas estos polímeros pueden imprimirse fácilmente estando sujetos a las restricciones de viscosidad y tensión superficial únicamente, por otra parte utilizados en sistemas Inkjet plantean un excelente binomio para la reproducción de matrices de hidrogeles biocompatibles para la ingeniería de tejidos, la administración de fármacos y otras aplicaciones, sin embargo en algunos estudios se ha sugerido que los biopolímeros, proteínas y células presentes en éstas tintas, pueden verse dañados por el cizallamiento producido durante la eyección de las gotas a través de los nozzles debido a las altas velocidades requeridas.

En cuanto a las proteínas globulares, estas tienen una estructura esférica con un núcleo y una región externa más o menos hidrofílica, la hemoglobina por ejemplo es una de ellas. Este tipo de proteínas y algunas enzimas son relativamente vulnerables, tendiendo a desnaturalizarse ante superficies hidrófobas, así como contacto con el aire, por tanto las hace difíciles de imprimir, donde las principales preocupaciones se centran en el posible daño térmico que el calor de los sistemas TIJ puedan infligir a estos compuestos y a los posibles efectos que el cizallamiento durante la expulsión de gotitas pueda producir, así como la compresión que antecede a ésta. Los intereses principales en la impresión de proteínas globulares son inmovilizarlas en superficies para crear sensores y catalizadores, o para la administración controlada de fármacos proteínicos.

Así pues podemos decir que, en vez de tintas como tal en la actualidad en este campo se busca depositar compuestos la mayoría personalizados donde células cultivadas e inmersas en un medio eyectable se les unen otras moléculas funcionales como proteínas, en este aspecto gran parte de progreso en la formación de tejidos funcionales dependerá de la elección judiciale de algunos de estos elementos. Cabe destacar por otro lado, que muchas células necesitan de apego para no morir, es decir, de algo que las sustente, a las cuales puedan aferrarse y estas no se adhieren a la mayoría de las superficies de gel neutras y aniónicas, aunque dichas fijaciones pueden ser fomentadas mediante la modificación química y el uso de aminoácidos [168]. La información disponible acerca de los requisitos para la unión de las células incrustadas en matrices resulta compleja a opinión del autor debido a los pocos conocimientos en materia de biología y bioquímica, sin embargo apasionante, es posible añadir que en algunos estudios mediante el uso de proteínas fibrilares como la fibrina se proporciona un sustrato adecuado para dicha unión (En la sangre existe una proteína inactiva llamada fibrinógeno que en contacto con una enzima llamada trombina se transforma en fibrina, la cual actúa como pegamento entre las plaquetas que se exponen en alguna herida, manteniendo la costra pegada a estas, desempeñando un papel fundamental en los procesos de coagulación).

Siguiendo con este enfoque relativo a los sustratos en muchos de los estudios de impresión celular se recurre al uso de hidrogeles ya que permiten mantener a las células hidratadas, mientras proporciona epítomos activos para la unión celular (proporción de una macromolécula que es reconocida por el sistema inmunitario específicamente la secuencia

que se une a los anticuerpos) una segunda razón tiene que ver con sus propiedades mecánicas, las cuales evitan que las células se dañen durante el impacto producido en la deposición. Otros estudios han intentado depositar hidrogeles junto con células, sin embargo debido a su reología sólo concentraciones diluidas de colágeno y alginatos han podido ser impresas.

En cuanto a algunas aplicaciones centradas en la ingeniería de tejidos que como su nombre lo indica se enfoca en el crecimiento del tejido celular mediante la siembra de células en un medio de crecimiento en el laboratorio para su posterior implantación, existen muchas posibles aplicaciones exploradas pero en concreto podríamos decir que a día de hoy a saber, dos han sido exitosas. Las relacionadas con prótesis de piel para regeneración dérmica (combinación de biopolímeros y células) y otra familia de aplicaciones exitosas podrían ser vistas como, las derivadas del uso de válvulas de corazón porcino tratadas para reemplazar válvulas humanas dañadas en las que se usa tejido animal libre de células como un andamio.

De modo que, el desarrollo y la evolución de los sistemas de impresión Inkjet a día de hoy por su versatilidad se presentan como una de las tecnologías más prometedoras y con un mayor potencial en el campo de la construcción de estructuras biológicas en el laboratorio. La evolución de la sustancia impresa sin embargo, continúa siendo uno de los elementos limitantes y que más incertidumbres genera.





# Capítulo 2

## 2.1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 30 años la tecnología de impresión por inyección de tintas ha sido desarrollada para muchas aplicaciones desde marcaje y codificación de productos para su trazabilidad, pasando por impresión doméstica hasta la impresión gráfica de gran superficie, así como también con el desarrollo de la sustancia impresa la reproducción de elementos que cumplen una función más allá que la estética, nos referimos a elementos con fines eléctricos, electrónicos o incluso biológicos o farmacológicos, sin olvidarnos de la reproducción de objetos tridimensionales mediante tintas poliméricas. Estas nuevas aplicaciones no gráficas han evolucionado los sistemas de chorro de tinta requiriendo mayores velocidades de impresión, resoluciones más altas, el uso de materiales novedosos fuertemente cargados y con comportamiento no newtonianos en algunos casos, así como también una mayor fiabilidad. Ello en consecuencia ha requerido una mayor comprensión de la física implicada en la precisa manipulación de los chorros líquidos, así como la fenomenología envuelta en la generación, guiado y deposición de las gotas e interacción de éstas con los sustratos. Por otro lado, nuevas técnicas de observación, medición y análisis han fomentado dicha evolución.

Hoy en día nos encontramos familiarizados al uso de impresoras domésticas las cuales han transformado nuestra habilidad de reproducir textos, coloridos gráficos y fotografías de muy alta calidad. Esta capacidad de impresión se ha podido alcanzar mediante cabezales capaces de depositar matricialmente millones de diminutas gotas de tinta de color, del orden de picolitros de forma fiable sobre un sustrato, típicamente papel. Por otro lado, es consecuencia de la contribución de especialistas de múltiples disciplinas; ingenieros, químicos y físicos han aunado esfuerzos en este aspecto en las últimas décadas en la comprensión de la mecánica de fluidos, acústica, electrostática, óptica, imagen y color, química de las tintas, termodinámica de superficies e interfaces, micro-ingeniería, materiales, electrónica y programación, afín de desarrollar dichos sistemas de Inkjet.

En el presente capítulo de esta tesis se abordan algunas de estas disciplinas, aunque como ya se ha comentado anteriormente, el desarrollo de los cabezales queda excluido de la presente tesis. En concreto se intentará profundizar en la mecánica de fluidos, la termodinámica de superficies e interfaces, así como en la dinámica y el control de los desplazamientos de éstos como disciplinas fundamentales para el control de los sistemas de eyección, en cuanto a la generación y deposición de materiales en forma de gotas afín

de reproducir líneas y patrones. En este aspecto éste estudio ha sido necesario para poder comprender muchos de los fenómenos a los que nos hemos tenido que enfrentar en el desarrollo del equipo Nhibrid32D. Por otro lado, se ha considerado oportuno a modo introductorio hacer un repaso de algunos de los conceptos más fundamentales de la mecánica de fluidos.

Es importante resaltar que la ciencia en general está basada en un compromiso adecuado entre teoría y experimentación. Por ser la mecánica de fluidos una rama de la mecánica, dispone de un conjunto de leyes de conservación bien documentadas e impuestas por la termodinámica y que, por tanto, permiten su tratamiento teórico riguroso. Sin embargo, en algunas de las experiencias compartidas con expertos en el ámbito de estudio, son recurrentes las quejas en donde la teoría puede llegar a ser frustrante, en el sentido que en ciertas situaciones no ideales dada su complejidad, la cantidad de parámetros a tener en cuenta y las cantidades de disciplinas involucradas hacen de modelizaciones computacionalmente muy costosas y en algunos casos la precisión de los mismo cuestiona a día de hoy su validez. Por ejemplo, en cuanto a la interacción de los fluidos con geometrías complejas el tratamiento de los problemas mediante las aproximaciones de los métodos de la mecánica de fluidos computacional (CFD) se han podido resolver problemas de forma aproximada que, analíticamente mediante la teoría general del movimiento de los fluidos hubiesen sido imposibles dada su complejidad. Por otro lado, la evolución física y química de las propiedades de los fluidos eyeectables en el tiempo y el comportamiento de los mismos cuando no son newtonianos, siguen siendo hoy en día un campo de intensa investigación y en algunos casos, donde la modelización de dichos comportamientos descansa principalmente en la experimentación complemento natural y sencillo para la validación de la teórica.

### **Concepto de fluido**

Desde el punto de vista simplista, la materia sólo puede presentarse en dos estados: sólido y fluido. La distinción técnica radica en la reacción de ambos a un esfuerzo cortante o tangencial. Un sólido puede resistir un esfuerzo cortante con una deformación estática, un fluido no. Cualquier esfuerzo cortante en un fluido sin importar su magnitud provocara el movimiento del mismo y este se moverá y deformará hasta que dicho esfuerzo cese, es por ello que un fluido estático en ausencia de esfuerzos cortantes, en un análisis estructural mediante el círculo de Mohr éste se representaría mediante un punto (en el eje x cuya magnitud representa la presión) para todo plano de corte del elemento en cuestión (Hidrostaticidad). Así pues, un fluido es aquella sustancia que debido a su poca cohesión intermolecular carece de forma propia y se adopta a la forma del recipiente que lo contiene (gases y líquidos).

Por otro lado, existen sustancias aparentemente sólidas que resisten esfuerzos cortantes durante periodos breves de tiempo pero que se deforman presentando un comportamiento

fluido al paso de largos periodos de tiempo (por ejemplo; el asfalto). A su vez, también existen otras sustancias particularmente coloides y mezclas espesas que son capaces de resistir esfuerzos cortantes pequeños, pero se rompen a elevados esfuerzos cortantes y fluyen como fluidos. Dichos comportamientos se estudian en la reología (fluidos no newtonianos: donde la velocidad de deformación no es proporcional al esfuerzo cortante). Por último, si introducimos al sistema las variables la presión y en la temperatura, se ha de resaltar que la distinción clara entre las tres fases o estados de la materia (Sólido, Líquido y Gas) se difumina, situación que tiene lugar el punto crítico de una sustancia. Finalmente, se debe traer a colación que, en un sistema termodinámico más amplio nos podemos encontrar que coexisten mezclas bifásicas o trifásicas de sustancias distintas como en el mojado, donde tenemos una fase gaseosa, una fase líquida y una fase sólida separadas por interfases que tradicionalmente y por simplicidad se les considera como una superficie.

El motivo de esta aclaración radica en que, de fondo en presente tesis se plantea la utilización de los sistemas Inkjet para la deposición de un algo en alguna parte, haciendo uso de un medio líquido, como medio para transportar ese algo, en el cual radica la funcionalidad que se desea proporcional al elemento a reproducir, definido previamente por un archivo digital y en el cual a su vez se define la locación en donde dicha sustancia se habrá que depositar dentro del dominio xyz de dicho elemento reproductor (impresora)).

*Pocas veces nos paramos a pensar en la importancia y magnitud de los fluidos. En este aspecto, si el 70% de la superficie terrestre está cubierta por agua y el 100% de la misma está cubierta por aire. No es aventurado afirmar que todo lo que desarrolla movimiento en la tierra lo hace sumergido o rodeado de un fluido. Es por ello y debido a su complejidad que continúa siendo uno de los campos de la física clásica más activo.*

### **2.1.1. Fluido como medio continuo**

Como se ha comentado anteriormente los fluidos poseen poca cohesión intermolecular, es decir son agregaciones moleculares muy separadas en los gases y más próximas en los líquidos. La distancia entre las moléculas es mucho mayor que el diámetro molecular y las moléculas no están fijas en una red, sino que se mueven libremente. Es por ello que la densidad o masa por unidad de volumen, no tiene un significado preciso, pues el número de moléculas en el interior de un volumen cualquiera cambia continuamente. Situación que se ve solventada si la unidad de volumen es mucho mayor que el cubo del espacio intermolecular, ya que el número de moléculas contenidas en su interior permanecerá constante a pesar del intercambio de estas con el contorno de dicho volumen. Por otro lado, si el volumen escogido es demasiado grande, puesto que la densidad es una propiedad extensiva y por tanto ésta puede variar con la posición, la determinación de ésta mediante volúmenes muy grandes puede ser imprecisa. Así, tomando como ejemplo la densidad ésta se define de modo óptimo como:

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V^*} \left( \frac{\delta m}{\delta V} \right) \quad 3.1$$

Mediante la ecuación anterior podemos decir que en los problemas planteados a nivel ingenieril utilizan dimensiones muy superiores al volumen límite anterior ( $\delta V^*$ ) por lo que tanto la densidad puede considerarse esencialmente puntual y las propiedades de los fluidos como continuas en el espacio, es decir que debido a que  $V \gg \delta V^*$  y por tanto a nivel macroscópico, por mucho que reduzcamos el volumen éste podrá ser reducido aún más sin llegar nunca al volumen límite donde puedan presentarse variaciones discontinuas en sus propiedades.

Dicho esto, la mecánica de fluidos permite abordar los problemas de tres formas distintas, las cuales como se ha comentado anteriormente se fundamentan en el compromiso entre la descripción matemática del fenómeno, con la cual se pretende predecir el comportamiento de un fenómeno físico, y la experimentación con la cual se comprueba la validez las predicciones de la modelización descrita, lo que nos permite posteriormente dar paso a la simulación. De modo que, hay dos formas de describir analíticamente los problemas de la mecánica, el primero se denomina método descriptivo euleriano y el segundo descripción lagrangiana.

- a. La descripción euleriana no está ligada a la partícula, sino que analiza las propiedades y magnitudes de cada punto contenido en el volumen de control sin importar que posición ocupe la partícula en el instante  $t$ . Abordar los problemas de la mecánica de fluidos mediante esta descripción, requiere de un análisis integral del volumen de control, así como de la superficie de la misma, siendo una descripción muy útil en los fluidos y generalista.
- b. La descripción lagrangina en cambio sí está ligado a las partículas y por ende más propia de los elementos sólidos. Por tanto, puesto que en un sistema continuo infinitamente divisible podemos tener infinitas partículas a analizar. Abordar los problemas de la mecánica de fluidos mediante ésta descripción requiere el uso de ecuaciones diferenciales con las cuales debido a su complejidad se pueden resolver de forma analítica un número limitados de los fenómenos de la dinámica de fluidos pero mediante métodos numéricos computacionales (CFD) se pueden obtener resultados soluciones aproximadas a un número mucho mayor de fenómenos asociados a la dinámica de los mismos.

Por otro lado, tanto con el análisis integral como con el análisis diferencial (descripciones comentadas anteriormente), la mecánica de los medios continuos (fluidos, en este caso) establece que los flujos han de satisfacer las tres leyes de conservación de la mecánica:

1. Conservación de la masa.
2. Conservación de la cantidad de movimiento (segunda ley de newton).
3. Conservación de la energía (Primer principio de la termodinámica).

Es necesario resaltar también la existencia de la relación termodinámica entre los estados mediante la densidad donde:  $\rho = \rho(P, T)$  siendo P, T presión y temperatura respectivamente. De forma que en el planteamiento de las ecuaciones que describen la fenomenología asociada a la dinámica de los fluidos de la presente tesis se ha tenido en cuenta la clasificación de los flujos aportada por White [169] donde establece que éstos pueden ser: estacionarios o no, viscosos o no, incompresibles o compresibles y pudiendo estar en fase líquida o gaseosa.

- c. En cuanto a la tercera forma de abordar el análisis de un problema asociado a la mecánica de fluidos, ésta es experimentalmente y mediante el análisis dimensional, es decir, como se ha comentado anteriormente mediante las descripciones analíticas podemos estudiar un número limitado de fenómenos físicos que mediante métodos numéricos con ordenadores de gran capacidad de cálculo dichas limitaciones se ven drásticamente reducidas, pese a ello la experimentación sigue siendo en muchos casos el método más eficiente. Así la experimentación estudia y confirma las predicciones analíticas. Dichos resultados son expresados mediante un conjunto de tablas, gráficos, curvas y superficies las cuales establecen las relaciones entre las distintas variables que intervienen en el fenómeno físico analizado. De forma que, el análisis dimensional busca establecer las relaciones entre ellas afín de reducir el número y la complejidad de éstas.

Si un fenómeno depende de  $n$  variables dimensionales, mediante el análisis dimensional es posible reducir el problema, dependiendo ahora de  $k$  variables adimensionales donde la reducción es  $n - k = 1, 2, 3$  o  $4$  dependiendo de la completitud del problema. Siendo generalmente  $n - k$  el número de variables independientes (dimensiones básicas, fundamentales o primarias) que aparecen en el problema. En la mecánica de fluidos estas son por lo general: masa  $M$ , longitud  $L$ , tiempo  $t$  y temperatura  $T$ .

Supongamos por ejemplo que la fuerza que experimenta un objeto inmerso en una corriente se expresa como:

$$F = f(v, L, \rho, \mu) \quad 3.2$$

Es decir, la fuerza es una función de la velocidad del flujo, la longitud del cuerpo, la densidad del fluido y su viscosidad. Supongamos además que la geometría y las condiciones del flujo son tan complejas que ni con el análisis integral ni con el diferencial se puede alcanzar una solución satisfactoria. Si por lo general para describir una curva de dicha fuerza se requiere de un mínimo de 10 puntos necesitaríamos  $10^4$  experimentos con las cuales describir las relaciones de dichas 4 variables. Las técnicas adimensionales permiten rescribir la definición de la fuerza mediante el uso de agrupaciones adimensionales de variable con las cuales reducir la complejidad del problema. Por ejemplo, utilizando un coeficiente adimensional de la fuerza, expresable como:

$$\frac{F}{\rho v^2 L^2} = g\left(\frac{\rho v L}{\mu}\right) \rightarrow C_F = g(Re) \quad 3.3$$

Como se puede apreciar en la expresión anterior la cual se utilizará en este capítulo en el cálculo en la modelización de la trayectoria y comportamiento de la gota una vez expulsada del nozzle, define la dependencia de la resistencia al desplazamiento de un cuerpo en función del Reynolds donde  $g$  es una función diferente de  $f$  pero que contiene la misma información. De forma que, mediante la experimentación se puede determinar la curva  $g$  con solo 10 experimentos a diferencia de los 10.000 requeridos anteriormente. Ventajas: ahorro y posibilidad de extrapolar los resultados (Leyes de semejanza).

Como se podrá apreciar a lo largo de los siguientes apartados de este capítulo de la presente tesis en el análisis de los distintos fenómenos físicos que tienen lugar en el proceso de eyección, recorrido, deposición y reproducción de los patrones con las gotas líquidas, se han utilizados las distintas formas de abordar los problemas recurriendo desde el enfoque macro integral al enfoque micro diferencial, pasando por la adimensionalización de las distintas variables involucradas. A continuación, se enumeran las principales agrupaciones adimensionales de variables que han sido tenidas en cuentas.

### 2.1.2. Parámetros adimensionales

El número de Reynolds ( $Re$ ) es un número adimensional que puede definirse como el cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que actúan en un fluido. Dicho número o combinación adimensional de variables interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos y relaciona la densidad ( $\rho$ ), viscosidad dinámica ( $\mu$ ), velocidad ( $v$ ) y longitud típica de un flujo ( $\phi$ ). Dicho número aparece en muchos casos relacionados con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande). Esta agrupación adimensional de variables puede definirse como:

$$Re = \frac{\rho \phi v}{\mu} \quad 3.4$$

El número de Weber ( $We$ ) al igual que el anterior, éste también es un número adimensional utilizado en la mecánica de medios continuos, en este caso se compara las fuerzas inerciales con las fuerzas de tensión superficial que actúan en la interfaz entre sustancias diferentes. Así pues, el número de Weber es un valor de gran importancia en el análisis de flujos multifásicos como, por ejemplo; en la formación de gotas y burbujas, en la atomización de un líquido o en la mojabilidad de las superficies. En dicho número de Weber interviene la densidad ( $\rho$ ), la tensión superficial ( $\gamma$ ), la velocidad ( $v$ ) y la longitud típica de un flujo ( $\phi$ ), de modo que, este parámetro adimensional se expresa como:

$$We = \frac{\rho \phi v^2}{\gamma} \quad 3.5$$



El número de Froude ( $Fr$ ) este número o agrupación adimensional de variables establece la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitatorias, al igual que el  $We$  tienen importancia en flujos con superficie libre (multifásicos). Por otro lado, mediante el Reynolds y el Froude se puede clasificar el régimen del flujo en canales abierto, dicha agrupación adimensional se define como:

$$Fr = \frac{v^2}{g\phi} \quad 3.6$$

El número adimensional de Bond ( $Bo$ ) también conocido como Número de Eötvös ( $Eo$ ) representa el ratio entre las fuerzas másicas (generalmente gravitatorias) y las fuerzas asociadas a la tensión superficial de un fluido. Este número adimensional se define como:

$$Bo = \frac{\rho g \phi^2}{\gamma} \quad 3.7$$

El número de capilaridad ( $Ca$ ) representa el efecto relativo entre la viscosidad (fuerzas viscosas) y la tensión superficial que actúa a través de una interface entre un líquido y un gas, o entre dos sustancias inmiscibles, expresándose como:

$$Ca = \frac{\mu v}{\gamma} \quad 3.8$$

Por último, el número de Ohnesorge ( $Oh$ ) esta agrupación adimensional de variables establece el ratio entre las fuerzas viscosas, las fuerzas inerciales y la tensión superficial. A través de este parámetro podemos definir el comportamiento de una gota al impactar sobre un sustrato sin tener en cuenta su velocidad. Así, el número adimensional de Ohnesorge se define mediante la ecuación 3.9. Por otro lado, como veremos más adelante algunos autores han utilizado confusamente el inverso del número del Ohnesorge, es decir, el número definido como ( $Z$ ) y el cual se define en la ecuación 3.10.

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \phi \gamma}} \quad 3.9$$

$$Z = \frac{1}{Oh} \quad 3.10$$



## 2.2. EYECCIÓN DE GOTAS A PARTIR DE CHORROS

Como ya se ha comentado anteriormente, los sistemas Inkjet pueden clasificarse atendiendo al modo en que estos generan las gotas, pudiendo ser de forma continua (CIJ) o a voluntad (DOD). En este aspecto el funcionamiento de los sistemas continuos se fundamenta en los procesos de ruptura y desintegración controlada mediante excitación externa de chorros de tinta en estado líquido. Si bien estos procesos ofrecen una alta velocidad de generación de gotas permitiendo la reutilización de la tinta no depositada (en algunos casos requiere del aporte de parte del solvente evaporado) su utilización en el ámbito de la fabricación digital es menos extendida y siendo su complejidad mayor. Por otro lado, a pesar que en esta tesis la deposición de las tintas se realiza mediante un sistema Drop on Demand, en donde la generación de las gotas no se fundamenta en la desintegración de chorros sino en el aporte de inercia al fluido debido a la reducción del volumen de la cámara que lo contiene. La descripción y el tratamiento teórico de la fenomenología asociada a la ruptura de los chorros es importante en la comprensión del comportamiento del fluido tanto en la generación de las gotas en el sistema DOD utilizado, como en la fenomenología involucrada en la deposición de gotas adyacentes sobre el sustrato y en la capacidad de reproducir líneas y patrones estables.

Así pues, el proceso de formación de una gota en un flujo líquido descendente es un fenómeno que tiene lugar en muchos sistemas naturales, así como también en muchas aplicaciones ingenieriles, este interesante fenómeno ha sido objeto de estudio de numerosas investigaciones desde los inicios de la hidrodinámica. Desde un principio se conoció que la tensión superficial (energía libre existente entre dos sustancias no miscibles) es la propiedad que gobierna la formación de las gotas. En el siglo XIX el fenómeno fue descrito por Rayleigh [84], [170], [171], el cual estudio las perturbaciones de un flujo cilíndrico a diferentes longitudes de onda y distintas tasas de crecimiento, estableciendo que la formación de las gotas depende de manera crucial entre la inercia y la tensión superficial o lo que se conoce como número de Weber. Posteriormente, la teoría de la formación de gotas se refinó incluyendo la viscosidad [172], otros efectos no lineales [173], así como perturbaciones externas [174]. Por otra parte, el desarrollo de la fotografía, cámaras de alta velocidad y el uso de potentes herramientas de cálculo han proporcionado a los investigadores capacidad de estudiar con más detalle la fenomenología asociada a la formación de las gotas.

Por otro lado, aunque la formación de gotas puede ser observada experimentalmente y analizada, su descripción matemática resulta compleja, así la teoría de la formación de las gotas basadas en las ecuaciones de Navier-Stokes [175],[176],[177],[178]

requiere que las abordemos de forma gradual, por este motivo a continuación se exponen algunos conceptos generales y sus fundamentos.

### 2.2.1. Conceptos generales y fundamentos

En primer lugar, se ha considerado oportuno repasar la definición de chorro. Un chorro es un escurrimiento resultante de la inmersión de un fluido dentro de otro. En nuestro caso inicialmente consideraremos que el fluido que sale del orificio es líquido, no viscoso, el orificio es circular y el otro fluido es aire en condiciones normales. Por otro lado, ambos fluidos son inmiscibles y por tanto ambas fases están separadas por una interfaz generando una tensión superficial.

Mediante las leyes de conservación de magnitudes mecánicas y termodinámicas como por ejemplo: la masa, la cantidad de movimiento o la energía, podemos establecer expresiones con las cuales describir la dinámica del flujo o del chorro. En este aspecto el estrechamiento de un chorro que cae o se vierte a través del aire, se puede explicar mediante la ecuación de continuidad en la que se verifica el principio de la conservación de la masa. Es decir, teniendo en cuenta que el fluido es incompresible y por tanto de densidad constante, luego tenemos:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \quad 3.11$$

Siendo 1 y 2 dos estados arbitrarios y donde el caudal puede definirse como:  $\dot{V} = Sv$  donde  $S$  es la sección perpendicular al sentido de la velocidad ( $v$ ). Por otro lado, teniendo en cuenta que la velocidad del fluido evoluciona en el tiempo fruto de la acción de la gravedad, ésta puede expresarse como:

$$v(t)^2 - v_0^2 = 2gh(t) \quad 3.12$$

De forma que, de la ecuación 3.11 y 3.12 obtenemos la siguiente expresión:

$$S(t) = S_0 \frac{v_0}{\sqrt{v_0^2 + 2gh(t)}} \quad 3.13$$

Donde  $S(t)$  representa la sección del chorro en función del tiempo y  $h(t)$  la distancia en vertical a la que se encuentra dicha sección respecto al orificio de salida, orificio (nozzle) que como hemos comentado anteriormente es redondo y por tanto, la expresión anterior puede describirse como:

$$r(t) = r_0 \frac{v_0}{\sqrt{v_0^2 + 2gh(t)}} \quad 3.14$$

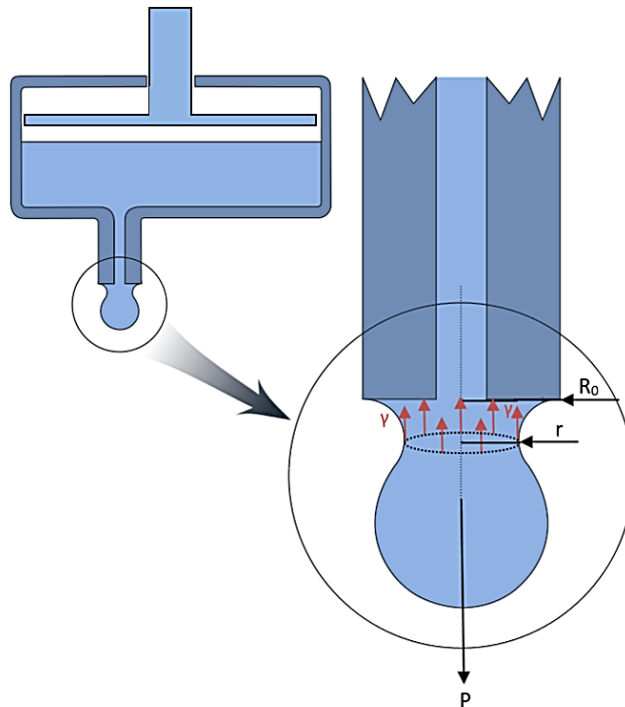
Por otro lado, la modelización anterior propuesta por Grubelnik y Marhl [179] solo es válida en la inmediaciones del nozzle es decir, a principios o en la parte superior del flujo. En la parte posterior de flujo por otro lado, donde se forman y se desarrollan las irregularidades, y/o protuberancias hasta convertirse en gotas requiere de una explicación adicional.

En la formación de las irregularidades interviene la tensión superficial o interfacial existente entre el líquido y el aire, dicha tensión superficial como se comenta más adelante en el apartado 7, tiende a minimizar la superficie del líquido en contacto con el aire, minimizando así la energía libre, y la forma geométrica de menor superficie posible es el de una esfera. Es por ello que, todo líquido en un medio ideal donde no esté expuesto a la acción de ningún esfuerzo externo adquiere dicha forma. Así pues, en la formación de las protuberancias y en consecuencia de las gotas surge del desequilibrio entre la tensión superficial la cual está en todo momento oponiéndose a las fuerzas inerciales y éstas.

Con el objetivo de comprender el crecimiento de las protuberancias o irregularidades hasta desprenderse y convertirse en gotas hemos de recurrir a la ley de Tate.

### 2.2.1.1. Ley de Tate

T. Tate en 1864 [180], estudió el desprendimiento de las gotas en un tubo capilar proporcionando una expresión analítica con la cual podemos calcular la tensión superficial de los líquidos. La ley de Tate establece que una gota se desprende de un tubo capilar cuando su peso supera las fuerzas de la tensión superficial (ver Figura 98).



**Figura 98:** Representación esquemática del estrechamiento de la sección en las inmediaciones del nozzle y de las fuerzas a las que se encuentra sometido el chorro [Fuente: Elaboración propia].

De forma que, siendo el peso función del volumen y siendo éste, creciente a medida que el líquido fluye a través del nozzle, podemos establecer que:

$$P = (2\pi r)\gamma_{LF} \quad 3.15$$

Donde  $P$  representa al peso y debido a que el radio de la estricción ( $r$ ) es una magnitud difícil de cuantificar y evoluciona en el tiempo, éste puede considerarse como proporcional al radio del tubo capilar que como se puede apreciar en la Figura debido a que el fluido moja a éste,  $R_0$  representa el radio exterior del tubo.

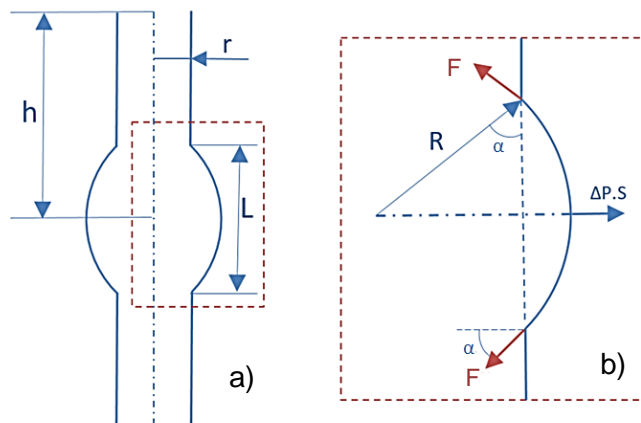
Por otro lado, teniendo en cuenta que el fluido es incompresible y por tanto su densidad es constante, la ecuación anterior puede describirse como:

$$\frac{\rho V_T g}{N} = (2\pi k R_0)\gamma_{LF} \quad 3.16$$

Donde  $V_T$  representa el volumen total de líquido vertido y  $N$  el número de gotas que han caído ( $V_T = V_{gota}N$ ) y  $k$  representa el factor de ajuste Harkins and Brown 1919 [181] (Figura 114), donde  $k = f(R_0, r, V_{gota})$ . De forma que, podemos decir que, mientras más tensión superficial posea un fluido mayor será el peso que podrá soportar y por tanto gotas de mayor volumen requerirá para desprenderse, así mediante las leyes conservativas se cumple que:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \quad 3.17$$

Siendo 1 y 2 dos fluidos con propiedades distintas. De esta manera y siguiendo con la explicación del crecimiento de las inestabilidades recurriremos a la ley de Young-Laplace la cual se detalla con más profundidad en el apartado 7.1.2. A través de esta ley se establece que para que exista equilibrio la diferencia de presiones entre el interior del chorro y medio que le rodea, y que actúa sobre la superficie interfacial ha de ser igual a la fuerza producto de la tensión superficial, esta relación puede deducirse de la siguiente manera (ver Figura 99):



**Figura 99:** Sección transversal de un chorro en la etapa inicial de la formación de una gota  
 a). Representación de las fuerzas inerciales y de las fuerzas producto de la tensión superficial b) [Fuente: Elaboración propia].

Partiendo de un estado inicial ideal donde el flujo tiene un perfil cilíndrico podemos decir mediante la imposición del equilibrio que:

$$\Delta P \cdot S = 2F \cos(\alpha) \quad 3.18$$

Donde  $\Delta P$  representa la diferencia entre la presión existente en el interior de flujo y el medio que le rodea o por el que discurre (aire). Así pues, la ecuación anterior puede describirse teniendo en cuenta dicho perfil cilíndrico ideal como:

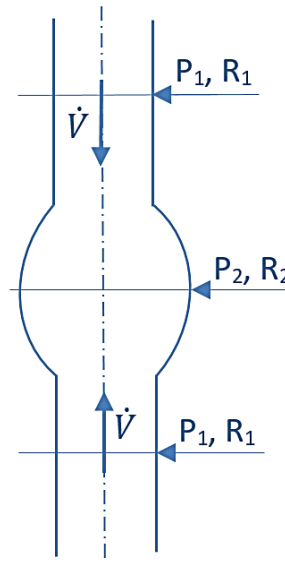
$$\Delta P \cdot (2\pi r L) = 2(\gamma_{LF} 2\pi r) \cos(\alpha) \quad 3.19$$

Donde como se puede apreciar en la Figura 99,  $L$  representa la longitud de la irregularidad incipiente siendo esta:  $L = R \cos(\alpha)$ . De forma que, la ecuación anterior puede expresarse de forma más simple como:

$$\Delta P = \frac{\gamma_{LF}}{R} \quad 3.20$$

Donde  $R$  representa la curvatura de la superficie de la protuberancia (en este caso  $R = (1/2) r$ ) la cual evoluciona en el tiempo hasta desprenderse y adoptar una forma esférica (gota), es decir  $r(t) = r_o + R(t)$ . Así si comparamos dos estados cercanos dentro del chorro (ver Figura 100) podemos establecer la siguiente relación:

$$P_1 - P_2 = \gamma_{LF} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) ; \quad P_1 > P_2 \quad 3.21$$



**Figura 100:** Representación esquemática de un chorro con la formación incipiente de una gota [Fuente: Elaboración propia].

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente y haciendo uso de la ecuación de Young-Laplace (Ec. 3. 332) donde se hace referencia a la curvatura media descrita por la superficie afín de ser más preciso en las estimaciones de la formación de las gotas la ecuación anterior se ve modificada de la siguiente forma:



Teniendo en cuenta que el incremento de presión en un punto cualquiera  $i$  del chorro mediante la expresión de Young-Laplace se define como:

$$\Delta P_i = P_i - P_0 = \gamma_{LF} \left( \frac{1}{R_{i,1}} + \frac{1}{R_{i,2}} \right) \quad 3.22$$

Donde para un cilindro ideal  $R_{i,2}$  tiende a infinito, luego a medida que la irregularidad crece  $R_{i,1}$  se hace más grande mientras que  $R_{i,2}$  decrece hasta que en el límite cuando se forma la gota de forma esférica  $R_{i,1} = R_{i,2} = R_i$ , así la ecuación anterior (3. 21) que gobierna el crecimiento de la irregularidad hasta la formación de la gota puede expresarse como:

$$P_1 - P_2 = \gamma_{LF} \left( \frac{1}{R_1} - \left( \frac{1}{R_{2,1}} + \frac{1}{R_{2,2}} \right) \right) \quad 3.23$$

Es decir;

$$P_1 - P_2 = \gamma_{LF} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{2}{R_2} \right) \quad 3.24$$

Donde 1 representa el estado donde el chorro tiene una forma cilíndrica y 2 el estado donde se ha formado la gota y se ha separado de la corriente. De la ecuación anterior se puede extraer el siguiente razonamiento: *el escurrimiento de 2 fluidos a través de un mismo orificio al aire y con un mismo caudal, aquel que posea una mayor tensión superficial romperá el flujo y formará gotas aisladas antes y a una menor distancia del orificio. Por otro lado, debido a la gravedad que aumenta la velocidad del fluido en el aire y por medio de la ecuación de continuidad que satisface el principio de conservación de la masa, el chorro se estrecha. Una vez alcanzado una sección límite, es en este punto donde diferenciamos la zona superior del flujo de la zona inferior, en donde debido al peso de la zona inferior se supera las fuerzas producto de la tensión superficial de líquido, rompiéndose el flujo y dando paso a la reconfiguración de este volumen aislado en una forma esférica (Gota).*

Por otro lado, si realizamos el balance energético entre los estados 0 y 1 pertenecientes al chorro antes de su desintegración digamos en la zona superior del flujo (ver Figura 100), recurriendo a la ecuación de Bernoulli (Versión alturas) para un fluido incompresible no viscoso y mediante la ecuación de Young-Laplace con el objetivo de introducir los números adimensionales al problema tenemos:

$$0 = \left( \frac{\gamma_{LF}}{\rho g} \left( \frac{1}{R_0} - \left( \frac{1}{R_{1,1}} + \frac{1}{R_{1,2}} \right) \right) \right) + \left( \frac{v_0^2 - v_1^2}{2g} \right) + (Z_0 - Z_1) \quad 3.25$$

Donde  $R_{1,i}$  es un radio dependiente de la posición y en consecuencia del tiempo, que considerando el chorro como un cilindro ideal donde  $R_{1,2} = \infty$  podemos simplificar la curvatura de este como  $R_1(z, t)$ , así mediante el uso de los números adimensionales de Froude y Weber y trabajando la ecuación anterior podemos obtener la siguiente expresión:

$$\frac{v_1(z, t)}{v_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{2}{We} \left(1 - \frac{R_0}{R_1}\right)\right) + \left(\frac{2}{Fr} \left(\frac{Z_0 - Z_1}{R_0}\right)\right)} \quad 3.26$$

Mediante el principio de conservación de la masa para un fluido incompresible donde  $\dot{V} = Sv$  donde tanto la sección como la velocidad son dependiente de la posición y del tiempo, y teniendo en cuenta que todo lo que entre ha de salir y por tanto:

$$\dot{V} = 2\pi \int_0^r v(z, t)r(z, t)dr \rightarrow \pi R_0^2 v_0 = \pi R_1^2 v_1 \quad 3.27$$

Es decir, de la expresión anterior podemos establecer la siguiente relación:

$$\frac{R_1(z, t)}{R_0} = \sqrt{\frac{v_0}{v_1(z, t)}}$$

Por tanto mediante la expresión 3. 26 la evolución del chorro respecto al eje z se puede definir mediante la siguiente expresión:

$$\frac{R_1(z, t)}{R_0} = \left(\frac{v_0}{v_1(z, t)}\right)^{\frac{1}{2}} = \left[1 + \left(\frac{2}{We} \left(1 - \frac{R_0}{R_1}\right)\right) + \left(\frac{2}{Fr} \left(\frac{Z_0 - Z_1}{R_0}\right)\right)\right]^{\frac{1}{4}} \quad 3.28$$

Esta expresión puede ser resuelta analíticamente con ella podemos encontrar el perfil de la velocidad respecto z así como su sección. En el límite donde  $We \rightarrow \infty$  y por tanto a una velocidad inicial de salida máxima y una la tensión superficial mínima, la ecuación anterior puede verse simplificada obteniéndose las siguientes expresiones:

$$\frac{R_1(z, t)}{R_0} = \left[1 + \left(2g \left(\frac{Z_0 - Z_1}{v_0^2}\right)\right)\right]^{\frac{1}{4}} \quad 3.29$$

$$\frac{v_0}{v_1(z, t)} = \left[1 + \left(2g \left(\frac{Z_0 - Z_1}{v_0^2}\right)\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad 3.30$$

De las expresiones anteriores en este caso límite donde la velocidad es máxima y la tensión superficial mínima, podemos apreciar a través de la ecuación 3. 29 que mientras mayor sea la velocidad inicial del flujo para un diámetro inicial fijo a mayor longitud se romperá o desintegrará dicho el flujo, y de igual manera para una velocidad fija, la longitud de rotura es proporcional al diámetro del flujo (Ec. 3. 27) Savart (1833) [82]. Por otro lado, si observamos con detenimiento la expresión 3. 30 podemos apreciar que en este caso ideal de un flujo incompresible no viscoso en donde debido a la ausencia del término desacelerador producto de la tensión superficial, dicha ecuación es exactamente la expresión 3. 12 de la cual inicialmente hemos partido, así en esta situación idílica son los esfuerzos gravitatorios los únicos responsables de dicho fenómeno de ruptura.

Por otro lado, recurriendo al análisis dimensional en la problemática descrita anteriormente, la ruptura de un chorro en gotas siendo estas de un fluido incompresible no viscoso, tal y como es expresado por Oren [182] y por Eggers [183], la longitud respecto al origen en este caso el nozzle, puede expresarse en función de las propiedades del fluido y de las condiciones de eyección como:

$$L_{critica} = f(\rho, R_0, v_0, \gamma_{LF}) \quad 3.31$$

Es decir, la longitud crítica a la que se producirá la ruptura del chorro es función de la densidad ( $\rho$ ) y la tensión superficial de la interface líquido-gas ( $\gamma_{LF}$ ) en este caso de la tinta, así como también de la velocidad del flujo ( $v_0$ ) y el radio del orificio de salida (nozzle) o del cilindro ideal de la columna líquida. Así considerando que la velocidad es una magnitud fija de exponente la unidad, tenemos:

$$\frac{L_{critica}}{R_0} \approx v_0 R_0^a \rho^b \gamma^c = v_0 [L]^a \left[ \frac{M}{L^3} \right]^b \left[ \frac{M}{t^2} \right]^c \quad 3.32$$

Encontrando los coeficientes a, b y c se obtiene la siguiente relación adimensional de la longitud crítica:

$$\frac{L_{critica}}{R_0} \approx v_0 \left( \frac{\rho R_0}{\gamma_{LF}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 3.33$$

De esta última expresión podemos intuir que existirán varios tipos de ruptura atendiendo a las condiciones del fluido y las velocidades de eyección. Por otro lado, mediante la ecuación de a continuación (3.34), se puede obtener una expresión que defina en una escala de tiempo cuando se produce dicha desintegración, es decir:

$$t_{critico} \approx \left( \frac{\rho (R_0)^3}{\gamma_{LF}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 3.34$$

De modo que, en sistemas con altas tensiones superficiales en relación con las energías inerciales tendremos pequeños valores de  $t_{critico}$  y en sistemas con valores temporales altos, la tensión superficial de menor magnitud proporcional a la inercia, debe realizar un mayor trabajo en vencer a ésta, reconfigurando la superficie del chorro hasta minimizar la energía libre (gotas) a una mayor distancia del nozzle. Nótese que las estimaciones anteriores de esta longitud y duración crítica se realiza bajo la suposición de que los fluidos son no viscosos, por tanto, en la realidad tras la experimentación se aprecia valores mayores a los estimados, producto del efecto de la disipación viscosa. En dichos sistemas viscosos se recurre el número de Ohnesorge como la agrupación adimensional más útil con el cual introducir los efectos viscosos al sistema.

De forma que, el problema de la ruptura de los chorros líquido en gotas puede definirse mediante el régimen de crecimiento del radio del chorro y la distancia respecto al origen a la que produce dicho crecimiento, así pues el problema puede describirse cuantitativamente

mediante la evolución de  $R(z, t)$  la cual se realiza en el siguiente apartado mediante la inestabilidad de Plateau-Rayleigh.

### 2.2.1.2. Inestabilidad de Plateau-Rayleigh

Los fenómenos relacionados con las tensiones superficiales de los fluidos han fascinado al humano por siglos, la descripción matemática aportada por Young y Laplace sentaron las bases para su estudio sistemático. La investigación moderna en la formación de la gota puede decirse que comienza con los estudios de Savart (1833) [82]. Él fue el primero en reconocer que la ruptura de chorros de líquido se rige por leyes independientes a las circunstancias en las se produce dicho chorro, centrándose en el caso más simple de chorros de perfil circular. Sin la fotografía a disposición y mediante simple observación fue capaz de proporcionar datos cuantitativos del proceso de desintegración de los chorros concluyendo que, la longitud a la que se produce la ruptura del chorro es proporcional a la velocidad para un diámetro fijo y a su vez para una velocidad fija, la longitud de ruptura es proporcional al diámetro (caso anterior). Savart presento resultados experimentales empleando la llamadas curvas de estabilidad, por otro lado sus resultados fueron utilizados por múltiples investigadores posteriores los cuales verificaron y propusieron modelos que explicaban dicho comportamiento. Uno de ello fue Plateau (1873) [83] quien observó que una columna cilíndrica de líquido no viscoso se vuelve inestable cuando su longitud del chorro es mayor que su perímetro. En otras palabras todo flujo de líquido que emana de un orificio es inestable ante cualquier perturbación que modifique el área superficial, en este aspecto a Plateau se le atribuye la incorporación de la energía superficial en la modelización del fenómeno, con el cual se explican los resultados de Savart, (termino eliminado en la explicación anterior donde idilicamente  $We \rightarrow \infty$ ), sentando las bases de la teoría de las inestabilidades en chorros introducida por Lord Rayleigh (1878) [84], [170], [184], en la cual se explica porque una columna de fluido (chorro), se desintegra en gotas, en donde el sistema presenta el mismo volumen inicial pero menor área superficial.

La inestabilidad de Plateau-Rayleigh plantea que un chorro es inestable cuando las perturbaciones son axisimétricas, es decir, son únicamente función de la coordenada axial del chorro. Basándose en la suposición de que el chorro inicialmente se encuentra perturbado infinitesimalmente y asumiendo que la amplitud de la perturbación a partir de  $\pi\phi_0$  crece de forma exponencial en el tiempo (siendo  $\phi_0$  el diámetro del cilindro no perturbado), Rayleigh determinó la tasa de crecimiento en función de la longitud de onda, su valor máximo y el valor de longitud para el cual se presenta. Además logró predecir la longitud de ruptura del chorro ( $L_{critica}$ ) suponiendo que la misma se produce cuando la amplitud de la perturbación de mayor tasa de crecimiento alcanza el valor del radio del chorro sin perturbar siendo ésta a su vez proporcional a la velocidad del chorro. Las conclusiones alcanzadas por Rayleigh surgen de un análisis lineal en el que la forma de la

superficie del chorro perturbado se desarrolla mediante las series de Fourier en el que se utiliza solamente los términos de primer orden.

Así desde un punto de vista más generalista y recurriendo las propiedades de las series de Fourier para funciones pares o simétricas respecto a un eje central como es el caso, pero con la particularidad de poseer una amplitud dependiente del tiempo, Rayleigh expresa el radio del chorro perturbado en función de la posición y el tiempo como:

$$\tilde{R}(z, t) = R_0 + R(t) \cos\left(\frac{\pi z}{\lambda}\right) \quad 3.35$$

Donde  $\lambda$  representa el periodo de la onda que según las apreciaciones de Plateau ésta ha de ser superior o igual a  $2\pi R_0$ , algunos autores [178], [185], [186] utilizan el término  $k$  el cual denominan número de onda para expresar la ecuación anterior, es decir:

$$\tilde{R}(z, t) = R_0 + R(t) \cos(kz) \quad ; \quad k = \frac{\pi}{\lambda} \quad 3.36$$

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente el coeficiente de amplitud de la perturbación evoluciona en el tiempo  $R(t)$  y en la aproximación lineal de Rayleigh esta se define exponencialmente como:

$$R(t) = \delta e^{\omega(t-t_0)} \quad 3.37$$

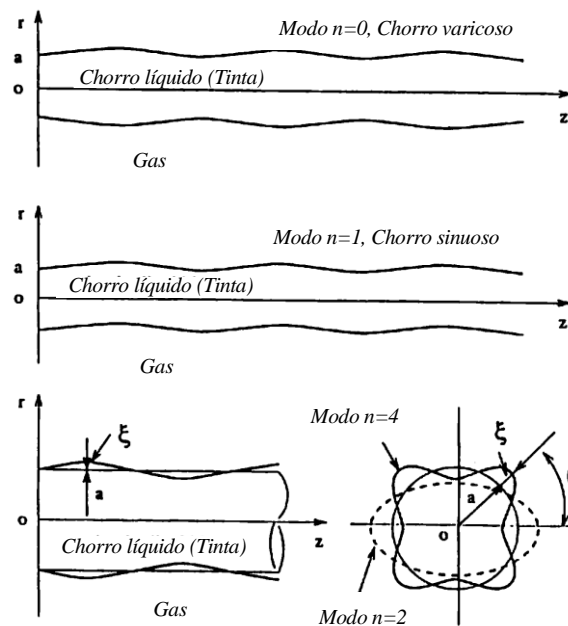
Donde  $\omega$  representa la velocidad de crecimiento de la perturbación siendo  $\delta$  la amplitud de dicha perturbación a  $t = t_0$  por tanto  $\delta \ll R_0$ . Por otro lado, en la modelización de Rayleigh  $\omega$  es inversamente proporcional al tiempo capilar o crítico, es decir  $\omega = 1/t_{critico}$ . Así por medio de la identidad de Euler la ecuación 3.35 puede describirse en su forma compleja como:

$$\tilde{R}(z, t) = R_0 + \delta e^{\omega t + ikz} \quad 3.38$$

La expresión anterior define el radio para flujos asimétricos, pero desde un punto de vista más amplio la superficie de un chorro perturbado puede describirse como:

$$\tilde{R}(z, \theta, t) = R_0 + \delta e^{\omega t + n\theta + ikz} \quad 3.39$$

Donde la introducción de la componente angular permite estudiar aquellos casos donde la perturbación no tiene forma varicosa (termino introducido por Rayleigh por su similitud a las venas varicosas), siendo  $n$  un valor entero mayor o igual a cero, con el cual se define el modo en el que se produce la perturbaciones. Cuando  $n = 0$ ,  $\omega \geq 0$  nos encontramos ante el primer modo es decir, un chorro axisimétrico denominado varicoso. El segundo modo es aquel en el cual  $n = 1$ , donde la sección transversal del chorro permanece circular pero el chorro ofrece una forma sinuosa de ahí que se le conozca por este nombre. Los modos siguientes, para  $n \geq 2$ , son conocidos genéricamente con el nombre de "flauta". Para  $n = 2$ , la sección transversal del chorro es elíptica, y los diámetros mayor y menor cambian de posición entre ellos alternativamente (ver Figura 101).



**Figura 101:** Esquema de varios modos de perturbaciones en la superficie de chorros [187].

Así pues para hacer una descripción cuantitativa del problema y considerando éste como asimétrico podemos decir que las velocidades relativas de las protuberancias son: radial ( $\tilde{v}_r$ ) y axial ( $\tilde{v}_z$ ), y la presión en el interior del chorro ( $\tilde{P}$ ) pueden ser expresadas de la misma forma que las perturbaciones, es decir como:

$$(\tilde{v}_r, \tilde{v}_z, \tilde{P}) = (R(r), Z(r), P(r)) e^{\omega t + ikz} \quad 3.40$$

De forma que, desde un punto de vista general y despreciando los efectos del medio que rodea al chorro, así como la gravedad tenemos:

$$U_x = v_0 + \tilde{v}_r \quad ; \quad U_z = v_z + \tilde{v}_z \quad ; \quad P = P_0 + \tilde{P} \quad 3.41$$

Haciendo uso de las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible no viscoso, es decir, las ecuaciones de Euler que en un sistema de coordenadas cilíndricas se expresan como:

**Principio 1 (Conservación de la masa):**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad \rightarrow \quad \nabla \cdot \tilde{v} = 0 \quad 3.42$$

Donde la velocidad relativa de las protuberancias en coordenadas cilíndricas se define como  $\tilde{v} = (\tilde{v}_r, \tilde{v}_\theta, \tilde{v}_z)$  y por tanto:

$$\frac{\tilde{v}_r}{r} + \frac{\partial \tilde{v}_r}{\partial r} + \frac{\partial \tilde{v}_z}{\partial z} = 0 \quad 3.43$$

Que si sustituimos la expresión por el vector 3.40 obtenemos:

$$\left[ \frac{dR(r)}{dr} + \frac{R(r)}{r} + ikz \right] e^{\omega t + ikz} = 0 \quad 3.44$$

**Principio 2 (Cantidad de movimiento o segunda ley de Newton):**

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + f \rightarrow \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \tilde{v} \cdot \nabla \tilde{v} \right) = -\frac{1}{\rho} \nabla \tilde{P} \quad 3.45$$

De igual forma resolviendo la ecuación anterior teniendo en cuenta el vector velocidad en coordenadas cilíndricas obtenemos:

$$\begin{aligned} r: & \quad \frac{\partial \tilde{v}_r}{\partial t} + \tilde{v}_r \frac{\partial \tilde{v}_r}{\partial r} + \tilde{v}_z \frac{\partial \tilde{v}_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial r} \\ \theta: & \quad 0 \quad \forall \text{ término} \\ z: & \quad \frac{\partial \tilde{v}_z}{\partial t} + \tilde{v}_r \frac{\partial \tilde{v}_z}{\partial r} + \tilde{v}_z \frac{\partial \tilde{v}_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial z} \end{aligned} \quad 3.46$$

Teniendo en cuenta que  $\delta \ll R_0$  es decir muy pequeño y por tanto  $\delta^2$  depreciable, las expresiones anteriores se ven simplificadas a:

$$\begin{aligned} r: & \quad \frac{\partial \tilde{v}_r}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial r} \\ z: & \quad \frac{\partial \tilde{v}_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial z} \end{aligned} \quad 3.47$$

Las cuales sustituyendo el vector 3.40 en las expresiones anteriores obtenemos que las ecuaciones que describen la segunda ley de Newton se expresan como:

$$\begin{aligned} r: & \quad \omega R(r) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{P}}{\partial r} \\ z: & \quad \omega Z(r) = -\frac{ik}{\rho} P(r) \end{aligned} \quad 3.48$$

Así sustituyendo las ecuaciones de la cantidad de movimiento 3.48, dentro de la expresión 3.44 (ecuación de continuidad) se encuentra la siguiente ecuación diferencial a través de la cual se describe el comportamiento de la inestabilidad [188]:

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} - (1 + (kr)^2) R = 0 \quad 3.49$$

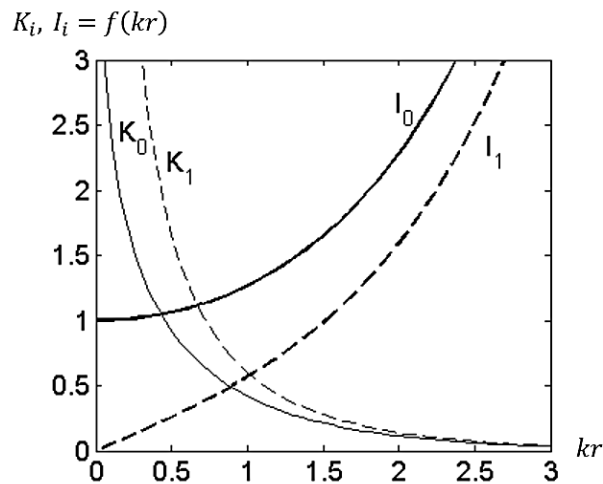
La ecuación diferencial lineal de segundo orden anterior corresponde a una ecuación modificada de Bessel de orden  $kr$  donde  $kr = 1$ , cuya solución puede describirse mediante dos funciones linealmente independientes [189] es decir:

$$R(r) = CI_1(kr) + DK_1(kr) \quad 3.50$$



Donde C y D son constantes, nótese que para este problema en particular donde  $K_1(kr) \rightarrow \infty$  cuando  $r \rightarrow 0$  (ver Figura 102), por lo tanto para el correcto funcionamiento de la modelización  $R(r)$  requiere ser expresado como una función de Bessel de primera especie y de orden 1, es decir:

$$R(r) = CI_1(kr) \quad 3.51$$



**Figura 102:** Curva de la función de Bessel modificada [185].

Que como se ha comentado anteriormente C es una constante no especificada que debe determinarse una vez definidas las condiciones de contorno apropiadas. De forma que teniendo en cuenta las ecuaciones de la cantidad de movimiento, la expresión anterior y mediante la identidad de la ecuación de Bessel  $dI_0(\xi)/d\xi = I_1(\xi)$  expresada en la Figura 102, es posible definir la presión y la altura:

$$P(r) = -\frac{\omega\rho C}{k}I_0(kr) \quad ; \quad Z(r) = -\frac{ik}{\omega\rho}P(r) \quad 3.52$$

A continuación, se establece las condiciones de contorno adecuadas. En primer lugar, las condiciones dinámicas de la superficie libre, es decir:

$$\frac{\partial \tilde{R}}{\partial t} = \tilde{v} \cdot n \approx \tilde{v}_r \quad 3.53$$

Que sustituyendo en la ecuación 3.51 obtenemos el valor de la constante C, es decir;

$$C = \frac{\delta\omega}{I_1(kR_0)} \quad 3.54$$

En segundo lugar, se requiere establecer un balance de esfuerzos normales en la superficie libre, es por ello que recurrimos a la ecuación de Young-Laplace:

$$\Delta P = (P_0 + \tilde{P}) = \gamma_{LF} \nabla \cdot n = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad 3.55$$

Donde  $n$  representa al vector radial perpendicular a la superficie libre y  $\tilde{P}$  la presión de la perturbación, así como  $R_1$  y  $R_2$  los radios principales de la curvatura de dicha perturbación, de forma que teniendo en cuenta la definición del radio anterior  $R(z, t)$  tenemos:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_0 + \delta e^{\omega t + ikz}} \approx \frac{1}{R_0} - \frac{\delta e^{\omega t + ikz}}{R_0^2} \quad 3.56$$

$$\frac{1}{R_2} = \delta k^2 e^{\omega t + ikz} \quad 3.57$$

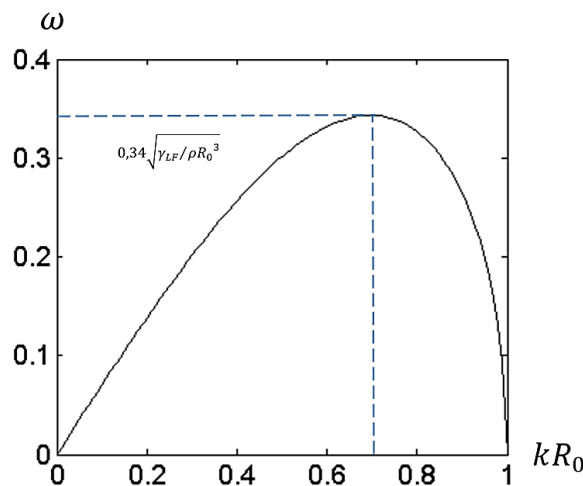
Así a través de la ecuación de Young-Laplace teniendo en cuenta que la presión en el chorro no perturbado (estado inicial) es  $P_0 = \gamma_{LF}/R_0$ , podemos definir la presión aportada por la protuberancia como:

$$\tilde{P} = \frac{\delta \gamma_{LF}}{R_0^2} (k^2 R_0^2 - 1) e^{\omega t + ikz} \quad 3.58$$

Combinando las ecuaciones 3.52, 3.54 y 3.58 proporciona la relación de dispersión, que indica la dependencia de la tasa de crecimiento  $\omega$  en el número de onda  $k$ :

$$\omega^2 = \frac{\gamma_{LF}}{\rho R_0^3} k R_0 \frac{I_1(kR_0)}{I_0(kR_0)} (1 - k^2 R_0^2) \quad 3.59$$

De la expresión anterior podemos obtener varias conclusiones, en primer lugar puesto  $\omega$  representa la velocidad de crecimiento de la perturbación y esta es inversamente proporcional al  $t_{crítico}$  y haciendo uso del análisis dimensional en 3.34 podemos decir que:  $\omega^2 t_{crítico}^2 = f(kr)$ , a continuación en la Figura 103 se puede apreciar graficada dicha relación.



**Figura 103:** La dependencia de la tasa de crecimiento  $\omega$  en el número de onda  $k$  [185].

De la gráfica anterior podemos apreciar que a partir de  $kR_0 > 1$  la tasa de crecimiento de la perturbación se torna negativa y por tanto el radio del chorro comienza a decrecer encontrándonos a  $\lambda > 2\pi R_0$ , de igual forma si  $kR_0 < 1$  nos encontramos ante un cilindro distorsionado por la inestabilidad, lo cual concuerda con la apreciación de Plateau. Por otro

lado, el punto máximo de crecimiento se encuentra a  $kR = 0,697$  es decir, cuando la longitud de onda de la perturbación es  $\lambda \approx 9,02R_0$ . De igual forma bajo estas condiciones de máxima crecimiento de la perturbación, el tiempo de desintegración del chorro o tiempo crítico se puede expresar como:

$$\omega = \frac{\alpha}{t_{crítico}} \rightarrow t_{crítico} \approx 2,91 \sqrt{\frac{\rho R_0^3}{\gamma_{LF}}} \quad 3.60$$

De igual modo la longitud a la que se producirá la ruptura del chorro respecto al origen (nozzle), asumiendo que la velocidad local del chorro puede definirse como  $U_z = -\omega/k$  ésta puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$t_{crítico} = \frac{L_{crítico}}{U_z} \rightarrow L_{crítica} \approx -\frac{\omega}{k} \left[ 2,91 \sqrt{\frac{\rho R_0^3}{\gamma_{LF}}} \right] \quad 3.61$$

O lo que es lo mismo puede ser expresada adimensionalmente (ver Figura 104) como:

$$\left( \frac{L_{crítica}}{\phi_0} \right) \approx -1,04\sqrt{We} \quad 3.62$$

Puesto que la velocidad inicial del chorro por lo general es conocida y puesto que mediante la ecuación 3.26 la velocidad local del mismo puede ser deducido. La expresión que define  $U_z$  anterior, puede ser utilizada para deducir la longitud de onda real que viaja a  $U_z$  y con ello la frecuencia requerida para mitigar el crecimiento de las protuberancias mediante una excitación y así aumentar la longitud de chorro no perturbado.

Por último conocido el ratio de crecimiento radial de la protuberancia y la longitud de onda de ésta podemos estimar la frecuencia a la que se producen las gotas  $f_{gotas} = U_z/\lambda$  y de igual manera las dimensiones de las gotas pueden estimarse a partir de la energía superficial del sistema es decir:

$$E_{Chorro} = E_{Gotas} ; (2\pi R_0 L_{crítica})\gamma_{LF} = N[(4\pi R_{gota}^2)\gamma_{LF}] \quad 3.63$$

Donde  $N$  representa el número de gotas formadas, definible como  $N = L_{crítica}/\lambda$ , de forma que la ecuación anterior puede verse simplificada como:

$$\frac{R_{gota}}{R_0} = \sqrt{\frac{\pi}{0,697}} \approx 2,1 \quad 3.64$$

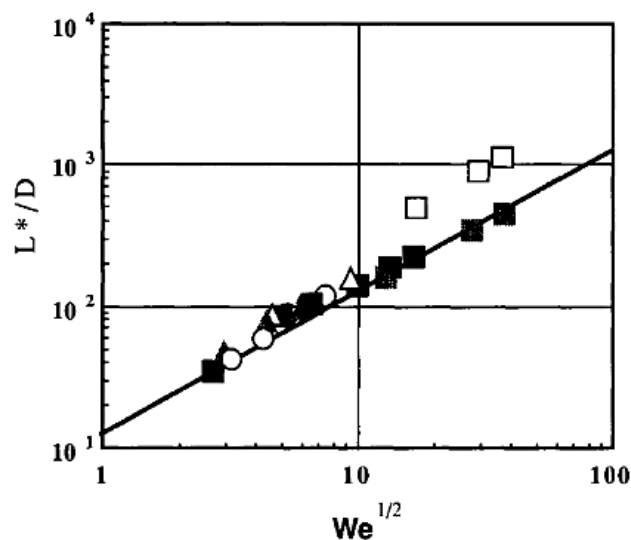
De manera que la ruptura del chorro tiene lugar cuando el radio de la protuberancia alcanza aproximadamente el doble del radio del chorro no perturbado, es decir cuando  $R(t) = R_0$  que haciendo uso de la expresión 3.37 tenemos:

$$t_{crítico} = \frac{1}{\omega} \ln\left(\frac{R_0}{\delta}\right) \quad 3.65$$

Trabajos posteriores de muchos investigadores confirmaron la teoría de Rayleigh entre ciertos límites. Uno de ellos es el de Smith y Moss (1917) [190], quienes usando curvas de estabilidad mostraron que la longitud de ruptura en un rango de velocidades moderadas es proporcional a la velocidad del chorro, destacando también la relación  $\ln(R_0/\delta)$  la cual permanece constante con un valor de 13 para los líquidos en su estudio experimental. Por otro lado, para velocidades superiores al rango mencionado observaron que la longitud de ruptura disminuía con el aumento de la velocidad. Además, observaron que el primer máximo de la curva de estabilidad está emparentado con la aparición de turbulencia en el escurrimiento. En la Figura 104 mostrada a continuación podemos apreciar la representación gráfica de la longitud a la que se produce la ruptura de las gotas de forma adimensional en función del número de Weber, nótese que dicha gráfica comienza con un  $We \geq 1$ , lo cual representa como se verá más adelante el límite teórico de inicio del régimen de eyección proporcional o de Rayleigh. Por otro lado, se ha de resaltar que en dicha gráfica la longitud de ruptura de las gotas es  $L^* \geq 10\phi_0$  lo que concuerda con la siguiente expresión:

$$\left(\frac{L^*}{\phi_0}\right) = 10 + (1,04\sqrt{We}) \quad 3.66$$

Nótese que el valor constante 10 representa la longitud del chorro no perturbado, la razón de dicha constante se debe al establecimiento de ésta ( $10\phi_0$ ) como condición necesaria para establecer que el chorro se encuentra dentro del régimen de eyección y no dentro del régimen de goteo caótico como se verá en apartados sucesivos. Las pruebas experimentales dan fe de ello mostrando que para fluidos de baja viscosidad como el agua la longitud de ruptura del chorro tiene lugar a dicha distancia a Weber próximos a 1, luego podemos decir que la expresión 3.66 es exactamente  $L^* = L_{No\ perturb} + L_{crítica}$ .



**Figura 104:** Representación gráfica de la longitud de ruptura adimensional para una relación de  $\ln(R_0/\delta) = 13$  [191].

### Inestabilidad en fluidos viscosos.

Por otro lado, Rayleigh [170] también investigo acerca de chorros viscosos sometidos a la acción de la tensión superficial, posteriormente Weber [172] amplio dicho modelo introduciendo la influencia de la viscosidad como tal.

Puesto que para fluidos newtonianos los esfuerzos viscosos son proporcionales a la velocidad de la deformación, la modelización lineal anterior pudo ser extendida a fluidos viscosos mediante la definición de las velocidades radial y axial de las protuberancias del chorro ahora añadiéndoles un término asociado a la viscosidad ( $\tilde{v}_r^V, \tilde{v}_z^V$ ), es decir:

$$\tilde{v} = (\tilde{v}_r, \tilde{v}_z) = \left( (\tilde{v}_r^0 + \tilde{v}_r^V), (\tilde{v}_z^0 + \tilde{v}_z^V) \right) \quad 3.67$$

Donde el superíndice 0 representa la velocidad de la protuberancia calculada anteriormente para un fluido no viscoso. Así siguiendo la metodología anterior C. Weber alcanzo la siguiente expresión, similar a la ecuación 3.59 pero ahora con la introducción de un término viscoso:

$$\omega^2 + \mu \frac{3(kR_0)^2}{\rho R_0^2} \omega = \frac{\gamma_{LF}}{2\rho R_0^2} (1 - (kR_0)^2)(kR_0)^2 \quad 3.68$$

Donde al igual que para un fluido no viscoso en el rango de  $0 < kR_0 \leq 1$ , el ratio de crecimiento máximo radial de la protuberancia pudo determinarse de la expresión:

$$\omega = \left[ \left( \frac{8\rho R_0^3}{\gamma_{LF}} \right)^{1/2} + \frac{6\mu R_0}{\gamma_{LF}} \right]^{-1} \quad 3.69$$

En donde para los casos donde  $\mu = 0$ , la ecuación anterior difiere de 3.59 ligeramente por tanto no es válida. Por otro lado, la introducción de los números adimensionales a la modelización de Rayleigh por parte de Weber (1931) [172] permitio expresar la ecuación anterior (3.68) como:

$$\omega t_{crítico} = \sqrt{\frac{1}{2}(k^2 - k^4) + \frac{9}{4}Oh^2k^4 - \frac{3}{2}Ohk^2} \quad 3.70$$

Cuyo valor  $k$  (número de onda) que posee la máxima velocidad de crecimiento de la perturbación en:

$$k = (2 + 3\sqrt{2}Oh)^{-1/2} \quad 3.71$$

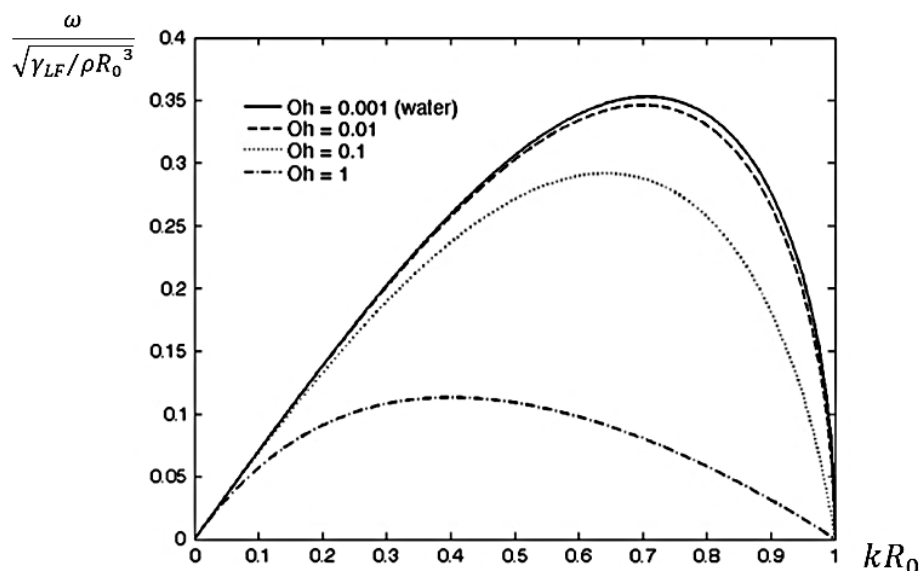
Así introduciendo la expresión anterior en la ecuación 3.70 se pudo determinar la duración a la que se produce la ruptura del chorro ahora de un fluido incompresible y viscoso (Newtoniano) donde dicha ruptura se produce cuando el incremento del radio alcanza el valor  $\tilde{R} \approx R_0$ .

$$t_{crítico} = t_0 + \frac{1}{\omega(Oh)} \log\left(\frac{R_0}{\delta}\right) \quad 3.72$$

Como se puede apreciar la expresión anterior es similar a la ecuación 3. 65 con la diferencia de que ahora la tasa de crecimiento máxima  $\omega$  es ahora una función dependiente del  $Oh$ . De igual forma, la distancia a la que se produce la ruptura del chorro puede mediante esta modelización estimarse mediante la siguiente expresión:

$$\left(\frac{L_{crítica}}{\phi_0}\right) = c \left(We^{1/2} + 3\frac{We}{Re}\right) = cWe^{1/2}(1 + (3 Oh)) \quad 3. 73$$

Donde  $c$  representa un valor constante, nótese la introducción del término viscoso en la expresión anterior a través del Reynolds con respecto a la expresión 3. 62 para fluidos no viscosos. Así pues de la expresión anterior podemos concluir que el efecto de la viscosidad es el de amortiguar las perturbaciones haciendo disminuir la tasa de crecimiento de las protuberancias, es por ello que mientras mayor sea los esfuerzos viscosos respecto a los inerciales mayor será la longitud de onda y por tanto la longitud crítica o de ruptura.



**Figura 105:** Dependencia del ratio de crecimiento de las perturbaciones de chorros viscosos ( $\omega$ ) en función del número de onda  $k$  para distintos  $Oh$  (distintas viscosidades) [192].

### Inestabilidad en fluidos viscosos interaccionando con el medio circundante.

Hasta ahora mediante la modelización de Rayleigh junto con las aportaciones de Weber se ha podido comprender los mecanismos de ruptura a velocidades de eyección bajas, pero a medida que ésta aumenta como se verá en el apartado siguiente el proceso de ruptura se lleva a cabo de distinta forma, dando origen a distintas tipologías a diferentes regímenes. De modo que, al aumentar la velocidad de eyección del chorro los efectos inerciales del medio circundante sobre el chorro no pueden ser despreciados como hasta ahora. En este aspecto uno de los primeros trabajos teóricos acerca de chorros líquidos entendido bajo la influencia del medio circundante fue realizado por Tomotika (1935) [193], quien empleó un análisis lineal para desarrollar una relación entre la tasa de crecimiento de perturbaciones

axisimétricas y la longitud de onda para sistemas no miscibles en general, siendo sus resultados aplicables en el caso en el que la relación entre la viscosidad de dos líquidos no miscibles tome un valor infinito. Es importante destacar que en dicha modelización si la viscosidad del líquido y del medio se desprecia, se llega a la expresión de Rayleigh para chorros no viscosos en el vacío, y si la viscosidad del chorro no puede ser ignorada pero si la del medio circundante, se llega a la misma expresión de Weber. La teoría de Tomotika ha sido confirmada en parte y ampliada por muchos trabajos posteriores. Por otro lado, posteriormente Schweitzer (1937) [194], llegó a la conclusión de que las teorías que justifican la atomización de chorros de alta velocidad por la acción del aire circundante solamente, son inválidas, considerando que la turbulencia del escurrimiento, inducida tal vez en el orificio juega un papel preponderante en el proceso de atomización, aunque fuertemente ayudada por la fricción con el aire. Sin embargo, estudios posteriores entre los cuales se encuentra el de Ranz (1958) [195], retomaron la idea de que la fricción con el aire es la causa de la ruptura en gotas para chorros en este régimen.

Ranz propuso una clasificación atendiendo a la idea de que es el rozamiento con el aire la razón fundamental de la ruptura del chorro a altas velocidades, estableciendo cuatro tipologías de ruptura (R. goteo, R. Rayleigh, R. Aerodinámico y R. Atomización), de modo que a medida que aumentamos la velocidad de salida del fluido eventualmente salimos del régimen de Rayleigh donde el crecimiento de la longitud crítica deja de ser proporcional al aumento de la velocidad de eyección debido a la aparición de las fuerzas aerodinámicas. A éste régimen de funcionamiento se le conoce como régimen aerodinámico. Weber en este aspecto predijo la aparición de un máximo en la curva de estabilidad (punto E, Figura 107), posteriormente los trabajos de Grant y Middleman (1966) [196], Fenn y Middleman (1969) [197], aportaron claridad a la transición entre el régimen de Rayleigh y el primer aerodinámico. Estos últimos investigadores Grant y Middleman, así como también otros como Reitz y Bracco [198], Lefebvre (1989) [199], hacen una pequeña distinción en el régimen aerodinámico como consecuencia de la aparición de turbulencias en el interior del nozzle dividiendo éste en dos tipologías distintas: Primer y segundo régimen aerodinámico (Ver Figura 108).

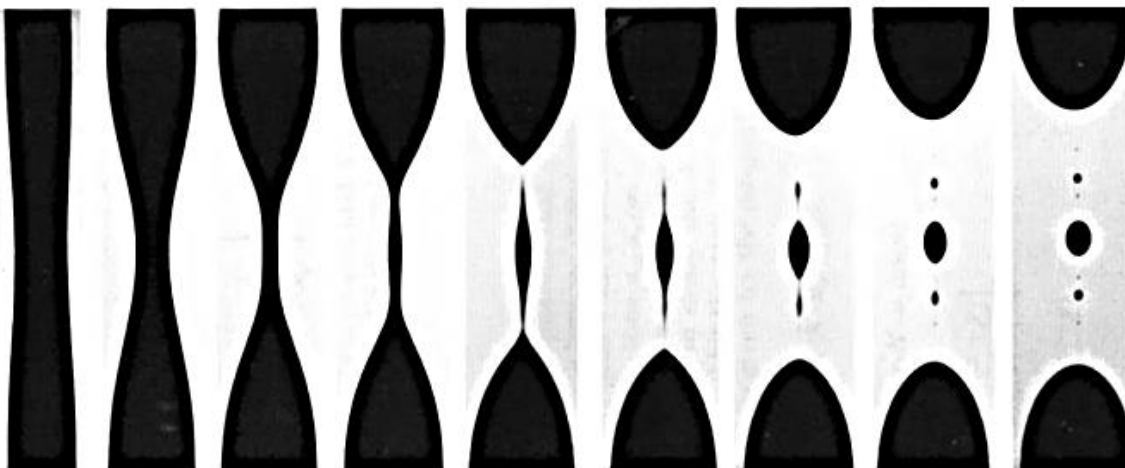
### **Efectos no lineales.**

Las teorías lineales Rayleigh-Weber predicen que los chorros sujetos a la acción de la tensión superficial se desintegran en gotas de tamaño uniforme como consecuencia de una perturbación sinusoidal, la cual se ve amplificada con el paso del tiempo. Las observaciones experimentales sin embargo, muestran que, sobre todo cerca de la zona de ruptura, la forma del chorro es diferente a la sinusoidal, y destacan la presencia de gotas pequeñas entre gotas de mayor tamaño (ver Figura 106). Para explicar estos fenómenos donde aparecen gotas satélite se han desarrollado trabajos experimentales y teorías no lineales por parte de numerosos investigadores entre los que se encuentran los de Donnelly y Glaberson (1966) [200], Wang (1968) [201] y Yuen (1968) [202] entre otros.



Con el fin de capturar el comportamiento no lineal cerca del estrangulamiento, es necesario un análisis completo de las ecuaciones Navier-Stokes con condiciones de frontera libre, en donde la posibilidad de realizar un enfoque analítico de la problemática es prácticamente inexistente e incluso los análisis numéricos de la desintegración completa de chorro se antojan muy complejas debido a las altas resoluciones necesarias en las regiones del cuello cerca de la singularidad. Es por ello que, por lo general, se recurre a modelos unidimensionales como hemos visto anteriormente, donde las ecuaciones dependen de una sola variable espacial independiente a lo largo del eje del chorro, aunque también existen bidimensionales y tridimensionales.

Así que, a modo de resumen, la modelización del fenómeno de ruptura de los chorros vertidos al aire según las velocidades de salida y al régimen que pertenezcan, se basan en las ecuaciones Navier-Stokes teniendo en cuenta las fuerzas capilares producto de la tensión superficial, los esfuerzos a cizalla producto de la viscosidad, las fuerzas debido al rozamiento del fluido con el gas del medio circundante, los esfuerzos inducidos por la presión existente de éste gas del medio y la fuerza gravitatoria. Por otro lado, en algunas aplicaciones de los chorros además de estos parámetros, en la modelización del comportamiento de éstos se introduce nuevas fuerzas externas como pueden ser la excitación acústica y/o eléctrica (sistemas Inkjet CIJ), o en el caso de la dosificación de combustibles en máquinas térmicas la modelización requiere del análisis de la influencia de la temperatura o de las reacciones químicas entre el fluido y el gas del medio.

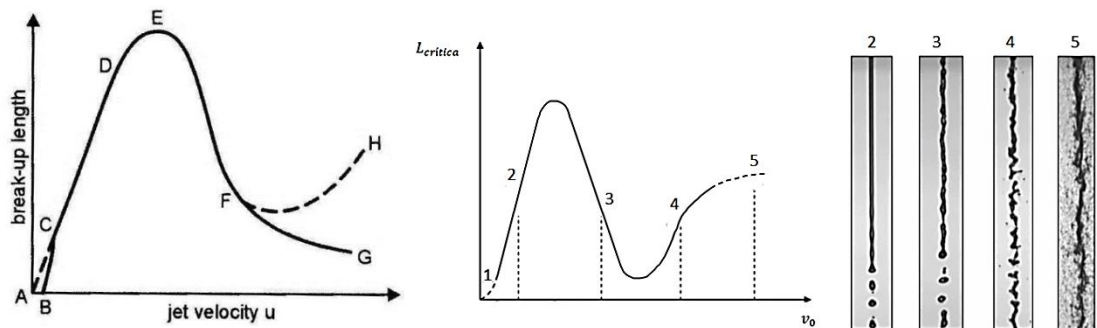


**Figura 106:** Aparición de gotas satélite en el proceso de ruptura de un chorro a bajas velocidades de eyección [203].

## 2.2.2. Tipo ruptura en función de la velocidad en chorros no excitados

En el apartado anterior se expuso de forma básica el marco teórico en el que sustenta las teorías de las inestabilidades en flujos o chorros libres sin excitación externa, es decir mediante los pioneros Savart, Plateau y Rayleigh, los cuales analizaron las rupturas de chorros líquidos no viscosos en régimen laminar. Posteriormente Weber investigo los efectos de la viscosidad y Taylor 1962 [204] los efectos de la densidad del aire los procesos de ruptura. Por otro lado, los trabajos realizados por Sirignano 1993 [205], Lin y Reitz 1998 [206], dan buena cuenta de ello, cubriendo el conocimiento y las teorías acumuladas y establecidas por los investigadores a partir de éstos pioneros. Es decir, se ha considerado que la fenomenología de la ruptura de los chorros es producto de las inestabilidades dinámicas del fluido propiamente y de su entorno, dejando al margen otras posibles causas externas como pueden ser el sobrecalentamiento, la influencia de cargas electrostáticas, la excitación acústica o las reacciones químicas.

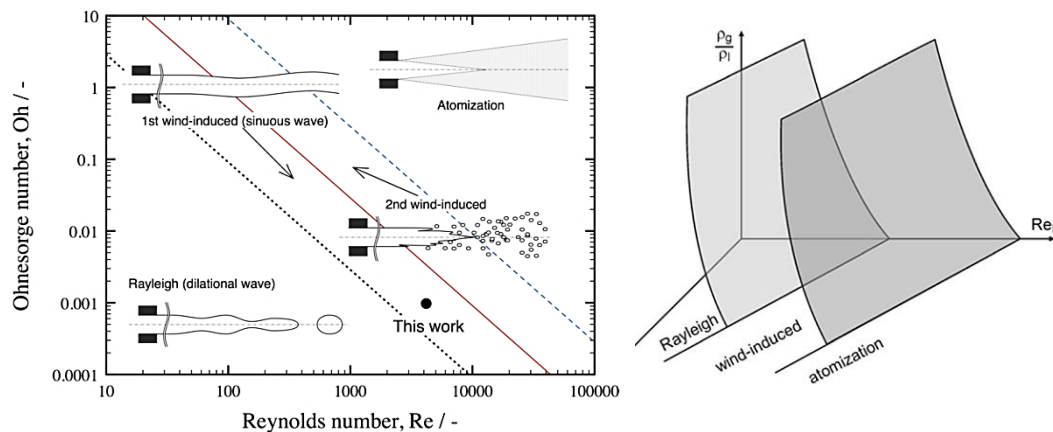
Como se ha comentado anteriormente todo chorro líquido viscoso se desintegra en gotas fenómeno que ocurre cuando éste deja de ser continuo y a una distancia del origen, la cual depende del régimen del escurrimiento, es decir de  $v_0$  o siguiendo la notación anterior  $U_z$  para  $z = 0$ . Numerosos investigadores en este aspecto han representado dicha relación mediante las curvas de estabilidad (McCarthy y Molloy 1974 [207], Lefebvre 1989 [199], Lin y Reitz 1998 [206]). A través de las curvas de estabilidad se puede apreciar que dicha relación solo es lineal en un intervalo de velocidades al cual se le ha llamado: régimen de Rayleigh. A velocidades superiores el aumento de la longitud de ruptura pierde la proporcionalidad mencionada, apreciándose diferentes tipologías de ruptura. Atendiendo al comportamiento de la ruptura del chorro es decir, basándose en la longitud del chorro intacto en relación al diámetro del orificio de salida y el diámetro medio de las gotas Reitz [208] estableció 5 tipos de ruptura que asociados a un intervalo de velocidades dan origen al régimen de ruptura de los chorros, los cuales pueden apreciarse a continuación en la Figura 107.



**Figura 107:** Representación esquemática de una curva de estabilidad (Relación entre longitud crítica y la velocidad de eyección). Régimen de goteo (tramo ABC (1)), Régimen de

*Rayleigh (tramo CD (2)), Primer régimen aerodinámico (tramo EF (3)), Segundo Régimen aerodinámico (tramo FG(4)), Régimen de atomización (tramo H(5))* [198], [209].

Ohnesorge [210] por otro lado fue el primero en distinguir las condiciones críticas a las que se produce la transición entre los distintos modos de ruptura, mostrando la posibilidad de delimitar los regímenes de ruptura a través de la representación gráfica del número adimensional de Kennzahl (hoy conocido como Ohnesorge) versus el Reynolds que como muestra Lefebvre puede ser utilizado en la clasificación de Reitz (ver Figura 108).



**Figura 108:** Representación gráfica de los límites de Ohnesorge para los regímenes de ruptura de los chorros [211]. Representación esquemática incluyendo la variación de la densidad del gas (aire) en los distintos regímenes de ruptura [198].

Siguiendo la clasificación propuesta por Reitz en donde fijando todas las variables que influyen en el fenómeno de ruptura como función de la velocidad de eyección ( $v_0$ ), la formación de las gotas se puede realizar de las 5 formas siguientes:

Régimen de goteo: este régimen corresponde al tramo ABC o la región 1 mostrada en la Figura 107, donde debido a que las velocidades son muy bajas no se produce una columna de fluido y se habla de escurrimiento en vez de eyección y al igual que en el régimen de Rayleigh son los esfuerzos viscosos y la tensión superficial los determinan el desprendimiento de la gota.

Régimen de Rayleigh: en este régimen como ya se ha comentado la tensión superficial es el factor dominante en la ruptura del chorro, éste promueve el crecimiento de las protuberancias axisimétricas hasta provocar su desprendimiento en gotas de un radio superior al del orificio de salida, ésta tipología de ruptura se realiza a velocidades relativamente bajas y la relación entre la longitud de ruptura y la velocidad de eyección es lineal, por otro lado corresponde al tramo CD o la región 2 mostrada en la Figura 107.

Primer régimen aerodinámico: con el aumento del número de Weber, es decir de la velocidad permaneciendo las demás variables constantes, las fuerzas de drag, es decir, las fuerzas asociadas al movimiento relativo entre el chorro y la atmosfera circundante se he

hace presente, fomentando junto con los esfuerzos de la tensión superficial la ruptura del chorro, como resultado se pueden observar un promedio de gotas con un radio similar al del chorro no perturbado, es decir del nozzle, reduciéndose a su vez la longitud crítica respecto al régimen anterior dejando de ser proporcional. El régimen en el que se produce esta tipología corresponde al tramo EF o la región 3 siguiendo la Figura 107.

Segundo régimen aerodinámico: continuando con el aumento del  $We$ , debido a que en el interior del nozzle el flujo se vuelve turbulento, la ruptura del chorro se produce ahora a longitudes de onda más cortas, inducidas por las turbulencias y amplificadas por las fuerzas aerodinámicas. En éste régimen el diámetro de las gotas resultantes es menor que el diámetro de la boquilla y el proceso de desintegración comienza en la superficie donde pequeñas gotitas se separan y gradualmente erosionan el chorro hasta que esté completamente disuelto. En esta tipología se considera que existe dos longitudes de ruptura, una que describe el inicio de la superficie de ruptura (longitud de la superficie intacta) la cual se produce a una distancia que disminuye con el aumento de número de Reynolds tramo FG o la región 4. Y otra que hace referencia a la longitud del núcleo la cual puede crecer a medida que aumenta la velocidad.

Régimen de atomización: este régimen corresponde al tramo iniciado en H o la región 5 mostrada en la Figura 107, en donde los tamaños de las gotas formadas son aún menores que los regímenes precedentes, y la longitud intacta del chorro es prácticamente nula. Por otro lado, la descripción teórica de esta tipología de ruptura es mucho más compleja que en cualquier otro régimen debido a que el proceso de desintegración depende en gran medida de las condiciones de flujo en el interior del nozzle de naturaleza caótica, y debido a las altas velocidades y pequeñas dimensiones de las gotas, la validación de los modelos mediante la experimentación también se antoja dificultosa.

### 2.2.3. Chorros excitados

En los apartados anteriores se ha descrito el concepto de inestabilidad en chorros no excitados y los fenómenos de ruptura de éstos, es decir, cuyas causas se encuentran establecidas dentro del sistema siendo estas naturales y aleatorias, posteriormente se ha descrito las distintas tipologías que pueden darse a medida que se modifican las condiciones de eyección del flujo. En este apartado, aunque de forma muy superficial puesto que carecen de importancia en la presente tesis, se describe los métodos por los cuales se fomentan las inestabilidades del chorro líquido de forma externa al sistema. En este aspecto los chorros pueden verse excitados por medio de la acción acústica, eléctrica, y también por combinaciones de ambos. Por otro lado, se ha dejado al margen la influencia de la temperatura o de las reacciones químicas que puedan sufrir los fluidos eyectados.

### 2.2.3.1. Chorros excitados acústicamente

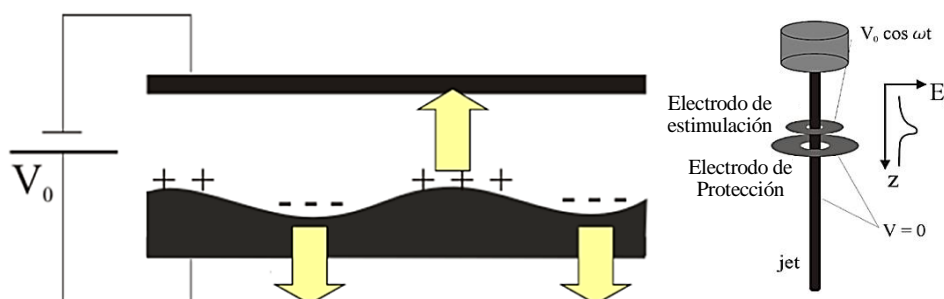
En este caso las perturbaciones iniciales son impuestas empleando actuadores piezoeléctricos, los cuales al vibrar en el rango acústico o ultrasónico, generan ondas de presión que inducen oscilaciones en la salida del chorro. Desde un punto de vista de la teoría de inestabilidades, en este caso la longitud de onda no corresponde a la tasa de máximo crecimiento, sino que, en este caso corresponde a la frecuencia de excitación, generando una gota por ciclo de oscilación.

### 2.2.3.2. Chorros excitados eléctricamente

Hasta ahora se ha analizado los efectos dinámicos en los chorros y se ha comentado en el apartado anterior la influencia de presiones inducidas externamente a fin de fomentar la ruptura del mismo, ahora es el turno de introducir una nueva variable con la cual modificar el comportamiento de los chorros también de forma externa, el potencial eléctrico. Para ello se recurre a la electrohidrodinámica la cual estudia el comportamiento de los fluidos sometidos a la acción de campos eléctricos.

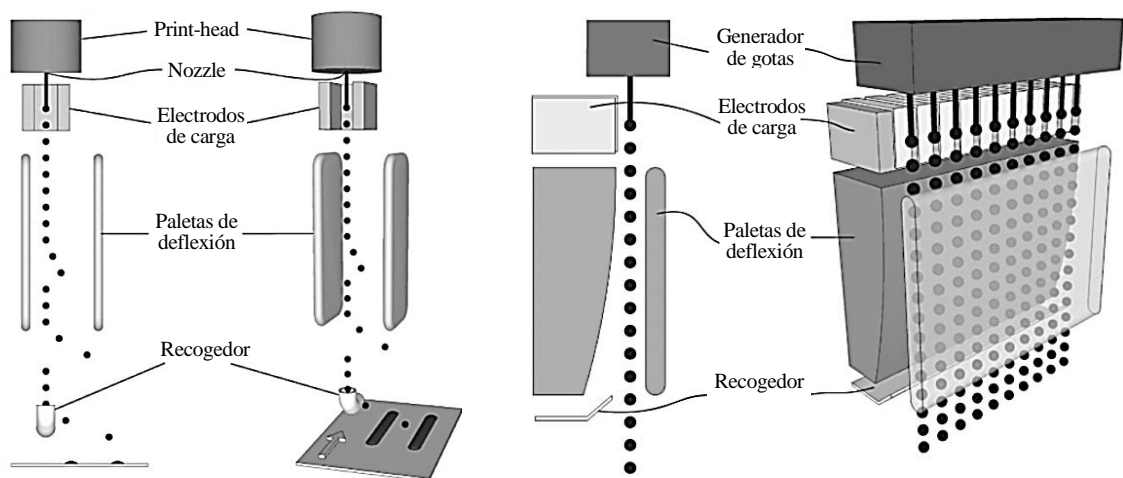
La existencia de una diferencia de potencial eléctrico entre un chorro líquido y aquello que lo rodea da origen a un campo eléctrico. Este campo eléctrico, dependiendo de las tensiones aplicadas, puede ser alterno o continuo (periódicas para la generación de gotas de igual tamaño (similar a la excitación acústica) y mediante pulsos para generar gotas discretas de distintos tamaños). La magnitud de ésta excitación es función de las características del chorro (velocidad, conductividad eléctrica del líquido, etc.) y de los parámetros del sistema de electrificación (longitud del electrodo, intensidad de campo, etc.).

La migración de cargas hacia la superficie del chorro, provocada por el campo eléctrico, es el resultado de la acción de las fuerzas coulombianas sobre los iones del líquido y el causante de la generación de las perturbaciones. Esta migración permite la obtención de chorros electrificados que luego de su ruptura resultan en gotas cargadas.



**Figura 109:** Imagen esquemática de la desestabilización de un fluido estático sujeto a la acción de fuerzas electrostáticas a) y esquema de un chorro excitado mediante un campo eléctrico alterno para controlar la ruptura del mismo b) [212].

Como ya se ha comentado las aplicaciones prácticas de los chorros líquidos son muy numerosas y variadas (formación de fibras, pulverización de pinturas, fertilizantes, pesticidas, producción de polvos metálicos, atomización de combustibles, sistemas de impresión Inkjet CIJ, etc.) y junto con el natural interés desde el punto de vista teórico, ha hecho que el estudio de las inestabilidades en chorros líquidos adquiera gran relevancia. Por otro lado, la estimulación externa de los chorros mediante la excitación acústica y/o eléctrica, busca modificar la dinámica del chorro pudiendo amplificar las perturbaciones, desestabilizando y desintegrándolo en gotas, gotas cargadas que posteriormente son guiadas al sustrato, o también puede amortiguar las protuberancias para que el chorro mantenga su forma cilíndrica por más longitud (como por ejemplo en fuentes modernas).



**Figura 110:** Representación esquemática del sistema de Inkjet CIJ como ejemplo de la aplicación de gotas formadas a partir de la desintegración de chorros bajo excitación externa [168].

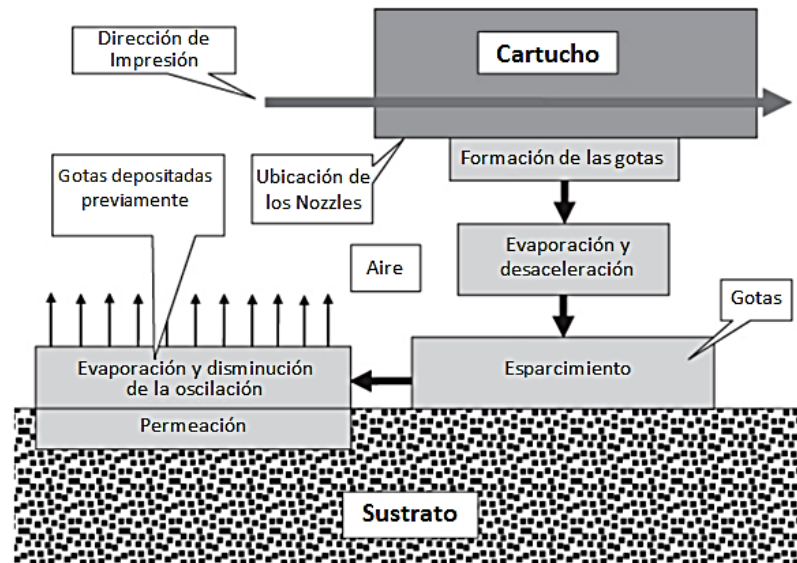


**Figura 111:** Vista real de cuatro cabezales Inkjet CIJ dispuestos en paralelo con nozzles dispuestos en línea eyectando aglutinante para un sistema de impresión tridimensional por tecnología 3DP o de Binder Jetting (BJ) de la compañía ExOne [213].

## 2.3. GENERACIÓN DE GOTAS EN RÉGIMEN DE GOTEO

Como se ha podido apreciar en los apartados anteriores existen diferentes formas de generar gotas, podríamos decir que principalmente en función de la velocidad de salida y en consecuencia del  $We$ , y/o bajo excitación externa. Entre éstos distintos tipos de formación de gotas, los posibles regímenes aplicables en la reproducción de líneas, patrones o imágenes mediante un proceso de deposición de gotas sobre un sustrato (impresión) se puede resumir a cuatro principalmente: en primer lugar por goteo, donde las gotas se forma bajo la acción de la gravedad o a velocidades de salida muy pequeñas y donde el periodo de generación de las gotas son muy lentas (utilizado en fines experimentales, por ejemplo en el campo biomédico). En segundo lugar, tenemos la generación de gotas de forma continua mediante la desintegración de los chorros (sistema CIJ, caso anterior), en tercer lugar mediante sprays (velocidades de salida elevadas y mucha dispersión de gotas) y en tercer lugar tenemos la generación de gotas de forma discreta y a voluntad (sistema DOD) que debido a las altas frecuencias a las que son requeridas las gotas, las velocidades de salida de estas pertenecen al régimen de eyección no al del goteo. Mediante éste sistema se eyectan a voluntad pequeños volúmenes de tinta en estado líquido mediante la reducción del volumen de la cámara que contiene a ésta. Así a partir de este punto dejaremos de hablar de chorros continuos y nos centramos en los chorros discretos, que mediante un tren de impulsos eléctricos con una forma de onda particular adaptada en la reología del fluido a depositar, éstos sistemas de impresión DOD permiten el control del volumen eyectado y tras su posterior reconfiguración, la generación de una única gota esférica. Dicha gota desde su emisión, desde el nozzle, realiza una trayectoria parabólica desacelerada debido al rozamiento con el aire hasta impactar sobre el sustrato donde ésta se esparce y tiene lugar los procesos de evaporación de los solventes, la penetración de la misma en sustratos porosos y/o cambio de fase de las sustancias depositadas. En la figura de a continuación se puede apreciar dichos procesos los cuales en los apartados siguientes se detallan con mayor profundidad.





**Figura 112:** Representación esquemática del proceso de impresión Inkjet mediante el sistema DOD [168].

Por otro lado, se ha de resaltar que en la fabricación aditiva mediante la utilización de sistemas Inkjet, así como en otros campos en donde sistemas de deposición controlada de gotas tienen aplicación, los fluidos utilizados habitualmente tienen comportamientos no newtonianos, pudiendo ser éstos en muchos casos suspensiones, cuya fase continua, acuosa o grasa, poseen solventes, alcoholes, reactivos, etc. y con los cuales rodean a una fase interna sólida y discontinua o dispersa, siendo ésta la causante de la deposición de los materiales constructivos del elemento a fabricar.

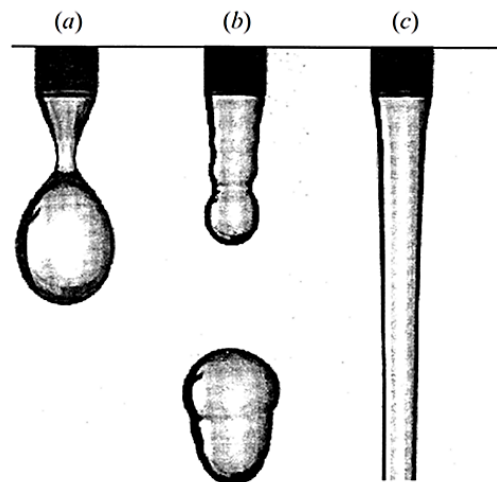
### 2.3.1. Transición entre el goteo y la eyección

Antes de abordar el funcionamiento de los sistemas de impresión por chorro tinta de generación de gotas a voluntad o bajo demanda, se ha considerado oportuno primero analizar la fenomenología asociada a la dinámica de las gotas en regímenes de bajos números de Weber, que como ya se ha comentado anteriormente a través de las aportaciones de Tate (1864), es posible comprender el porqué de su desprendimiento digamos en un tubo capilar, pero dicho desprendimiento requiere de un periodo de tiempo relativamente largo puesto que la velocidad de salida del fluido es muy baja. En este aspecto los sistemas Inkjet DOD requieren de la capacidad de formación de gotas a intervalos de tiempo muy pequeños. Pero, por otro lado, la velocidad de salida del fluido influye directamente en el modo en el que las gotas se forman, al aumentarla pasamos a formar columnas de líquidos o chorros y en consecuencia no una gota sino una sucesión de gotas, las cuales dejarían de ser bajo demanda, fenomenología explicada como ya se ha



comentado, gracias a las aportaciones de Savart (1833), Plateau (1873), Rayleigh (1878) y ampliado posteriormente por muchos otros investigadores más recientes.

Si bien la fenomenología asociada a la formación de las gotas ha sido ampliamente estudiada, así como los regímenes en los que se producen, la transición entre ellos no ha recibido tanta atención, es por ello que se ha considerado oportuno analizar las condiciones que define los puntos de transición entre el régimen de goteo y el régimen continuo, proporcional o de Rayleigh, afín de profundizar en el conocimiento de la dinámica y formación de las gotas de tinta eyectadas en los sistemas Inkjet DOD.



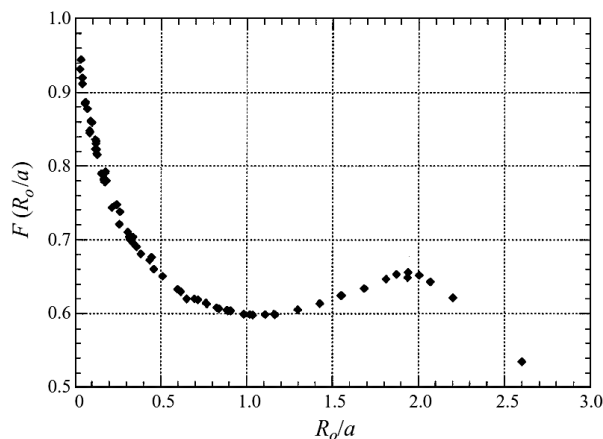
**Figura 113:** Formación de gotas a bajo número de Weber, goteo periódico a), goteo cuasi-periódico o caótico b), régimen proporcional (Rayleigh) c) [214].

En el trabajo de Clanet y Lasheras (1999) [214] de la cual se ha extraído la imagen anterior, se aborda la problemática de definir las condiciones en la que se produce la transición entre el régimen de goteo y el régimen de eyección, aportando una descripción precisa y exhaustiva de las diferentes transiciones observables cuando se aumenta el caudal de un líquido newtoniano al ser vertido por un orificio circular pequeño al aire en condiciones normales. Clanet y Lasheras en este aspecto observaron que en la formación de gotas a bajos números de Weber se aprecia una primera transición de goteo en donde se pasa de la formación constante de gotas (goteo periódico) a un comportamiento cuasi-periódico o caótico donde el tiempo de formación y la masa de las gotas formadas varían con respecto a la anterior. Posteriormente a mediada que la velocidad del flujo aumenta y con ello el  $We$ , observaron la formación de columnas de fluido (chorros) donde el desprendimiento de las gotas se produce aguas abajo a una notable distancia del orificio de salida, siendo ésta cada vez mayor a medida que la velocidad de salida aumenta (Régimen de Rayleigh). Algunos autores en este aspecto han establecido una única la diferenciación entre el régimen de goteo y el de eyección, mediante la medición de la longitud del chorro. Definiendo la

transición mediante el caudal cuya longitud de chorro es diez veces más largo que su diámetro.

### 2.3.1.1. Inicio del régimen de goteo

Tate en 1864 estableció que a  $We$  muy bajos las gotas se rompían del flujo cuando el peso superaba a la tensión superficial, es decir si  $mg > 2\pi R_0 \gamma_{LF}$  (donde  $R_0$  es el radio del flujo libre). De modo que, un fluido al escurrirse por un orificio circular al alcanzar una masa crítica  $m = 2\pi R_0 \gamma_{LF} / g$  éste se desprendía del orificio formando una gota. Treinta y cinco años después Rayleigh en 1899 mientras enfatizaba las dificultades del cálculo teórico de la masa de las gotas que se desprenden del nozzle, realizando un análisis adimensional propuso ésta como:  $m = f(R_0/a)(R_0 \gamma_{LF} / g)$  donde  $a$  representa la longitud capilar ( $a \equiv \sqrt{2\gamma_{LF} / \rho g}$ ) y donde  $f$  es una función obtenida experimentalmente, posteriormente se determinó que  $f(R_0/a)$  podía determinarse constante a un valor de 3,8 para el agua en vez de los  $2\pi$  establecidos por Tate. Harkins y Brown 1919 [181] en este aspecto mostraron a  $f(R_0/a) = f^*(R_0/V_{gota}^{1/3})$  como una curva polinomial de tercer grado presentando una mejor correlación, mejorando en gran medida las mediciones de la tensión superficial de los fluidos. Con un mínimo a  $R_0/a \approx 1$  y un máximo a  $R_0/a \approx 2$  (ver Figura 114), numerosos experimentos se han realizado posteriormente confirmado la validez de dicha curva, la cual muestra en el límite cuando  $R_0/a \rightarrow 0$  y  $F \rightarrow 1$  la misma expresión que Tate (puesto que las gotas son casi esféricas)  $m = 2\pi F(R_0 \gamma_{LF} / g)$ , a medida que la proporción  $R_0/a$  crece, la gota antes de su desprendimiento se aleja de su esfericidad. Se ha de resaltar que  $R_0$  representa el radio del flujo libre en las inmediaciones del orificio de salida, es decir pudiendo ser  $R_0 > R_{0i}$ , en el caso de que el fluido moje al tubo capilar, en cuyo caso  $R_0$  representaría el radio exterior del tubo o mayor en el caso de que no sea un tubo si no un orificio en una placa como en los cabezales Inkjet éste valor podría ser aún mayor y por otro lado,  $R_{0i}$  representa el radio interno del orificio de salida (en regímenes de eyección no se considera dicha apreciación puesto que el fluido sale tan rápido del orificio que éste no alcanza a mojar).



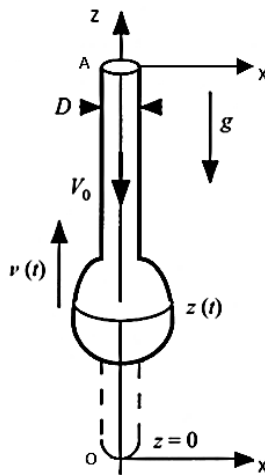
**Figura 114:** Factor Harkins y Brown 1919 donde  $F = f(R_0/a)/2\pi$  [214].

El factor de Harkins y Brown como se ha comentado, establece la esfericidad de las gotas al desprenderse del chorro, lo cual determina el volumen y la tensión a la que éstas se dependen, debido a que modifica la interpretación del perímetro de la estricción de la gota en el que se produce el desprendimiento, de modo que el volumen máximo de las gotas generadas en el régimen de goteo a través de un tubo capilar puede definirse como:

$$V_{drip.} = 2\pi F \left( \frac{R_{0ext.} \gamma_{LF}}{\rho g} \right) \quad 3.74$$

Donde  $R_{0ext.}$  representa el radio exterior del tubo capilar. Así, mediante Young-Laplace podemos establecer que siempre que exista una diferencia de presión entre el fluido aguas arriba del nozzle y la superficie libre de éste dará origen a su escurrimiento, donde el balance entre las fuerzas inerciales, viscosas, superficiales y gravitatorias determinan la formación de las gotas, y mediante Tate se establece que la ruptura de las gotas se produce cuando su peso supera a la tensión superficial siendo el factor de Harkins y Brown obtenido mediante experimentación al que recurrimos en el ajuste del modelo teórico. De modo que, siempre que el fluido supere las fuerzas opositoras existentes en el orificio (superficie libre) se producirá el escurrimiento dando origen a la formación de las gotas.

Dinámica del goteo:



**Figura 115:** Representación esquemática de la dinámica de una gota colgante [214].

En términos adimensionales Clanet y Lasheras establecieron un Weber crítico para el cual el fluido pasa de la formación periódica de gotas a otra caótica. En este aspecto, considerando al fluido como incompresible, viscoso y en particular newtoniano, y siendo el escurrimiento de éste en aire en condiciones normales y bajo la acción de ninguna otra fuerza externa, las fuerzas involucradas en la formación de la gota son la tensión superficial, la viscosidad y la gravedad. De forma que, para determinar dicho We crítico se recurre al uso de las ecuaciones del movimiento con las cuales determinar la dinámica de una gota colgante cuya representación se puede apreciar en la Figura 115, es decir:

$$\frac{d}{dt} \left( m \frac{d(z)}{dt} \right) = -mg + \pi \phi_0 \gamma_{LF} - \rho S v_0 (\tilde{v} + v_0) \quad 3.75$$

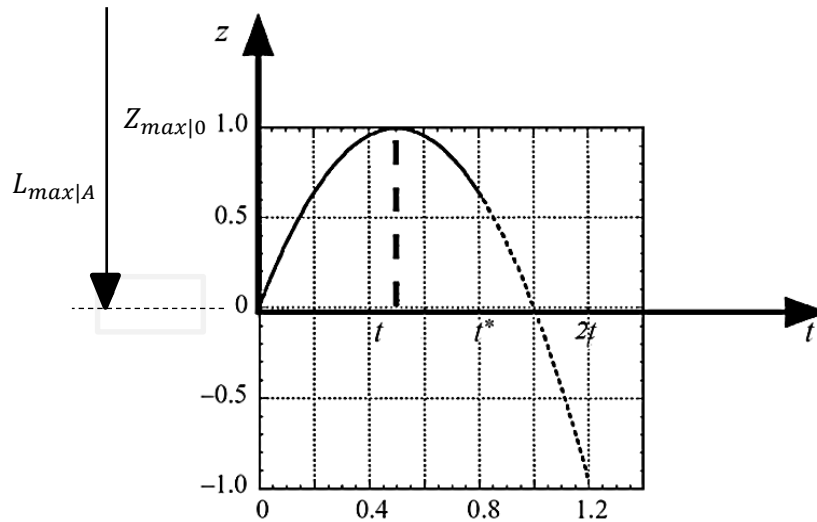
Donde  $m$  representa la masa de la gota definida como:  $m = \rho S(z + v_0 t)$ ,  $v_0$  representa la velocidad de eyección o de salida del fluido,  $t$  tiempo y  $\tilde{v}$  es la velocidad relativa del flujo en sentido axial con la cual la gota de masa  $m$  comienza a formarse ( $\tilde{v} = dz/dt$ ). De modo que, teniendo en cuenta que para  $t = 0$ ;  $m = 0$  y  $z = 0$ , y teniendo en cuenta el teorema de la conservación de la masa donde la sección ( $S$ ) se define como:  $S = \pi \phi^2 / 4$  la ecuación anterior puede reescribirse como:

$$\left( 2v_0 \frac{dz}{dt} \right) + \left( \frac{1}{2} \frac{d^2 z^2}{dt^2} \right) + \left( v_0 t \frac{d^2 z}{dt^2} \right) = -zg + gv_0 t + \frac{4\phi_0 \gamma_{LF}}{\rho \phi^2} - v_0^2 \quad 3.76$$

Donde  $\phi$  representa al diámetro del flujo distinto de  $\phi_0$  (diámetro interior del tubo capilar) de forma que solucionando esta ecuación diferencial se obtiene:

$$z(t) = -\frac{1}{2} \gamma_{LF} t^2 + (\tilde{v} - v_0) t \quad ; \quad \gamma_{LF} = \frac{g}{3} \quad ; \quad \tilde{v} = \sqrt{\frac{4\phi_0 \gamma_{LF}}{\rho \phi^2}} \quad 3.77$$

Así en la modelización de Clanet y Lasheras se puede apreciar el comportamiento parabólico de  $z(t)$  representado gráficamente en la Figura 116, en la cual se puede apreciar que al alcanzar la  $L_{max|A}$  (Equivalente al punto o de la Figura 115) situación que ocurre tras la ruptura de una gota previa, la formación de la siguiente gota se produce debido al ascenso del parte del flujo a velocidad  $\tilde{v}$  mientras éste a su vez se desplaza hacia abajo a  $v_0$ .

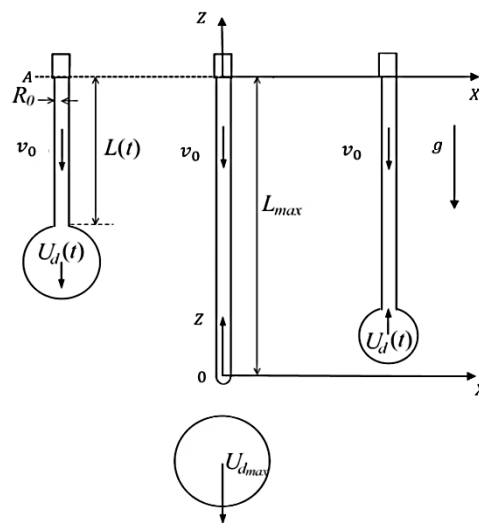


**Figura 116:** Comportamiento parabólico de  $z(t)$ , en una gota colgante [214].

Por otro lado, puesto que  $z(t)$  es una función polinómica su máximo de pendiente 0, puede definirse en:

$$t = \frac{(\tilde{v} - v_0)}{\gamma_{LF}} \quad ; \quad Z_{max|0} = \frac{(\tilde{v} - v_0)^2}{2\gamma_{LF}} \quad 3.78$$

Dicho punto máximo ( $Z_{max|0}$ ) tiene lugar a la mitad del periodo de formación de las gotas ( $T = 2t$ ), y es en este punto donde se alcanza una masa crítica, donde las fuerzas inerciales y gravitatorias superan a la tensión superficial y a partir del cual la gota se ve condenada a separarse del flujo, situación que tiene lugar a  $t^*$  donde  $t < t^* < T$ . Por otra parte, en dicho punto ( $Z_{max|0}$ ) también se alcanza al igualar las velocidades  $\tilde{v}$  y  $v_0$ . De modo que, mientras  $t < t^*$  la gota permanece unida al flujo y de igual modo, a partir de  $t > t^*$  la gota se ha separado del flujo dando inicio al siguiente ciclo, en donde parte del fluido retrocede mientras en oposición al flujo durante el transcurso de tiempo  $2t - t^*$  dando inicio a la formación de la siguiente gota  $L_{min|A}$  (ver Figura 117).



**Figura 117:** Representación esquemática del ciclo completo de generación de gotas en régimen periódico [215].

En la imagen anterior se puede apreciar el ciclo completo de formación de las gotas, de la cual es posible establecer la siguiente premisa; puesto que la longitud a la que se produce el desprendimiento de la gota respecto el origen es  $L_{max|A}$  podemos decir que:

$$L_{max|A} \approx v_0 T \quad 3.79$$

De modo que, la expresión anterior puede ser rescrita como:

$$L(t) = L_{max|A} - z(t) \quad 3.80$$

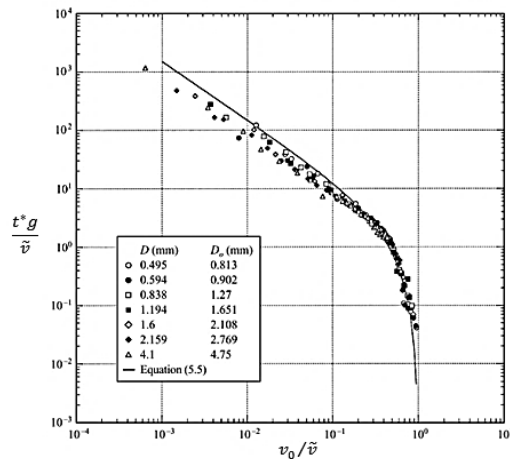
Asumiendo que  $L_{max|A}$  es la longitud necesaria para la formación de las gotas y siendo ésta  $L_{max|A} \geq \emptyset_0$  y constante en el régimen de goteo periódico, se puede decir que:

$$Z_{max|0} = v_0 t^* \quad 3.81$$

Expresión que da origen mediante la combinación de las ecuaciones 3.77 y 3.78 a:

$$\frac{t^* g}{\tilde{v}} = \frac{3}{2} \frac{\tilde{v}}{v_0} \left[ 1 - \frac{v_0}{\tilde{v}} \right]^2 \quad 3.82$$

Clanet y Lasheras comprobaron la validez de la modelización mediante la expresión anterior mostrando resultados congruentes siendo más precisos los resultados teóricos a medida que  $v_0/\tilde{v} \rightarrow 1$  (Ver Figura 118).



**Figura 118:** Comparación entre el periodo de formación de la gota calculado y los resultados experimentales [214].

Por otro lado, teniendo en cuenta que en la ruptura de las gotas intervienen principalmente las fuerzas capilares y las inerciales, a través de ellas es posible establecer la velocidad inicial de salida a partir de la cual las gotas tendrían lugar y el intervalo de tiempo en el que las gotas se producirían, es decir, teniendo en cuenta que  $\dot{m}v_0 \geq F_c$  y por tanto  $v_0 \geq (F_c/\rho\pi R_0^2)^{1/2}$  siendo  $F_c$  las fuerzas capilares, que teniendo en cuenta que la longitud necesaria para formar una gota ha de ser como mínimo  $L \geq \phi_0$  y estableciendo las fuerza capilares como  $F_c = 2\pi F R_0 \gamma_{LF}$  el tiempo de ruptura de las gotas se puede definir como:

$$(a) \quad t^* = \sqrt{\frac{2}{F_c}} \sqrt{\frac{\rho R_0^3}{\gamma_{LF}}} \quad ; \quad (b) \quad t^* \approx \sqrt{\frac{\rho \phi_0^3}{\gamma_{LF}}} \quad 3.83$$

Donde muchos autores hacen referencia la expresión 3. 83b a la hora de definir el tiempo de ruptura de las gotas, Clanet y Lasheras [214], Clasen et al. [215] o Eggers y Dupont [178] por ejemplo. De modo que, con el objetivo de establecer las condiciones necesarias para que un fluido comience a gotear la velocidad de salida a través de un orificio circular ha de ser:

$$v_0 \geq \sqrt{\frac{2F\gamma_{LF}}{\rho R_0}} \quad 3.84$$

El volumen de las gotas sin embargo, puede hallarse mediante la integración de la expresión 3. 85, donde teniendo en cuenta que el caudal volumétrico se expresa como sección por velocidad tenemos:

$$\frac{d}{dt} V_g = \dot{V} \left( \frac{v_0 + v_g}{v_0} \right) \quad 3.85$$

Donde  $V_g$  representa el volumen de la gota y  $v_g$  la velocidad de la misma, la cual se define como  $v_g = dz(t)/dt$ , así teniendo en cuenta que  $v_g = (\tilde{v} - v_0) - gt/3$ , la ecuación anterior puede reescribirse como:

$$V_g = \pi R_0^2 \left[ \tilde{v}t - \frac{1}{6}gt^2 \right] \quad 3.86$$

### 2.3.1.2. Límite del goteo periódico inicio del perturbado

Como se ha comentado anteriormente los cambios en el comportamiento de la formación de las gotas viene influenciado principalmente por la magnitud de la velocidad de salida del fluido por el nozzle, en este aspecto Clanet y Lasheras [214] establecieron un Weber crítico con el cual definir las condiciones en las que ocurre la transición entre el goteo periódico y el caótico, Clasen et al. [215] por otro lado, basándose en el trabajo previo de Clanet y Lasheras profundizaron en esta problemática ampliando su comprensión, en cuyo trabajo plantean la utilización de una velocidad crítica a la cual el fluido pasa de formar gotas periódicas a formarlas de forma irregular, para ello tienen en cuenta la longitud mínima ( $L_{max|A}$ ) término al que se hace referencia en la ecuación 3. 80.

Bajo experimentación se ha podido comprobar que la ruptura de las gotas (agua) en régimen de goteo periódico tienen lugar típicamente a una distancia del nozzle de entorno a los  $1\phi_0$ , dicha distancia por otro lado, puede verse incrementada hasta los  $3\phi_0$  ó  $5\phi_0$ , siendo éste el límite en donde las gotas pasan a generarse irregularmente perdiéndose periodicidad. Posteriormente a medida que aumentamos la velocidad de salida del fluido cuando la ruptura de las gotas se encuentra a una distancia  $L_{max|A} \geq 10\phi_0$  se considera que este ha entrado en el régimen de eyección (nótese que en este aspecto  $L_{max|A}$  equivale a la  $L_{critica}$  del régimen de Rayleigh ecuación 3. 61, ver también Figura 104) y por tanto, las gotas se produce por a la desintegración del chorro debido al crecimiento de una perturbación inicial.

De modo que, teniendo en cuenta el modelo anterior donde se describe la dinámica de la formación de las gotas, es posible establecer que teniendo en cuenta el carácter periódico del mismo:  $\int_0^T v_g(t)dt$  debe ser igual aun  $\delta L$  respecto o. Es decir a la diferencia entre la longitud de ruptura de la gota y la longitud máxima, que en el caso del régimen periódico tenemos que es:

$$\int_0^T v_g(t)dt \cong 0 \quad 3.87$$

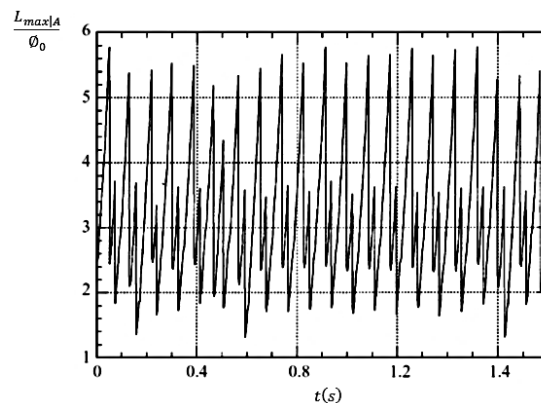
Las observaciones realizadas por distintos investigadores de las gotas con cámaras de alta velocidad muestran que a menudo  $\delta L$  es significativamente inferior  $Z_{max|0}$  y por tanto despreciable, luego retomando la ecuación 3. 77 rescrita ahora como:

$$v_0 t^* = -\frac{1}{2}\gamma_{LF}t^2 + (\tilde{v} - v_0)t \quad 3.88$$

Donde  $t^*$  es el tiempo de ruptura y  $t$  es la variable de tiempo general. Asumiendo que estamos en  $Z_{max|0}$  o lo que es lo mismo cuando  $L(t)$  es mínima respecto a A y por tanto  $L_{max|A} + Z_{max|0} = 0$  situación que se produce en un trascurso de tiempo  $t$  (ecuación 3. 80), así de la expresión anterior se obtiene:

$$v_{critica} = \tilde{v} \left( 1 + \frac{1}{3}\epsilon - \sqrt{\frac{2}{3}\epsilon + \frac{1}{9}\epsilon^2} \right) ; \quad \epsilon = \frac{gt^*}{\tilde{v}} \quad 3. 89$$

Es decir, cuando la velocidad de salida del flujo  $v_0$  supera esta velocidad crítica  $v_{critica}$  implica que  $L_{min|A} > 0$  luego se pierde la periodicidad al ser  $L_{max|A} \ll |Z_{max|0}|$  lo que supone que al retarse el flujo tras la ruptura, y por tanto al haber sobrepasado la masa crítica, dicha aportación de masa al flujo inicial, es distinta cada ciclo haciéndose aperiódico o anárquico ruptura del mismo (ver gráfica siguiente). Por otro lado, se ha de decir éste segundo régimen de goteo tiene lugar en un estrecho rango de velocidades habiendo sido estudiada en profundidad por otros investigadores como un ejemplo del comportamiento dinámico no lineal de los fluidos, Martien et al. [216], D'Innocenzo y Renna [217] dan buena cuenta de ello.



**Figura 119:** Representación adimensional de  $L_{max|A}$  en función del tiempo para una velocidad de salida del fluido superior a la crítica  $v_{critica}$  [214].

En cuanto al volumen de las gotas, puesto que la formación de éstas se realiza de forma caótica pudiendo ser diferentes una de otra, el valor máximo de cada una de ellas depende del período ( $T$ ) o lo que es lo mismo, de la duración desde la ruptura de la gota anterior a la ruptura de ésta, de modo que al igual que en la ecuación 3. 86 dicho volumen máximo se define ahora como:

$$V_{g,max} = 6\pi R_0^2 v_0 \left( \frac{\tilde{v} - v_0}{g} \right) \quad 3. 90$$

Que en términos de definir cuál es el volumen crítico de las gotas ( $V_{crit}$ ), para las cuales se delimita el comienzo del régimen caótico, es necesario utilizar  $v_{critica}$  como velocidad de salida a través del nozzle. Es importante resaltar que en este caso, el factor de ajuste de Harkins y Brown con el cual se tiene en cuenta la mojabilidad del orificio de salida y la



esfericidad de las gotas no puede utilizarse puesto que dicho factor es muy sensible a la variación en el flujo y solo es útil para el goteo periódico. Al encontrarse en el límite de transición entre el régimen periódico y el caótico éste carece de sentido, es por ello que, Clasen et al.[215] recurre a corroborar experimentalmente éste valor teórico calculado mediante la expresión siguiente 3. 91:

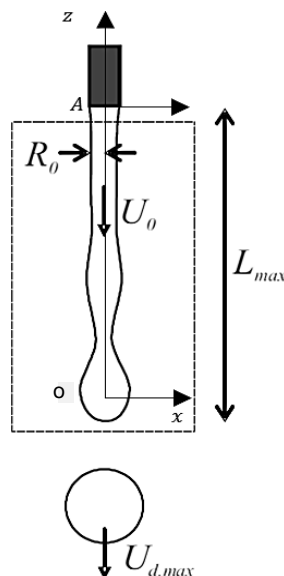
$$V_{crit} = 6\pi R_0^2 v_{critica} \left( \frac{\tilde{v} - v_{critica}}{g} \right) \quad 3. 91$$

### 2.3.1.3. Límite del régimen de goteo caótico y transición al régimen de eyección

Del mismo modo que en el establecimiento del inicio del goteo regular y del goteo caótico, ahora en la transición entre el goteo cuasi-periódico y la formación del chorro, se ha recurrido al balance de las fuerzas involucradas entre dos volúmenes de control, uno el del chorro, delimitado por las secciones perpendiculares al punto A (inmediaciones del nozzle) y al punto o (justo después de la separación de las gotas con respecto al flujo), y un segundo volumen de control el cual corresponde al volumen de la gota ya separada del chorro, de modo que podemos establecer que:

$$F_{v,c} - \dot{m}v_0 - mg = -\frac{\rho V_{g,max}v_g}{T} \quad 3. 92$$

Donde  $F_{v,c}$  representa los esfuerzos viscosos y capilares,  $\dot{m}$  el caudal másico de salida y  $m$  la masa existente entre los dos puntos de referencia (A, o). Por otra parte y del otro lado de la igualdad, T representa el periodo de desprendimiento de dos gotas consecutivas y  $V_{g,max}$  representa el volumen de la gota,  $v_g$  su velocidad y  $\rho$  su densidad, a continuación se muestra una representación esquemática de dicha situación.



**Figura 120:** Representación esquemática de la formación de una gota en régimen de eyección [215].

En la expresión 3. 92 se hace referencia a los esfuerzos viscosos y capilares, es decir debido a la tensión superficial del fluido dicha fuerza se puede definir como:

$$F_{v,c} = \pi R_0^2 \tau_{zz} + 2\pi R_0 \gamma_{LF} \quad 3. 93$$

Donde el segundo término hace referencia a la tensión superficial (nótese que no se usa el factor de Harkins y Brown presente en el goteo), mientras que el primer término hace referencia a otra tensión (axial) el cual puede expresarse como:  $\tau_{zz} = \sigma_{zz} - P$  donde la presión  $P$  a su vez puede ser remplazada por:  $P = \gamma_{LF}/R_0 + \sigma_{rr}$  de modo que, el esfuerzo axial en el nozzle  $\tau_{zz}$  puede ser expresada como:

$$\tau_{zz} = (\sigma_{zz} - \sigma_{rr}) - \frac{\gamma_{LF}}{R_0} \quad 3. 94$$

Donde el segundo término hace referencia a la presión capilar del nozzle mientras que el término de la izquierda hace referencia a los esfuerzos viscoso-elásticos producto de la reología del fluido ( $\sigma_{reolog}$ ). De forma que, la fuerza  $F_{v,c}$  puede reescribirse como:

$$F_{v,c} = \pi R_0^2 \sigma_{reolog} + \pi R_0 \gamma_{LF} \quad 3. 95$$

Una vez definido los esfuerzos viscosos y capilares que se oponen a la salida del fluido podemos reescribir el balance de fuerzas expuesto en la ecuación 3. 92, aunque por otra parte a se ha de resaltar que, afín de simplificar la presente modelización se ha considerado oportuno despreciar el esfuerzo visco-elástico del fluido, de modo que:

$$\underbrace{\pi R_0 \gamma_{LF} - \rho \dot{V} v_0 - \rho \pi R_0^2 L_{max|A} g}_{Chorro} = - \underbrace{\frac{\rho V_{g,max} v_g}{T}}_{Gota} \quad 3. 96$$

Nótese que en la ecuación anterior de la modelización de Clasen et al. [215], el término asociado a los esfuerzos viscoso-capilar difiere en un factor de dos con respecto a la modelización de Clanet y Lasheras [214], apreciable en la ecuación 3. 75, dicho factor ha sido motivo de controversia anteriormente como se discute en el trabajo de Eggers 1997 [176], por ello nos parece oportuno obviar dicho detalle afín de no desviarnos de los objetivos del presente trabajo de investigación. Así pues, asumiendo que  $V_{g,max}/T = \dot{V}$ , y teniendo en cuenta que en el límite del goteo caótico la velocidad de ascenso del flujo  $\tilde{v}$  en el punto de ruptura  $L_{max|A}$  equivale a la velocidad  $v_0$  y por tanto la velocidad de la gota es cero de la ecuación anterior podemos establecer que:

$$\dot{V}_{Crítico} = \dot{V}_{Límite} \left[ 1 - \frac{\rho \pi R_0^2 L_{max|A} g}{\pi R_0 \gamma_{LF}} \right]^{\frac{1}{2}} ; \quad \dot{V}_{Límite} = \pi R_0^{3/2} \sqrt{\frac{\gamma_{LF}}{\rho}} \quad 3. 97$$

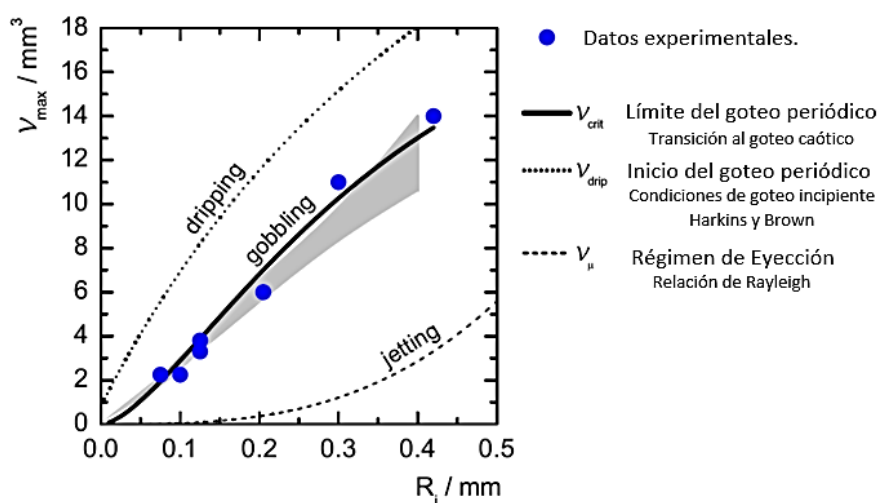
Es decir, siempre que el flujo volumétrico se mantenga por debajo del caudal ( $\dot{V}_{Crítico}$ ) el goteo se realizará de forma caótica, donde el caudal límite ( $\dot{V}_{Límite}$ ) representa el límite de transición entre el goteo caótico y la eyección para el agua, el cual representa

adimensionalmente  $We = 1$ , pero en la práctica los experimentos muestra que la transición ocurre a una velocidad de salida ligeramente inferior y por tanto a un  $We < 1$ .

Por otro lado, en cuanto al volumen de las gotas generadas en régimen de eyección, es decir a  $We \geq 1$ , atendiendo a la modelización de la inestabilidad de Plateau-Rayleigh comentada anteriormente, mediante la ecuación 3. 73 podemos definir el volumen de las gotas en dicho régimen como:

$$V_{\mu} = \pi R_0^2 c \left( We^{1/2} + 3 \frac{We}{Re} \right) \quad 3. 98$$

A continuación se muestra gráficamente los límites en donde tiene lugar las transiciones entre los distintos regímenes de goteo y eyección identificados por Clanet y Lasheras, mediante la modelización propuesta por Clasen et al. (Ver Figura 121). En ella podemos apreciar el volumen de las gotas generadas en función del diámetro interior del nozzle en el régimen de goteo periódico teniendo en cuenta el factor de Harkins y Brown (ecuación 3. 74), el volumen crítico de las gotas el cual delimita el goteo periódico del caótico (ecuación 3. 91) y su comprobación experimental, por último se muestra el volumen de las gotas generadas en el régimen de eyección, es decir mediante la modelización de Rayleigh anteriormente expuesta donde la formación de gotas se llega a cabo mediante la desintegración de chorros no excitados.



**Figura 121:** Volumen de las gotas generadas a distintos regímenes en función del radio interno del nozzle [215].

Hasta ahora se ha abordado la dinámica del goteo sin tener en cuenta el efecto de la gravedad en el caudal másico que se va escurriendo por el orificio de salida a pesar de ello se ha podido establecer las condiciones a las cuales tiene lugar la transición entre los distintos regímenes de goteo y la eyección basándonos en la teoría elemental, pero dicha modelización puede verse refinada acercándose más a la realidad si consideramos que la velocidad del fluido aguas afuera del nozzle es  $v_0$  una función de la  $Z$ , es decir:

$$v^2 = v_0^2 + 2gh \rightarrow v_{oz} = v_0 \left[ 1 + \frac{2gh}{v_0^2} \left( 1 - \frac{z}{h} \right) \right]^{1/2} \quad 3.99$$

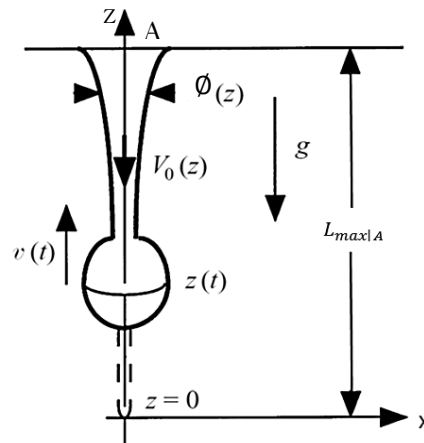
De forma que, basándonos en la modelización propuesta por Clanet y Lasheras [214] (ver Figura 122), las ecuaciones anteriores describen la evolución de la velocidad desde el nozzle (punto A) y desde el punto de ruptura donde  $L$  es máxima (punto o). Por otro lado, recurriendo a la segunda ley de Newton mediante el uso de la ecuación del movimiento con la cual analizar la dinámica de las gotas colgantes ahora bajo la influencia de la gravedad ésta en dicha modelización fue expresada como:

$$\frac{d}{dt} \left( m \frac{d(z)}{dt} \right) = -mg + \pi \phi(z) \gamma_{LF} - \rho S(z) v_{oz} [v_{oz} + \tilde{v}(z)] \quad 3.100$$

Dónde a diferencia de la expresión 3.75 ahora la sección del chorro evoluciona en función de la posición ya que el diámetro del mismo no es constante  $\phi(z)$ . Por este motivo, del principio de conservación de la masa donde para un fluido incompresible  $\dot{V} = cte$  luego  $S_0 v_0 = S v$  tenemos que visto desde o:

$$\frac{d}{dt} (m) = \rho S(z) [v_{oz} + \tilde{v}(z)] \quad 3.101$$

La introducción de la aceleración del flujo por parte de la gravedad explica la reducción de la sección como consecuencia del principio de conservación de la masa, como se puede apreciar en la Figura 122, en donde se representa esquemáticamente la formación de las gotas siendo esta imagen más próxima a las observadas en la realidad, y donde la viscosidad tiende a reducir la tasa de ruptura aumentando la longitud a la que tiene lugar y en consecuencia el tamaño de la gota (ver Figura 113).



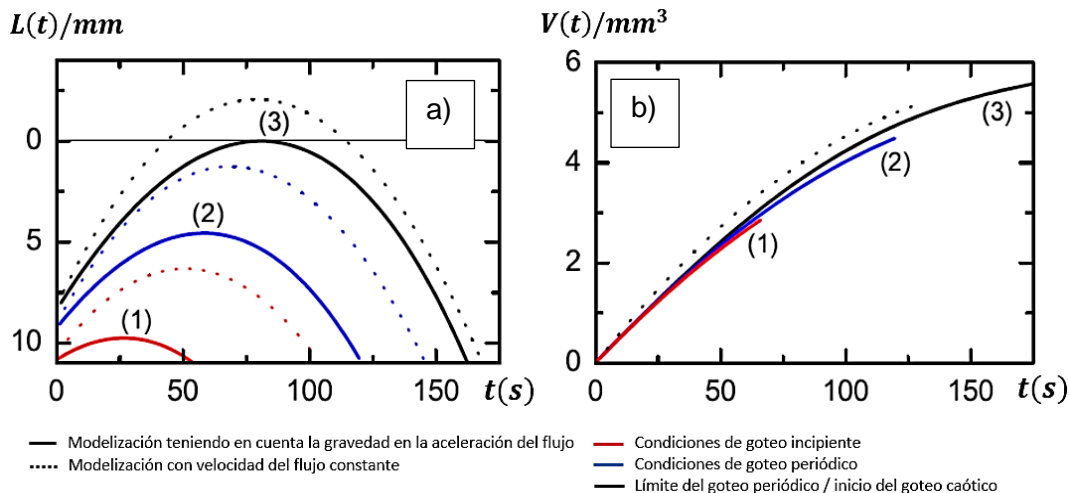
**Figura 122:** Representación esquemática de la dinámica de una gota colgante bajo la influencia gravitatoria [214].

En el trabajo Clanet y Lasheras se alcanzó una solución al fenómeno mediante asociaciones de variables adimensionales mientras que posteriormente en el trabajo Clasen et al. [215] se afirmó la importancia de la gravedad en dichas modelizaciones al comprobarse que su

contribución podía variar la velocidad de los chorros de forma significativa la cual estimaron mediante la siguiente expresión:

$$\delta v = v_{0z} - v_0 ; \quad \frac{\delta v}{v_0} \approx \frac{gL_{max|A}}{v_0^2} \quad 3.102$$

En dicho trabajo posterior también se analizó la influencia de la gravedad a distintos números de Weber o lo que es lo mismo a distintos regímenes dentro del goteo y por tanto a  $We < 1$ . La figura de a continuación a fe de ello.



**Figura 123:** Efectos gravitatorios en la formación de las gotas dentro del régimen de goteo. Evolución en la longitud del chorro a). Volumen de las gotas en función del ciclo de formación b) [215].

De manera que, se podría decir que a medida que nos alejamos del punto o y por tanto incrementamos  $z(t)$  disminuyendo  $L(t)$  debido a los efectos gravitatorios la velocidad del chorro  $v_{0z}$  disminuye, lo cual concuerda con el incremento del diámetro del mismo y con las imagen tomadas en la experimentación. En relación al trabajo de Clasen et al. [215] en donde se comparan los efectos de la gravedad a distintos regímenes y en concreto en condiciones de goteo inminente, goteo periódico y en el límite del inicio del goteo caótico o aperiódico, de las imágenes anteriores (Figura 123a) podemos apreciar como la introducción de los efectos gravitatorios reducen la longitud  $L(t)$  de los chorros en todos los escenarios contemplados reduciéndose a su vez el período de formación de las gotas tras la ruptura de los mismos y haciéndose menos significativo a medida que aumentamos el  $We$ , es decir, la velocidad de salida de los chorros. Por otra parte, en la Figura 123b se puede apreciar la evolución del volumen de las gotas generadas en función de la duración del ciclo de formación de las mismas, con lo cual en régimen de goteo mientras menor sea éste (el período) más pequeño es el volumen generado y en este aspecto, indistintamente de las condiciones en las que nos encontremos dentro de este régimen, la gravedad reduce aún más aunque ligeramente el volumen de las gotas generadas para un mismo período de formación.

## **2.4. GENERACIÓN DE GOTAS MEDIANTE CHORROS DE TINTA DISCRETOS (Tecnología de DOD por piezoeléctricos)**

Como hemos podido apreciar hasta ahora las gotas se generan de forma continua distanciadas temporalmente, siendo este periodo ( $T$ ) de mayor o menor magnitud y regular o no, en función del caudal de salida. En el caso que nos ocupa, la impresión, o reproducción de líneas y patrones mediante la deposición controlada de gotas, siendo esta reproducción bidimensional o mediante la superposición de capas tridimensional, las gotas por las peculiaridades del sistema DOD y de los patrones a reproducir ya no pueden ser generadas de forma continua y por tanto han de generarse bajo demanda (un ejemplo de ello es la reproducción de líneas discontinuas, requieren de un control en los tiempos de generación de las gotas partiendo de la base que éste (el sistema) se desplaza en un carro a velocidad constante). En los sistemas de impresión CIJ pese a que las gotas son generadas de forma continua algunas de éstas son redirigidas al depósito y por tanto, su deposición sobre el sustrato no es continua y tampoco periódica.

Por otro lado, las solicitudes de los sistemas de impresión requieren periodos de formación de gotas muy reducidos del orden de los micros segundos o inferiores en sistemas continuos CIJ. Por tanto, afín de alcanzar periodos de generación de gotas tan reducidos, las velocidades de salida del flujo han de ser muy elevadas cuyos caudales se encuentran dentro del régimen de eyección, que en los sistemas DOD han de ser discretos y por tanto, en vez de flujo deberíamos llamarlos volúmenes discretos de tinta eyectados.

La reproducción de líneas y patrones como ya se ha comentado puede realizarse mediante la deposición de gotas sobre el sustrato, generadas a partir de un nozzle o múltiples nozzles. Por lo general los sistemas de impresión utilizan múltiples nozzles dispuestos a lo largo de una línea recta o en forma matricial. Por otro lado, en la presente tesis llamaremos al cabezal de impresión al dispositivo que contiene a los nozzles, los cuales van alojados en el interior del carro de impresión el cual posee un grado de libertad. En el caso en el que el depósito de tinta y los nozzles se encuentren unidos en un único dispositivo sustituible, le llamaremos a éste cartucho. El cual a su vez irá alojado en el cabezal de impresión y éste a su vez unido o solidario al carro de impresión. Por otro lado, el desplazamiento en dicho carro de impresión por lo general es lineal a lo largo de un eje, mientras que el sustrato se desplaza de forma dependiente a lo largo del otro eje, afín de cubrir toda la superficie bidimensional de

éste. Pudiendo ser también el sustrato el que se desplaza, mientras los cabezales se encuentran fijos. Sin embargo, cabe destacarse que en los sistemas Inkjet donde el carro es móvil, éste por lo general no permite el seguimiento de un contorno bidimensional o tridimensional, a diferencia del Nhibrid32D el cual en principio sí podría aunque no hacemos uso de esta propiedad.

#### **2.4.1. Funcionamiento de los sistemas Inkjet DOD por piezoeléctricos**

El funcionamiento de los sistemas Inkjet DOD por piezoeléctricos equivale a utilizar tantas bombas volumétricas como nozzles tenga el cabezal o el cartucho. Bajo un conducto de alimentación general y sin ningún tipo de válvula, cada nozzle contiene una cámara de bombeo que, al reducir su volumen por la acción del piezoeléctrico, debido al principio de conservación de la masa y puesto que el fluido es incompresible, produce el desplazamiento de éste llevándose a cabo la eyección a través del orificio de salida. Por otro lado, debido a las altas frecuencias requeridas en la generación de las gotas y puesto que el piezoeléctrico tras cada eyección ha de volver a su estado inicial permitiendo el llenado de la cámara de bombeo y de esta forma poder volver a generar las gotas siguientes de forma cíclica o no, y puesto que por otro lado, estos sistemas de inyección por sus reducidas dimensiones carecen de valvulería para el control y direccionamiento del flujo, se recurre a la acústica para el control de la propagación y atenuación de las ondas sónicas o de presión generadas por el piezoeléctrico. Estas ondas de presión son las responsables de la eyección de los volúmenes discretos de tinta que posteriormente debido a la gravedad y la tensión superficial se reconfiguran en forma esférica formando las gotas, o como se ha comentado anteriormente debido el comportamiento no lineal del flujo libre éste puede convertirse en una gota esférica seguida de múltiples gotas satélites de menor tamaño (caso a evitar).

En este apartado abordaremos el funcionamiento de los sistemas de impresión por chorro de tinta mediante piezoeléctricos desde el punto de vista de la mecánica de fluidos y recurriendo a la acústica para el control de la dinámica del sistema, para ello se ha tomado como base el diseño de un sistema Inkjet multi-nozzle de cámara de bombeo alargada basado en el resonador de Helmholtz [218]. A continuación en la Figura 124 se muestra de forma esquemática el diseño básico conceptual de un cabezal de impresión mono-nozzle basado en el resonador de Helmholtz.

En primer lugar, se ha considerado oportuno repasar algunos conceptos básicos de la acústica, la ciencia que estudia la física del sonido, es decir estudia la propagación de ondas de presión a través de un medio elástico sólido, líquido o gaseoso.

La propagación del sonido involucra transporte de energía sin transporte de materia, en el caso de los medios continuos digamos los fluidos, la transmisión de las ondas de presión se realizan por la compresión de las moléculas unas con otras. Es por ello que en función del

medio en el que estas ondas de presión o sónicas se propagan tendrán más o menos rapidez.

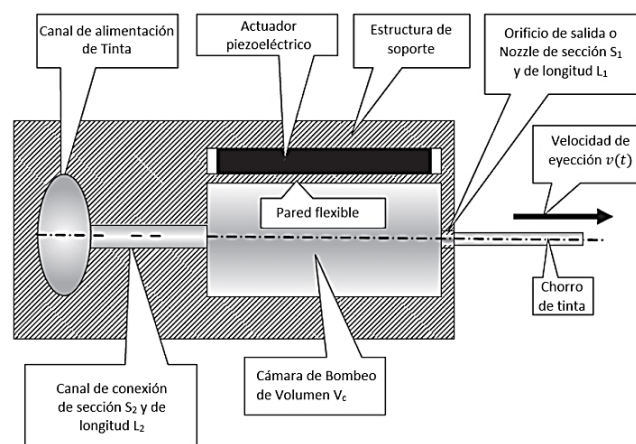
La velocidad de propagación de las ondas acústicas es función de la compresibilidad del medio, en un medio compresible las moléculas pueden juntarse (compresión) o alejarse (rarefacción) para formar estas ondas de presión, por tanto, mientras más incompresible sea el medio de propagación más inmediato es la transmisión y mayor es la rapidez de la onda de sonido. Por otro parte, la densidad ( $\rho_0$ ) también juega un papel fundamental en la velocidad de propagación cuanto menor sea la densidad a igualdad de todo lo demás mayor es la velocidad de propagación de la onda, de modo que en un medio continuo líquido:

$$c = \sqrt{\frac{K_b}{\rho_0}} \quad 3.103$$

Donde  $K_b$  representa el módulo de compresibilidad adiabático del medio, que en medios sólidos equivaldría al módulo de Young ( $E$ ), y donde  $c$  representa la velocidad del sonido en dicho medio líquido, siendo  $\rho_0$  la densidad de éste. Por otro lado, tenemos la presión acústica cuya magnitud se define como la diferencia entre la presión generada por la onda y la presión atmosférica o lo que es lo mismo, el incremento de la presión debido a la modificación del volumen del medio al propagarse la onda:

$$p = P - P_0 \rightarrow p = K_b \frac{\Delta V_0}{V_c} \quad 3.104$$

Donde  $p$  representa la presión acústica la cual fluctúa temporalmente pudiendo expresarse como:  $p(t) = A \text{sen}(2\pi ft)$ , por otro lado,  $V_c$  representa el volumen de la cámara de bombeo y  $\Delta V_0$  la variación de dicha cámara respecto a su estado inicial considerándola como positiva cuando la presión generada es superior a la atmosférica.



**Figura 124:** Disposición básica de una bomba de inyección de tinta. Diseño basado en el resonador de Helmholtz (El volumen de la cámara de bombeo cambia como consecuencia del actuador piezoeléctrico) [168].



### 2.4.1.1. Dinámica básica de un cabezal mono-nozzle de impresión DOD por piezoeléctricos (modelización con un grado de libertad)

De la imagen anterior donde  $V_c$  representa el volumen de la cámara de bombeo y donde  $L_2 \gg L_1$  siendo las secciones del canal de conexión ( $S_2$ ) similar al del orificio de salida ( $S_1$ ), podemos decir por el principio de conservación de la masa que para un fluido incompresible y de viscosidad  $\mu$ , producto de la variación del volumen de la cámara de bombeo respecto a su estado inicial produce el desplazamiento del fluido generando un flujo por ambos conductos 1 y 2 de sentido contrario, de modo que:

$$\Delta V = \Delta V_0 - \int_0^t \dot{V}_1(t) dt + \int_0^t \dot{V}_2(t) dt \quad 3. 105$$

Donde  $\Delta V$  representa la cantidad de tinta que ha salido de la cámara de bombeo durante el intervalo temporal  $t$ , siendo  $\dot{V}_1(t)$  el caudal volumétrico de tinta que sale por el orificio de salida, al igual que el  $\Delta V_0$  representa el volumen en su estado el inicial y  $\dot{V}_2(t)$  el caudal del conducto de conexión. Por otro lado, teniendo en cuenta que el caudal volumétrico se define como sección por velocidad siendo la sección constante y teniendo en cuenta que la velocidad es la derivada respecto el tiempo de la posición podemos decir que:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta V_0 - S_1 \int_0^t \dot{x}_1(t) dt + S_2 \int_0^t \dot{x}_2(t) dt \\ &= \Delta V_0 - S_1 x_1(t) + S_2 x_2(t) \end{aligned} \quad 3. 106$$

Donde  $x_i(t)$  es el desplazamiento del fluido por el conducto  $i$  ( $i = \{1,2\}$ ).

Definiendo ambas direcciones como positivas bajo el criterio anteriormente comentado, puesto que ambos desplazamientos son producto de una sobrepresión y mediante la segunda ley de Newton, estableciendo las ecuaciones de equilibrio en el nozzle y en el conducto de conexión tenemos el siguiente balance de fuerzas:

$$\begin{aligned} \rho_0 S_1 L_1 \ddot{x}_1 + 8\pi\mu L_1 \dot{x}_1 &= K_b \left( \frac{\Delta V_0 - S_1 x_1 + S_2 x_2}{V_c} \right) S_1 \\ \rho_0 S_2 L_2 \ddot{x}_2 + 8\pi\mu L_2 \dot{x}_2 &= K_b \left( \frac{\Delta V_0 - S_1 x_1 + S_2 x_2}{V_c} \right) S_2 \end{aligned} \quad 3. 107$$

Donde el primer término representa las fuerzas inerciales mientras que el segundo término a la izquierda de la igualdad representa las fuerzas de rozamiento pared-fluido generadas en el conducto ( $i$ ) debido viscosidad en un régimen laminar (Ley de Poiseuille), mientras que a la derecha de la identidad tenemos los esfuerzos generados como consecuencia de la presión acústica derivada de la acción del piezoeléctrico.

Teniendo en cuenta el diseño conceptual de la Figura 124 donde se muestra un sistema mono-nozzle basado en el resonador de Helmholtz, que debido a que la longitud del canal

de conexión es muy superior al del conducto libre u orificio de salida, y puesto que ambos poseen una sección similar, la masa a desplazar en el conducto de conexión así como la inercia de ésta y las pérdidas de carga de dicho desplazamiento son muy superiores a las del orificio de salida, afín de simplificar los cálculos se ha considerado oportuno despreciar el desplazamiento del fluido por éste (conducto 2), con lo cual la expresión anterior puede verse simplificada y rescrita como:

$$\rho_0 S_1 L_1 \ddot{x}_1 + 8\pi\mu L_1 \dot{x}_1 \cong K_b \left( \frac{\Delta V_0 - S_1 x_1}{V_c} \right) S_1 \quad 3.108$$

Es decir, reagrupando términos tenemos la siguiente ecuación diferencial de segunda orden lineal no homogénea:

$$\rho_0 S_1 L_1 \ddot{x}_1 + 8\pi\mu L_1 \dot{x}_1 + K_b \left( \frac{S_1^2}{V_c} \right) x_1 = K_b \left( \frac{\Delta V_0}{V_c} \right) S_1 \quad 3.109$$

Donde mediante una agrupación de variables digamos:  $M = \rho_0 S_1 L_1$ ,  $K = 8\pi\mu L_1$ ,  $C = K_b (S_1^2 / V_c)$  y  $F_0 = K_b (\Delta V_0 / V_c) S_1$ , podemos decir que la ecuación que describe el movimiento del fluido en el orificio de salida haciendo un símil a un sistema mecánico oscilante amortiguado puede expresarse como:

$$M \ddot{x}_1 + K \dot{x}_1 + C x_1 = F_0 \quad 3.110$$

Donde la solución de la parte homogénea tiene forma de  $x_1(t) = B e^{\lambda t}$ , es decir:

$$M \lambda^2 e^{\lambda t} + K \lambda e^{\lambda t} + C e^{\lambda t} = 0 \quad 3.111$$

Reagrupando las variables involucradas en la expresión anterior como:  $\xi = K / 2\sqrt{MC}$  donde  $\xi$  representa el ratio de amortiguamiento y  $\omega_n$  la cual define la frecuencia natural del sistema expresable como:  $\omega_n = \sqrt{C/M}$ , tenemos que  $\lambda$  se define como:

$$\lambda_{1,2} = \left( -\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \omega_n \quad 3.112$$

Donde debemos distinguir tres casos dependiendo del valor del ratio de amortiguamiento, es decir:

- a)  $\xi > 1$ : Sistema sobre-amortiguado o aperiódico.
- b)  $\xi = 1$ : Sistema críticamente amortiguado.
- c)  $\xi < 1$ : Sistema sub-amortiguado o de movimiento periódico.

En sistemas sobre-amortiguados como es nuestro caso, cuando nos encontramos ante fluidos de elevada viscosidad el desplazamiento del mismo a consecuencia de las ondas de presión se atenúan rápidamente comportándose de forma aperiódica, mientras en aquellos casos donde la viscosidad del fluido es baja y por tanto la atenuación de la amplitud de las ondas es más leve el fluido requiere de varios ciclos hasta alcanzar el estado de equilibrio. De forma que la oscilación del fluido en el orificio de salida como solución de la parte homogénea se expresa de la siguiente forma:

$$x_1(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[ B_1 \text{sen}(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) + B_2 \text{cos}(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) \right] \quad 3.113$$

Nótese que debido al amortiguamiento fruto de la viscosidad, la frecuencia de resonancia del sistema ha sido disminuida respecto a la frecuencia natural del sistema en un factor de  $\sqrt{1-\xi^2}$ . Por otro lado, sea  $x_p$  una solución particular de la ecuación diferencial anterior, de forma que la solución global pueda ser expresada como la suma entre la solución homogénea y la particular  $x_1(t) = x_h(t) + x_p(t)$  tenemos que ésta puede expresarse como:

$$x_p = At^2 + Bt + D \quad 3.114$$

Siendo  $\dot{x}_p = 2At + B$  y  $\ddot{x}_p = 2A$  la solución particular toma forma de:

$$x_p = \frac{F_0}{C} \quad 3.115$$

Que bajo las variables iniciales ésta se puede reescribirse como:  $x_p = \Delta V_0 / S_1$ , por lo que la solución global toma forma de:

$$x_1(t) = \left[ e^{-\xi\omega_n t} \left[ B_1 \text{sen}(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) + B_2 \text{cos}(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) \right] \right] + \left( \frac{\Delta V_0}{S_1} \right) \quad 3.116$$

Por otro lado, teniendo en cuenta las condiciones iniciales del sistema donde para  $t = 0 \rightarrow x_1(t) = 0$  y  $\dot{x}_1(t) = 0$ , tenemos que los coeficientes  $B_2$  y  $B_1$  se definen como:

$$B_2 = -\frac{\Delta V_0}{S_1} ; B_1 = \frac{-\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \frac{\Delta V_0}{S_1} \quad 3.117$$

De forma que en términos de desplazamiento y velocidad la solución total o global de la ecuación 3.110 se expresa como:

$$x_1(t) = \frac{\Delta V_0}{S_1} \left[ 1 - e^{-\xi\omega_n t} \left[ \frac{-\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen}(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) + \text{cos}(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) \right] \right] \quad 3.118$$

$$\dot{x}_1(t) = \frac{\Delta V_0}{S_1} \left[ \omega_n e^{-\xi\omega_n t} \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen}(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) \right] \quad 3.119$$

Nótese que la ecuación diferencial 3.110 el término que hace referencia a la excitación del sistema ( $F_0$ ) no es dependiente del tiempo, luego representa a un escalón o lo que es lo mismo una señal de entrada de magnitud constante en el tiempo, en consecuencia dicha señal produce una deformación sostenida del piezoeléctrico. Con el objetivo de analizar la respuesta del sistema a una señal del tipo pulso, es decir, la deformación del piezoeléctrico ya no es constante en el tiempo sino dentro de un periodo de dicho dominio temporal, se ha de plantear la modelización en dos etapas concatenadas. En el caso de que el pulso tenga inicio en  $t = 0$  siendo en este punto donde se alcanza la mayor deformación del piezoeléctrico y posteriormente dicha deformación se mantiene durante periodo temporal correspondiente a  $0 < t \leq t_p$  le llamaremos primer tramo y posteriormente el segundo tramo

corresponde a  $t > t_p$  donde se produce la extinción de dicha señal a  $t_p$  y por tanto el piezoeléctrico vuelve a su estado inicial no excitado. En términos de posición y velocidad la respuesta del sistema un pulso puede definirse como:

$$x_1(t) = \frac{\Delta V_0}{S_1} \left[ 1 - e^{-\xi \omega_n t} \left[ \frac{-\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \operatorname{sen}(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) + \cos(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) \right] \right] - \frac{\Delta V_0}{S_1} \left[ 1 - e^{-\xi \omega_n (t-t_p)} \left[ \frac{-\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \operatorname{sen}(\omega_n (t-t_p) \sqrt{1-\xi^2}) + \cos(\omega_n (t-t_p) \sqrt{1-\xi^2}) \right] \right] \quad 3.120$$

$$\dot{x}_1(t) = \frac{\Delta V_0}{S_1} \left[ \omega_n e^{-\xi \omega_n t} \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \operatorname{sen}(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) \right] - \frac{\Delta V_0}{S_1} \left[ \omega_n e^{-\xi \omega_n (t-t_p)} \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \operatorname{sen}(\omega_n (t-t_p) \sqrt{1-\xi^2}) \right] \quad 3.121$$

De modo que desde el punto de vista del piezoeléctrico, cuando éste recibe una señal de excitación en este caso un pulso, éste se deforma manteniendo su estado de deformación durante un tiempo  $t_p$  (la anchura del pulso) y posteriormente al extinguirse la señal externa vuelve a su estado inicial. Desde el punto de vista del fluido, la forma en la que el piezoeléctrico se deforme condiciona el sentido del mismo, es decir, partiendo de la base de que la señal exterior de excitación es una señal eléctrica y siendo ésta siempre de voltaje  $V > 0$ , si la deformación del piezoeléctrico a dicha señal produce una reducción del volumen de la cámara de bombeo y en consecuencia el fluido se desplaza al exterior de dicha cámara diremos que la respuesta del sistema es positiva y en el caso contrario diremos que es negativa. Por lo tanto, desde el punto de vista del fluido a partir de este momento hablaremos de pulsos positivos y negativos. Positivos si el fluido sale del sistema y negativos cuando el fluido es absorbido por la cámara de bombeo y entra en el sistema, para posteriormente en la segunda etapa (extinción de la señal) ser desplazado hacia afuera.

Para una respuesta positiva del sistema o un pulso positivo, la magnitud de la señal sostenida define la magnitud la deformación del piezoeléctrico y por tanto la reducción del volumen de la cámara de bombeo y en consecuencia la cantidad de fluido desplazado, mientras que la duración del pulso ( $t_p$ ) determinará en nuestro caso la velocidad del fluido. Es decir, teniendo en cuenta que el piezoeléctrico encuentra inicialmente la máxima resistencia al desplazamiento al inicio de su deformación, y en consecuencia la presión en el interior de la cámara de bombeo es máxima, a medida que el fluido comienza a desplazarse la presión disminuye y el fluido en el interior del conducto de salida se ve acelerado aumentando su inercia hasta alcanzar una velocidad máxima, punto donde la señal se extingue dando paso a una nueva deformación del piezoeléctrico hasta alcanzar su estado inicial y en consecuencia desacelerando el fluido hasta cambiar el sentido del mismo aspirándolo al interior de la cámara de bombeo.

Velocidades excesivas de retroceso pueden dar origen a que la presión en el interior de la cámara de bombeo sea inferior a la presión de saturación del fluido o tinta a la temperatura de trabajo, pudiendo producir cavitación [219], [220]. Por otro lado, elevados desplazamientos del fluido en la segunda etapa (succión) puede acarrear la introducción a

través del nozzle de burbujas en el interior de la cámara de bombeo que debido a la compresibilidad del aire, destruye inmediatamente la acción de los piezoeléctricos en el cabezal de impresión arruinando el proceso de eyección de los fluidos o las tintas.

Así pues, teniendo en cuenta que la longitud temporal del pulso ( $t_p$ ) se lleva a cabo hasta que el fluido alcanza una velocidad máxima concreta, en sistemas donde  $\xi < 1$  es decir, sub-amortiguados éste puede definirse como:

$$\frac{d}{dt}(\dot{x}_1(t)) = 0 \rightarrow t_p = \frac{1}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \arctan\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right) \quad 3.122$$

Donde para un sistema muy sub-amortiguado de movimiento periódico es decir, para  $\xi \ll 1$ , la duración del impulso puede definirse como:

$$t_p \approx \frac{\pi}{2\omega_n} \quad 3.123$$

En el caso de un sistema sobre-amortiguado o aperiódico y por tanto donde  $\xi > 1$ , para un pulso positivo y aplicando el mismo argumento anterior, partiendo de la solución global de la ecuación diferencial anterior que describe el movimiento del fluido y expresada en forma exponencial (ecuaciones 3.125) la duración del impulso en este caso se puede describir como:

$$x_1(t) = \frac{\Delta V_0}{S_1} \left(1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\lambda_2 t}\right) \quad 3.124$$

$$\dot{x}_1(t) = \frac{\Delta V_0}{S_1} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t})$$

$$t_p = \frac{\text{Ln}(\lambda_1/\lambda_2)}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad 3.125$$

Por otro lado, para respuestas del sistema negativos se utiliza el concepto de interferencia constructiva donde como ya se ha comentado el fluido primero se succiona para luego ser eyectado, pero en la primera etapa de succión el aumento del volumen en el interior de la cámara de bombeo es llenado con fluido existente en el conducto de salida, de forma que el pulso se extingue cuando el desplazamiento del fluido alcanza su mínimo, o lo que es lo mismo cuando la velocidad del fluido es cero. A partir de este punto el fluido acelerará hasta que al salir por el nozzle y por la inercia generada del chorro libre se desprenderá un volumen discreto de tinta formando una gota aguas abajo del orificio de salida. Éste funcionamiento del sistema (respuestas negativas) tiene lugar cuando el amortiguamiento del sistema es pequeño, es decir  $\xi < 0,5$  definiéndose como:

$$\frac{d}{dt}(x_1(t)) = 0 \rightarrow t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad 3.126$$

En cuanto a la presión de succión, se ha establecido que no ha de ser inferior a 1 bar, definiendo éste como el límite para que no aparezca la cavitación en el interior del nozzle, es decir mediante la ecuación de Bernoulli podemos decir que:

$$P_2 \geq P_1 + \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) + \rho g(Z_1 - Z_2 - H_{roz1 \rightarrow 2}) \quad 3.127$$

Donde en este caso  $P_2$  representa la presión de succión, siendo 1 el orificio de salida y 2 el interior de la cámara de bombeo.

Dejando al margen este inciso, una vez establecido la presión límite de succión, la respuesta de un sistema basado en el resonador de Helmholtz como se ha podido apreciar anteriormente en la Figura 124 para unas dimensiones constructivas particulares y un fluido de cuya viscosidad determina al sistema como sub-amortiguado y para un pulso de duración  $t_p$  donde la presión de la presión generada por la onda se define mediante la expresión 3.128, la respuesta del sistema puede apreciarse en las gráficas de a continuación (de la Figura 126 a la Figura 128):

$$p = K_b \left[ \frac{\Delta V_0 - S_1 x_1}{V_c} \right] \quad 3.128$$

#### Datos del sistema ideal basado en el resonador de Helmholtz:

Dimensiones constructivas:	Tramo 1 (Conducto de salida):	Fluido:	Excitación:
$kb = 1,96 \cdot 10^9 \text{ Pa}$	$R_1 = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$\rho_0 = 1.000 \text{ kg/m}^3$	$t_p = 4,82 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
$V_c = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3$	$S_1 = 7,07 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$	$\mu = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	
$L_c = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$L_1 = 75 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$C_c = 1.400 \text{ m/s}$	
$S_c = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$			
$\Delta V_0 = 9 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3$			

Figura 125: Datos del sistema mono-nozzle [168].

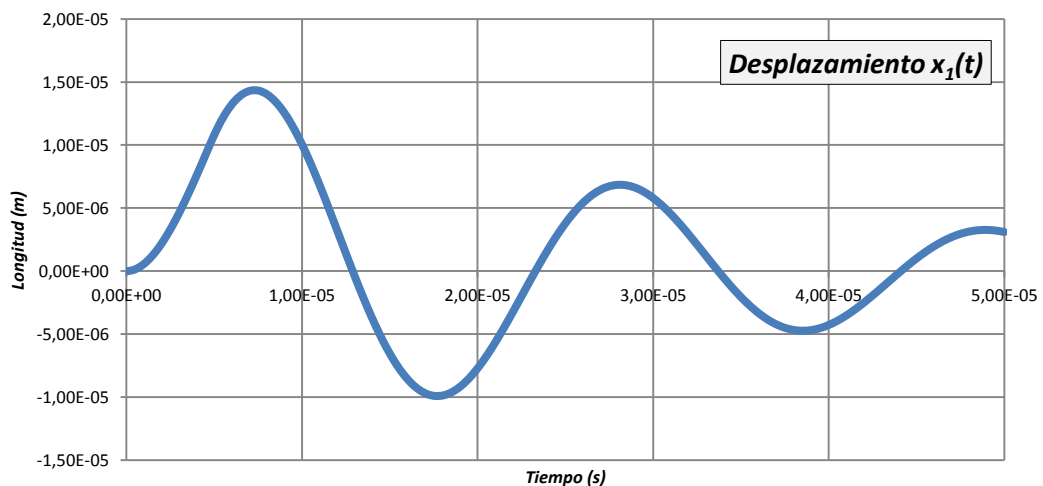
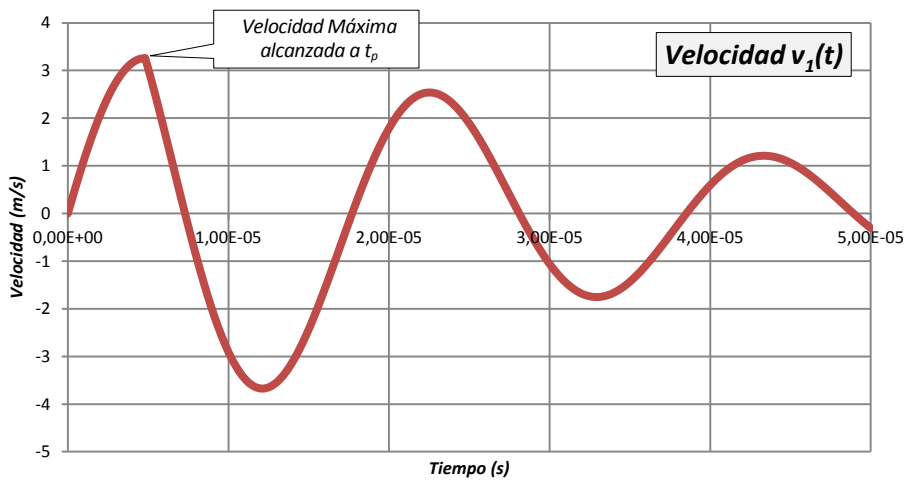
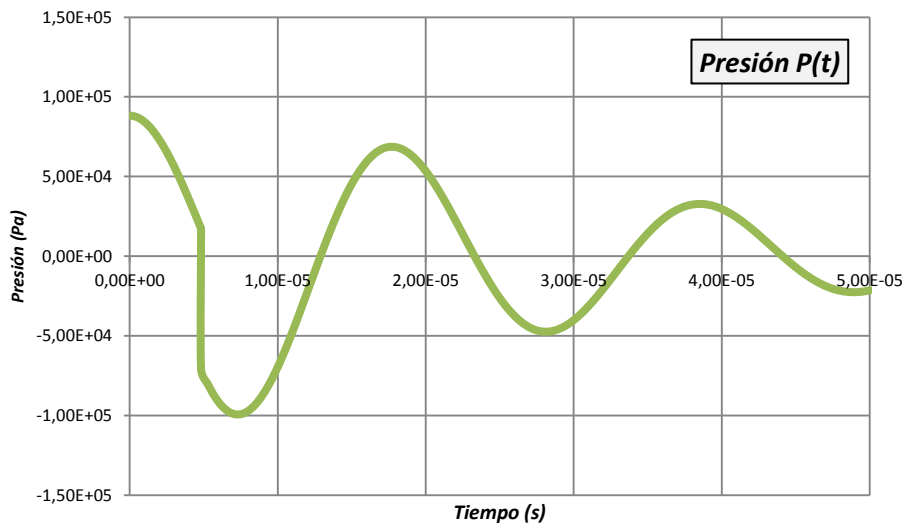


Figura 126: Evolución de la posición del fluido en el interior del conducto de salida respecto al centro de la cámara de bombeo para un sistema de respuesta positiva y excitado mediante un pulso de duración  $t_p$  [Fuente: Elaboración propia].



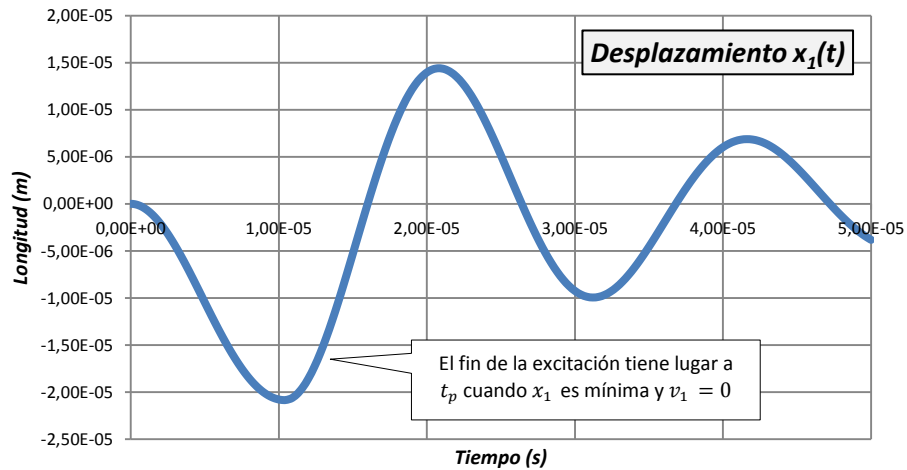
**Figura 127:** Evolución de la velocidad del fluido en el interior del conducto de salida respecto al centro de la cámara de bombeo para un sistema de respuesta positiva y excitado mediante un pulso de duración  $t_p$  [Fuente: Elaboración propia].



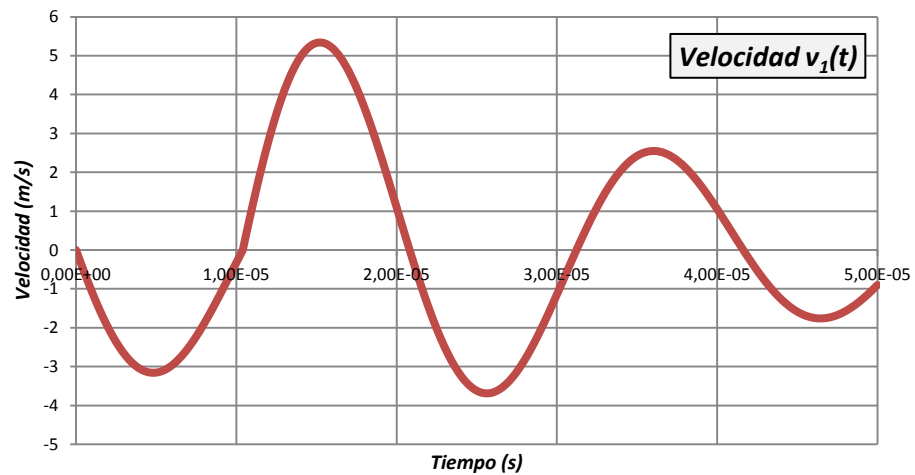
**Figura 128:** Evolución temporal de la presión en el interior la cámara de bombeo para un sistema de respuesta positiva y excitado mediante un pulso de duración  $t_p$  [Fuente: Elaboración propia].

De igual modo, considerando el mismo sistema anterior con las mismas dimensiones constructivas pero ahora de respuesta negativa, siendo excitado con la misma magnitud pero con una duración ahora superior de  $t_p = 10,4 \mu s$ , cagado con la misma tinta y con un incremento inicial en la cámara de bombeo de  $\Delta V_0 = -8,72 \cdot 10^{-15} m^3$ , el comportamiento

del mismo puede verse apreciarse en las gráficas de a continuación (de la Figura 129 a la Figura 131):

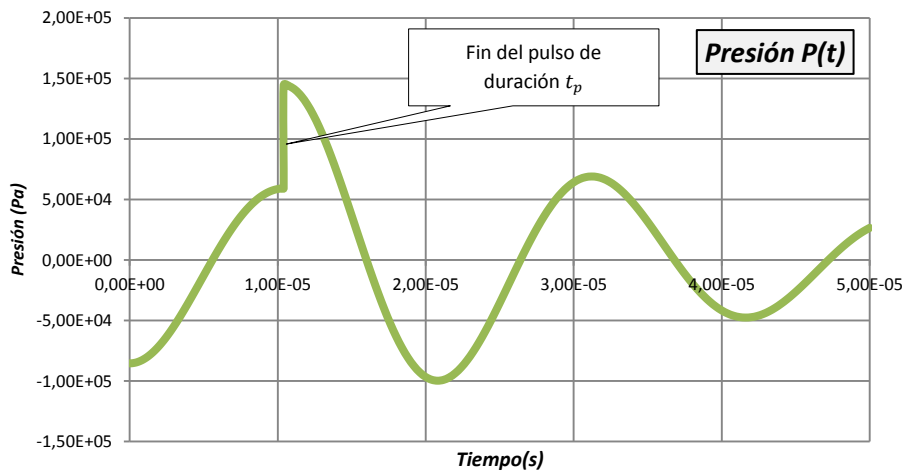


**Figura 129:** Evolución de la posición del fluido en el interior del conducto de salida respecto al centro de la cámara de bombeo para un sistema de respuesta negativa y excitado mediante un pulso de duración  $t_p$  [Fuente: Elaboración propia].



**Figura 130:** Evolución de la velocidad del fluido en el interior del conducto de salida respecto al centro de la cámara de bombeo para un sistema de respuesta negativa y excitado mediante un pulso de duración  $t_p$  [Fuente: Elaboración propia].

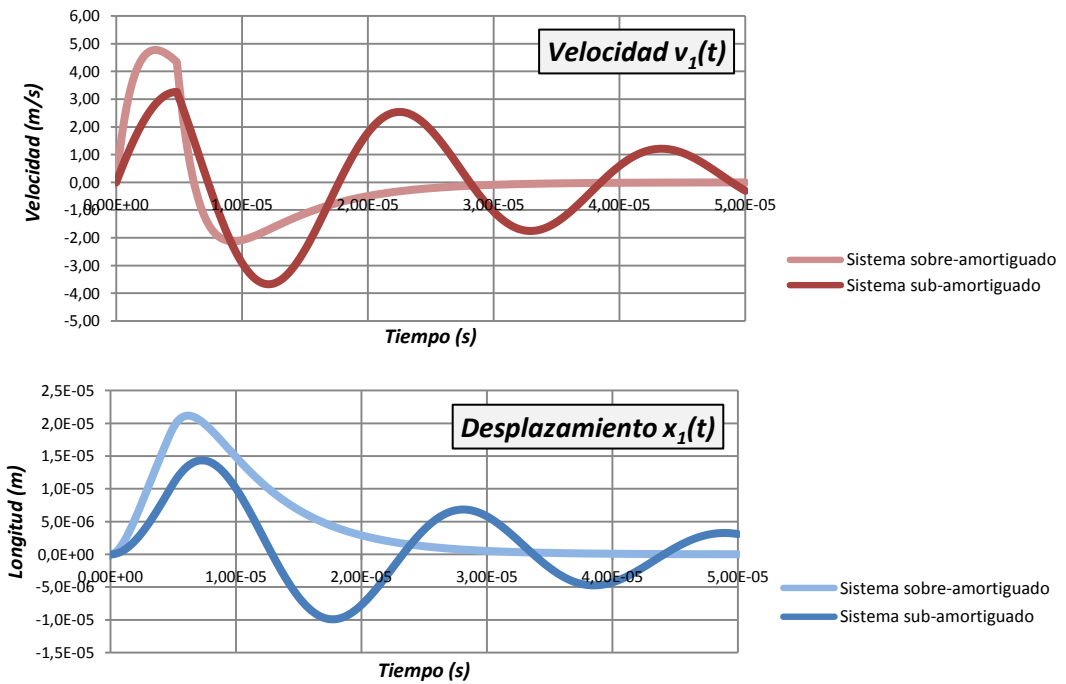




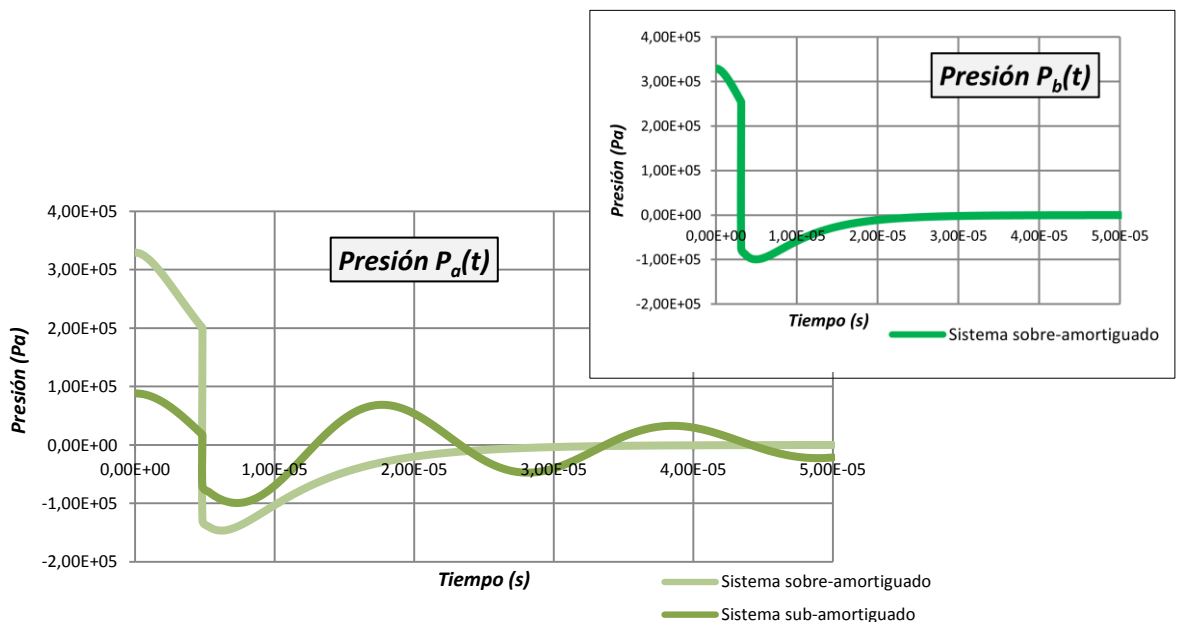
**Figura 131:** Evolución temporal de la presión en el interior la cámara de bombeo para un sistema de respuesta negativa y excitado mediante un pulso de duración  $t_p$   
[Fuente: Elaboración propia].

Nótese de las imágenes anteriores que, en un sistema de respuesta positiva la presión cae drásticamente tras la anulación del impulso exterior lo cual ocurre cuando la velocidad del flujo es máxima. En cambio, cuando la respuesta del sistema es negativa, se aprecia un incremento en la presión debido al fin del impulso, que al recuperar su posición inicial el esfuerzo requerido para desplazar la masa de fluido existente es ahora mayor por la succión y por tanto, se produce un aumento drástico de la presión, cosa que ocurre cuando el desplazamiento a alcanzado el mínimo, que a su vez coincide con el punto donde la velocidad es cero. Por otro lado, también es importante resaltar que la presión de succión, generada en el interior de la cámara de bombeo cuando el fluido retrocede en ningún caso supera la presión límite establecida anteriormente afín de evitar la cavitación. Por último, el desplazamiento negativo del fluido en ambos casos ha de ser inferior al conducto de salida para evitar la incorporación de burbujas al interior de la cámara.

En el caso de encontrarnos ante un sistema sobre-amortiguado ( $\xi > 1$ ) en donde fruto de una viscosidad mayor el sistema atenúa las ondas de presión en un lapso temporal más corto. Haciendo uso del sistema anterior y centrándonos en el caso de respuesta positiva a continuación se compara la respuesta del sistema bajo la misma excitación pero ahora cuando la viscosidad del fluido a eyectar (tinta) posee una viscosidad diez veces superior ( $\mu=20$  mPa·s).



**Figura 132:** Comparativa entre el comportamiento de un mismo sistema excitado de la misma forma, pero cargado de un fluido con distinta reología (Posición y velocidad respectivamente de un sistema sobre-amortiguado y sub-amortiguado) [Fuente: Elaboración propia].



**Figura 133:** Evolución temporal de la presión en el interior de la cámara de bombeo para un sistema de respuesta positiva cargado con tintas de diferente reología a), Presión en el mismo sistema sobre-amortiguado pero con una excitación de menor duración y un menor

volumen inicial de la cámara de bombeo afín de evitar la cavitación b)

[Fuente: Elaboración propia].

Hasta ahora se ha considerado que el sistema responde inmediatamente al pulso eléctrico (señal de entrada), cosa que en realidad no ocurre debido a las características dinámicas de la cámara de bombeo y del sistema, por ejemplo; su geometría y la rigidez de la estructura, así como también el retardo producto de la circuitería electrónica en la cual debido a la capacitancia del piezoeléctrico éste retarda su respuesta.

Así pues, con el objetivo de tener en cuenta el retardo (tanto la aplicación del pulso como su desactivación requiere tiempo lo que se traduce en una deformación del piezoeléctrico más lenta y en consecuencia una modificación del volumen de la cámara de bombeo progresiva) es necesario considerar ésta modificación mediante la siguiente función:

$$\Delta V = \Delta V_0 \frac{t}{t_{p1}} - \int_0^t \dot{V}(t) dt = \Delta V_0 \frac{t}{t_{p1}} - S_1 \int_0^t \dot{x}_1(t) dt \quad 3. 129$$

Donde la ecuación anterior equivale a la expresión 3. 105 en la cual se ha despreciado el desplazamiento del fluido por el conducto de conexión y donde ahora la modificación del volumen en el interior de la cámara de bombeo es función del tiempo alcanzando la variación máxima acorde a la magnitud de la señal excitación a  $t = t_{p1}$ , en este caso se ha enumerado este tiempo como 1 haciendo alusión al primero de muchos. De modo que, siguiendo el mismo procedimiento anterior, tenemos ahora una ecuación que gobierna la dinámica del sistema la cual ha de tener en cuenta la excitación como una función rampa en vez de un escalón. Ésta se expresa de la siguiente forma:

$$M\ddot{x}_1 + K\dot{x}_1 + Cx_1 = F_0 \frac{t}{t_{p1}} \quad 3. 130$$

Con la misma solución homogénea del caso anterior y con una solución particular definida como:

$$x_p(t, t_{p1}) = \frac{F_0}{C t_{p1}} \left( t - \frac{k}{C} \right) \quad 3. 131$$

Siendo la solución total de la ecuación diferencial anterior  $x_1(t, t_{p1}) = x_h(t, t_{p1}) + x_p(t, t_{p1})$  ésta toma la siguiente forma:

$$x_1(t, t_{p1}) = \left[ e^{-\xi\omega_n t} \left[ B_1 \text{sen}(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) + B_2 \text{cos}(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}) \right] \right] + \left( \frac{F_0}{C t_{p1}} \left( t - \frac{k}{C} \right) \right) \quad 3. 132$$

Que teniendo en cuenta las condiciones iniciales  $x_1(0, t_{p1}) = 0$  y  $\dot{x}_1(0, t_{p1}) = 0$ , tenemos que los coeficientes  $B_2$  y  $B_1$  se definen como:

$$B_2 = \frac{F_0 K}{C^2 t_{p1}} ; B_1 = \frac{-F_0}{C t_{p1}} \frac{1-2\xi^2}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad 3. 133$$

De forma que, el desplazamiento y la velocidad del fluido como respuesta del sistema a una excitación del tipo rampa debido al retardo en la deformación del piezoelectrico, de duración  $t_{p1}$  y comportándose el sistema como sub-amortiguado se define como:

$$x_1(t, t_{p1}) = \frac{\Delta V_0}{S_1 t_{p1} \omega_n} \left[ -2\xi + \omega_n t + e^{-\xi \omega_n t} \left[ -\frac{(1 - 2\xi^2)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \operatorname{sen}(\omega_n t \sqrt{1 - \xi^2}) + 2\xi \cos(\omega_n t \sqrt{1 - \xi^2}) \right] \right] \quad 3.134$$

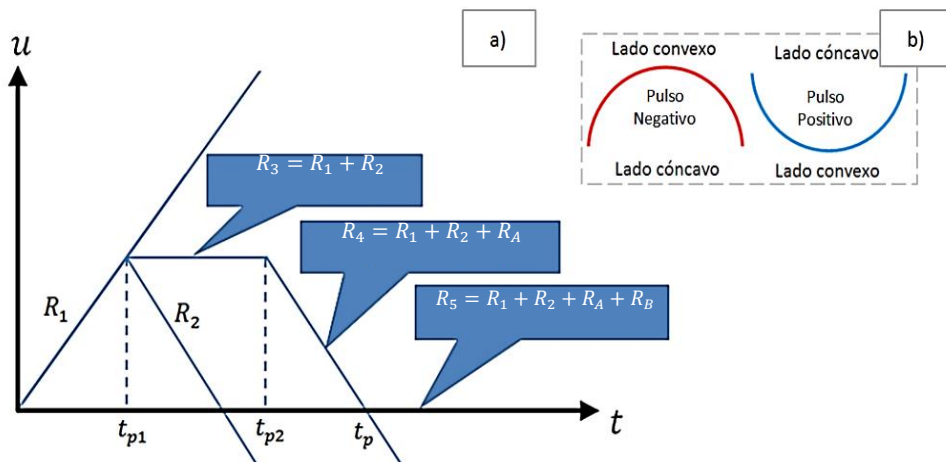
$$\dot{x}_1(t, t_{p1}) = \frac{\Delta V_0}{S_1 t_{p1}} \left[ 1 - e^{-\xi \omega_n t} \left[ \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \operatorname{sen}(\omega_n t \sqrt{1 - \xi^2}) + \cos(\omega_n t \sqrt{1 - \xi^2}) \right] \right] \quad 3.135$$

En el caso de un sistema sobre-amortiguado, expresando de forma exponencial las ecuaciones anteriores encontramos que:

$$x_1(t, t_{p1}) = \frac{\Delta V_0}{S_1 t_{p1} \omega_n} \left[ \omega_n t - 2\xi + \frac{\omega_n}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[ \left(1 + 2\frac{\lambda_2 \xi}{\omega_n}\right) e^{\lambda_1 t} - \left(1 + 2\frac{\lambda_1 \xi}{\omega_n}\right) e^{\lambda_2 t} \right] \right] \quad 3.136$$

$$\dot{x}_1(t, t_{p1}) = \frac{\Delta V_0}{S_1 t_{p1}} \left[ 1 + \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[ \left(1 + 2\frac{\lambda_2 \xi}{\omega_n}\right) \lambda_1 e^{\lambda_1 t} - \left(1 + 2\frac{\lambda_1 \xi}{\omega_n}\right) \lambda_2 e^{\lambda_2 t} \right] \right] \quad 3.137$$

Mediante el uso de las ecuaciones anteriores es posible ahora construir la respuesta dinámica del sistema dentro de un dominio temporal consecuencia de una excitación externa constituida por una suma de funciones rampas tal y como se muestra en la figura a continuación:



**Figura 134:** Representación de la deformación del piezoelectrico y en consecuencia de la excitación del sistema, constituida a partir de la adición de diferentes funciones rampa donde  $R_1$  y  $R_2$  tienen como base  $t_{p1}$  mientras que  $R_3$  tiene  $t_{p2} - t_{p1}$  y  $R_4$  posee  $t_p - t_{p2}$  como base, de forma que las rampas de subida y bajada difieren en duración a). Representación del sentido de la respuesta del sistema en función de la deformación del piezoelectrico b)

[Fuente: Elaboración propia].

Anteriormente se ha mostrado la respuesta del sistema a un pulso de entrada, ahora analizamos la respuesta del sistema a la excitación mostrada en la Figura 134, la cual está formada por múltiples funciones rampa donde la deformación del piezoelectrico es

proporcional a la magnitud de esta señal y si éste produce un pulso positivo (suponiendo que inicialmente el piezoeléctrico se encuentra sin deformación y al deformarse, su lado convexo reduce el volumen del interior de la cámara de bombeo) la respuesta del sistema se construye a partir de las adición de las diferentes soluciones discretas cuyos intervalos temporales son mostrados esquemáticamente a continuación:

$$\text{Tramo 1:} \quad 0 < t < t_{p1} : x_1 = x_1(t, t_{p1}) \quad , \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_1(t, t_{p1}) \quad 3. 138$$

La expresión anterior define el desplazamiento y la velocidad del fluido como consecuencia de la rampa  $R_1$  cuya longitud temporal es  $t_{p1}$ .

$$\begin{aligned} \text{Tramo 2:} \quad t_{p1} < t < t_{p2} : x_1 &= x_1(t, t_{p1}) - x_1(t-t_{p1}, t_{p1}) \\ \dot{x}_1 &= \dot{x}_1(t, t_{p1}) - \dot{x}_1(t-t_{p1}, t_{p1}) \end{aligned} \quad 3. 139$$

En este nuevo intervalo temporal puesto que la magnitud señal de entrada se mantiene constante, el piezoeléctrico mantiene su estado de deformación (nótese que la señal eléctrica es siempre positiva luego la deformación del piezoeléctrico es siempre en el mismo sentido, si genera un pulso positivo éste se ha de encontrar deformado convexamente (ver Figura 134b). En cuanto a la ecuación 3. 139 vemos que para  $t > t_{p1}$  con el fin de compensar la deformación creciente introducida por la rampa  $R_1$  ésta se recurre a la su equivalente la rampa  $R_2$  cuyo dominio se encuentra en  $(t - t_{p1}) \leq t_{p2}$  de modo que,  $t_{p2}$  puede ser tan largo como se requiera afín de atenuar la oscilaciones generadas por la rampa  $R_1$ .

$$\begin{aligned} \text{Tramo 3:} \quad t_{p2} < t < t_p : x_1 &= x_1(t, t_{p1}) - x_1(t-t_{p1}, t_{p1}) - x_1(t-t_{p2}, t_p - t_{p2}), \\ \dot{x}_1 &= \dot{x}_1(t, t_{p1}) - \dot{x}_1(t-t_{p1}, t_{p1}) - \dot{x}_1(t-t_{p2}, t_p - t_{p2}) \end{aligned} \quad 3. 140$$

En este tercer intervalo con el cual finaliza el nuevo pulso de entrada a  $t_p$ , la aportación de la rampa  $R_4$  se tiene en cuenta bajo la misma metodología anterior, es decir, en la ecuación anterior podemos apreciar que ahora tanto el desplazamiento como la velocidad del fluido dependen de  $t$  donde  $t > t_{p2}$  luego la función rampa existe en el dominio  $(t - t_{p2}) \leq t_p$  siendo una rampa decreciente cuya duración difiere de las creciente y por tanto se utilizado un subíndice alfabético afín de diferenciar ésta ( $R_A$ ), su consecuencia reflejada en el volumen de la cámara de bombeo, alcanzará su estado inicial cuando  $t = t_p$ .

$$\begin{aligned} \text{Tramo 4:} \quad t > t_p : x_1 &= x_1(t, t_{p1}) - x_1(t-t_{p1}, t_{p1}) - x_1(t-t_{p2}, t_p - t_{p2}) \\ &\quad + x_1(t-t_p, t_p - t_{p2}), \\ \dot{x}_1 &= \dot{x}_1(t, t_{p1}) - \dot{x}_1(t-t_{p1}, t_{p1}) - \dot{x}_1(t-t_{p2}, t_p - t_{p2}) \\ &\quad + \dot{x}_1(t-t_p, t_p - t_{p2}) \end{aligned} \quad 3. 141$$

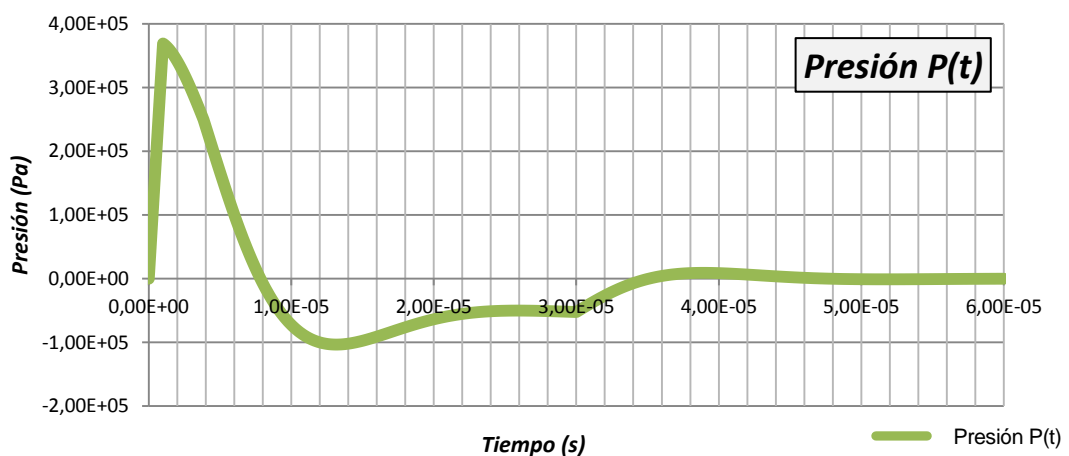
Finalmente con el fin de anular la aportación de la rampa decreciente  $R_1$  en la señal en  $R_4$ , en el caso de que  $t > t_p$  es necesario compensar está haciendo uso de la rampa creciente  $R_2$  equivalente, cuyo dominio ahora de la señal  $R_5$  es  $t - t_p$ . Mediante este esquema de adicción de rampas nos permite establecer duraciones diferentes entre las rampas crecientes y decrecientes, así como también los periodos de mantenimiento los cuales dependen de la reología de la tinta, mientras que las pendientes vienen determinadas por las características dinámicas del sistema las cuales involucra la geometría y rigidez de estructura y el retardo inducido por la circuitería electrónica y la capacitancia de los piezoeléctricos.

Por otro lado, mediante esta metodología podemos construir la respuesta dinámica del sistema mediante la utilización de pulsos con formas adaptadas, en la imagen de a continuación basándonos en la ecuación 3. 128 se ha graficado la evolución temporal de la presión en el interior de la cámara de bombeo como respuesta ofrecida por el sistema a la señal eléctrica de la Figura 134, teniendo en cuenta que el fluido es viscoso y por tanto nos encontramos ante un sistema amortiguado, donde el sistema de impresión posee unas dimensiones constructivas particulares iguales al caso anterior y basado en el resonador de Helmholtz.

#### Datos del sistema ideal basado en el resonador de Helmholtz:

<i>Dimensiones constructivas:</i>	<i>Tramo 1 (Conducto de salida):</i>	<i>Fluido:</i>	<i>Excitación:</i>
$kb = 1,96 \cdot 10^9 \text{ Pa}$	$R_1 = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$\rho_0 = 1.000 \text{ kg/m}^3$	$t_{p1} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
$V_c = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3$	$S_1 = 7,07 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$	$\mu = 10 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$t_{p2} = 3,84 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
$L_c = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$L_1 = 75 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$C_c = 1.400 \text{ m/s}$	$t_p = 30 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
$S_c = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$			
$\Delta V_0 = 3,82 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3$			

**Figura 135:** Datos del sistema mono-nozzle con excitación trapezoidal [168].



**Figura 136:** Presión en la cámara de bombeo, consecuencia de la excitación mostrada en la Figura 134, en un sistema cuya deformación del piezoeléctrico generó un pulso positivo

*cuya amplitud fue determinada afín de no generar succiones que induzcan a cavitación ni retrocesos que puedan introducir burbujas de aire al interior de la cámara de bombeo*

[Fuente: Elaboración propia].

Así pues, en éste apartado se ha abordado los conceptos básicos asociados al funcionamiento de un cabezal de impresión fundamentado en el resonador de Helmholtz nono-nozzle, basándonos en la interpretación de la fenomenología asociada al dinamismo del fluido gracias a la acústica repasando términos como la frecuencia natural del sistema, frecuencia amortiguada, ratio de amortiguación y según sea éste la clasificación de su comportamiento (sub-amortiguado, crítico o sobre-amortiguado), la dinámica de la oscilación y en función del sentido respuesta; positiva o negativa. Así como también en función del retardo de la respuesta de los piezoeléctricos a una señal eléctrica de entrada, se ha analizado la respuesta del sistema en términos de desplazamiento, velocidad del fluido a través del nozzle y presión en el interior de la cámara de bombeo, consecuencia de una suma de excitaciones del tipo rampa donde la longitud temporal de estas y la forma condiciona dicho funcionamiento de sistema.

De modo que, mediante esta modelización es posible resumir el diseño de un sistema básico de impresión DOD por piezoeléctricos bajo las siguientes premisas:

- a. Con el objetivo de evitar la cavitación del fluido, la presión de succión no ha de superar un límite impuesto en función de las condiciones del proceso y el material a dosificar. Ésta condición determina el máximo volumen a desplazar por el piezoeléctrico y su velocidad.
- b. Bajo la premisa de que la señal de entrada no posee polaridad (siempre positiva), la deformación del piezoeléctrico respecto a su estado inicial determina el sentido del desplazamiento del fluido, siendo positivo cuando genera una sobre presión y por tanto el fluido se desplaza hacia afuera de la cámara de bombeo.
- c. En una respuesta positiva la duración de la excitación se determina de forma que el desplazamiento del fluido (en retroceso) nunca supera la longitud del conducto de salida afín de evitar la introducción de burbujas de aire al interior de la cámara de bombeo, situación que deben tener lugar cuando la velocidad del fluido sea máxima.
- d. Solo cuando el amortiguamiento es pequeño es posible la utilización de pulsos negativos, cuya longitud temporal de éste se determina bajo el concepto de interferencia constructiva, es decir, cuando el desplazamiento del fluido sea mínimo y por tanto es este punto donde se produce la anulación su velocidad.
- e. La velocidad de retroceso del fluido ha de ser siempre inferior al de avance tanto para pulsos positivos como negativos, es por ello que la longitud temporal de las rampas crecientes y decrecientes difieren siendo en consecuencias estas últimas mayores afín conseguir elevadas velocidades, pero evitando la cavitación.

### **2.4.1.2. Consideraciones asociadas a la eyección de volúmenes discretos de fluido como consecuencia de la dinámica del cabezal mono-nozzle de impresión DOD por piezoeléctricos**

El apartado anterior se ha basado en el funcionamiento y la fenomenología asociada a la dinámica del fluido en el interior del sistema de impresión DOD por piezoeléctricos, ahora en este apartado se vinculará ésta dinámica como respuesta a la señal eléctrica introducida al sistema con el proceso de formación y ruptura de los volúmenes discretos de fluido eyectados al exterior del nozzle en régimen de eyección, es decir, debido a que el flujo presenta números de Weber superiores a 1 y como se ha podido ver en apartados anteriores éste delimita e inicio al régimen proporcional o de Rayleigh, es por ello que se define a estos sistemas de impresión como: "Sistemas de impresión por chorros de tinta" indistintamente del proceso de generación, la palabra chorro describe al régimen de funcionamiento. Finalmente se abordará el llenado de la cámara de bombeo afín de poder repetir el proceso de eyección cuantas veces se requiera.

#### **Formación de las gotas (Respuesta positiva)**

Como se ha podido apreciar en el apartado anterior, una vez comienza la modificación del volumen de la cámara de bombeo y en consecuencia aumenta la presión fruto de la resistencia del fluido a desplazarse, cuando esta presión supere a las pérdidas por rozamiento, la tensión superficial del fluido en el orificio de salida y la presión atmosférica, el fluido iniciará su aceleración y en consecuencia comenzará a escurrirse o a fluir fuera del nozzle (sistema de respuesta positiva).

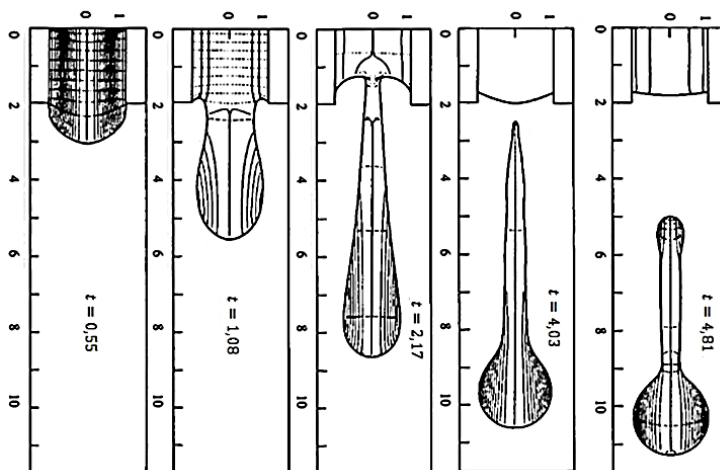
En este proceso la energía cinética del fluido se transporta hacia el exterior en donde la tensión superficial, la viscosidad y la gravedad determinaran junto con la fricción del fluido ahora libre con el aire, la formación y tipología de las gotas. En cambio el volumen y la velocidad del fluido eyectado se produce en función de la amplitud, duración y forma del pulso dependientes de la respuesta del sistema y la reología del fluido (tomando como referencia la forma de la excitación de la Figura 134 y generando en el sistema una respuesta positiva). La amplitud del pulso eléctrico determina la magnitud del volumen a desplazar y la duración de ciclo el cambio de volumen, la velocidad del mismo (la longitud temporal de la primera rampa ascendente ( $t_{p1}$ ) la cual se determina teniendo en cuenta la velocidad máxima del fluido), es decir, una vez alcanzado la velocidad máxima del flujo, posteriormente se mantiene la deformación del piezoeléctrico afín de amortiguar las ondas de presión. Durante este tiempo el flujo sufre una desaceleración gradual, que da fruto a la reducción de la sección del chorro libre, luego con el inicio de la rampa descendiente el chorro libre se rompe generando la gota. Aguas arriba del nozzle el fluido da inicio a su desplazamiento en sentido contrario pero debido al llenado de la cámara de bombeo con fluido proveniente del depósito eventualmente éste vuelve a su estado inicial, proceso que



ha de repetirse en cada eyección. De modo que, centrándonos en la formación de las gotas en apartados anteriores se ha podido apreciar que mediante la ley de Tate en régimen de goteo, las gotas se desprenden del flujo cuando ésta alcanza una masa crítica que por su peso es suficientemente grande como para superar la tensión superficial del fluido. Ahora con números de Weber superiores y por tanto en regímenes eyección o de Rayleigh, las gotas tampoco se separan del flujo como consecuencia del crecimiento de una perturbación axisimétrica inicial consecuencia de la tensión superficial, ahora la ruptura del chorro se produce como consecuencia de la desaceleración del flujo producto de la acción, mantenimiento y retracción del piezoeléctrico.

La desaceleración brusca del flujo en el interior del conducto de salida produce que el chorro libre al poseer menos resistencia al desplazamiento mantenga su inercia y en consecuencia fruto de ésta gradual aceleración del mismo respecto al flujo aguas arriba del nozzle, por el principio de conservación de la masa, propicia la rápida reducción de la sección del chorro libre hasta que éste se separa del flujo, en consecuencia parte del flujo en el interior del conducto de salida retrocede, este proceso se lleva a cabo en el transcurso  $0 < t \leq t_p$  hasta que posteriormente tras oscilar alcanza el equilibrio en un estado igual al estado inicial a  $t > t_p$ .

Siguiendo el proceso de eyección, posteriormente este volumen discreto de fluido separado del flujo aguas abajo del nozzle, a medida que se desplaza se reconfigura debido a la tensión superficial, el tamaño y la forma de la cola de dicho volumen condiciona ésta minimización de su energía libre o reconfiguración geométrica, en una única gota esférica idealmente (ver Figura 137), o en múltiples gotas (una de gran tamaño seguido de gotas satélites de mucho menor tamaño) proceso que tiene lugar mientras describe su trayectoria hasta impactar en el sustrato.



**Figura 137:** Representación esquemática del proceso de eyección de las gotas generadas mediante un sistema Inkjet DOD por piezoeléctricos a partir de un análisis CFD (unidades en micro segundos) [221].

Considerando que la velocidad del flujo libre puede modelarse aproximadamente en función del tiempo como sinusoidal (aproximadamente porque la forma de la respuesta puede verse fuertemente distorsionada por la forma de la excitación que no es sinusoidal, y la cual es adaptada a la reología del fluido y las condiciones necesarias para que éste sea eyectado, de modo que al cambiar de tintas el comportamiento del sistema y por tanto del flujo en el interior del conducto de salida y en consecuencia del chorro libre pueden no comportarse de forma perfectamente sinusoidal), obviando este detalle siendo la velocidad máxima en el interior del conducto de salida  $v_{max} = \dot{x}_1(t_{p1})$  es posible definir la velocidad del chorro libre como:

$$v(t) = \dot{x}_1(t) = v_{max} \text{sen}(\omega_0 t) \quad 3. 142$$

La ecuación anterior define la velocidad del flujo libre teniendo en cuenta que el sistema genera una respuesta positiva, donde el fluido se desplaza al exterior del nozzle inmediatamente. En caso de encontrarnos ante una respuesta negativa, en donde la salida del fluido se lleva a cabo en la segunda fase, requiere de la introducción de un desfase temporal.

Por otro lado, como el piezoeléctrico alcanza su nivel máximo de deformación a  $t_{p1}$  y en consecuencia una velocidad máxima del fluido desplazado, al modelizar el comportamiento de este flujo como sinusoidal que como hemos dicho anteriormente es una aproximación, equivale a decir que esta situación se produce a  $\alpha = \pi$ , es decir, a media período, pero como tras la eyección y el llenado correspondiente de la cámara de bombeo afín de reiniciar el ciclo, las oscilaciones remanentes en el sistema han de ser atenuadas, se considera que el periodo de eyección ha de ser de al menos  $T = 2t_p$  (ver Figura 134) de modo que, se puede decir que:

$$\omega_0 \approx \frac{\pi}{2t_p} \quad 3. 143$$

La expresión anterior es equivalente a la ecuación 3. 123, por otro lado se ha de resaltar que mientras mayor sea el amortiguamiento del sistema ( $\xi$ ) producto de la viscosidad de la tinta principalmente, menor será el tiempo de mantenimiento de la señal (mantenimiento de la deformación del piezoeléctrico  $t_{p2}$ ) y a su vez menor será el tiempo entre pulso y pulso afín de atenuar las oscilaciones, por tanto, menor será el periodo de eyección y mayor será  $\omega_0$  donde ésta a su vez puede definirse como:

$$\omega_0 = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad 3. 144$$

Nótese que de la ecuación anterior podemos decir que  $\omega_0$  representa la frecuencia de resonancia del sistema, de modo que si eyectáramos gotas una detrás de otra a una frecuencia  $f_0 = \omega_0/2\pi$  el sistema eventualmente colapsaría, es por ello que en el proceso de impresión se realiza mediante un tren de pulsos de forma en este caso trapezoidal, como el mostrado en la Figura 134 pero a una frecuencia menor  $f_r > f_0$ , es decir, entre se pulso y

pulso existe un tiempo de mantenimiento mínimo necesario para el amortiguamiento de las oscilaciones del fluido en las inmediaciones del fluido nozzle. En este caso  $f_r$  representa la frecuencia máxima a la que es posible eyectar las gotas, ésta frecuencia limitará la velocidad de desplazamiento del carro de impresión afin de que el sistema de impresión pueda reproducir de forma segura y confiable las líneas y patrones mediante la deposición de las gotas eyectadas del mismo.

Por otro lado y centrándonos en el fluido, el desplazamiento del flujo libre para una respuesta del sistema positiva, mediante la ecuación 3. 142 es posible expresar ésta como:

$$x_1(t) = \int_0^t v_{max} \text{sen}(\omega_0 t) dt \rightarrow x_1(t) = \frac{v_{max}}{\omega_0} (1 - \cos(\omega_0 t)) \quad 3. 145$$

En el caso en el que nos encontramos, las gotas se eyectan horizontalmente de modo que en la formación de las gotas no se involucra la gravedad, aunque debido al diminuto volumen de las gotas y a las altas aceleraciones que sufre el fluido debido a los cortos períodos de eyección su influencia e importancia es despreciable, así pues en esta modelización la formación de las gotas depende principalmente de la viscosidad y de la tensión superficial, así como también de la distribución de la velocidad en el nozzle como función del tiempo y el espacio. De hecho, la fenomenología asociada a la formación de las gotas es de una elevada dificultad, es por ello que se recurre a métodos numéricos (CFD) afin modelar su comportamiento de una forma aproximada.

En la descripción del proceso de formación de las gotas o de la desintegración del chorro a continuación se parte de las siguientes suposiciones:

- Básicamente la formación de las gotas depende del ratio de energía cinética transportada por el flujo libre al exterior y de la energía que poseen las gotas, siempre que esta relación sea superior a la unidad dará inicio a la formación de éstas. Por otro lado, la viscosidad no juega un papel directo en el intercambio de energías aunque indirectamente influye en la distribución de la velocidad en el interior del chorro (Dijksman 1984 [222]).
- La influencia del rozamiento con el aire será despreciado en esta modelización.
- La duración de la eyección es tan corta en un pulso o repuesta positiva que la longitud del chorro formado solo supera en algunas veces el diámetro del chorro.
- Se asume que la respuesta del sistema es inmediata luego  $x_1(t = 0) = 0$  y  $\dot{x}_1(t = 0) = 0$ .

De modo que, partiendo de las expresiones 3. 142 y 3. 145 y estableciendo un balance energético en el nozzle donde diferenciamos entre el flujo interno (en el conducto de salida) y el flujo libre tenemos:

$$E_C^{F. Int}(t') - E_C^{F. Libre}(t', t) = W(t) \quad 3. 146$$

Donde la energía cinética en el interior del conducto de salida, es decir aguas arriba del nozzle se representa como  $E_C^{F. Int}(t')$  mientras que las del flujo libre  $E_C^{F. Libre}(t', t)$ , nótese que en la definición de las energías ambas son función del tiempo aunque es necesario diferenciar el intervalo temporal en el que el flujo permanece unido ( $t'$ ) dentro del intervalo

temporal total  $(0 - t)$ .  $W(t)$  por otra parte, representa el trabajo realizado por la tensión superficial del fluido durante el proceso.

De modo que, siendo la energía cinética  $E_C = \frac{1}{2} m v^2$ , y el trabajo fruto de la tensión superficial  $W = \gamma_{FL} P_1 x_1(t)$  siendo el producto  $P(t) x_1(t)$  la superficie libre del chorro en función del tiempo, es decir:

$$\begin{aligned} E_C^{F. Int}(t') &= \frac{1}{2} \rho_0 S_1 x_1(t') \dot{x}_1(t')^2 \\ E_C^{F. Libre}(t', t) &= \frac{1}{2} \rho_0 S_1 x_1(t') \dot{x}_1(t)^2 \\ W &= \gamma_{FL} P_1 x_1(t) \end{aligned} \quad 3. 147$$

Donde  $x_1(t')$  define la posición del flujo aguas arriba del nozzle en el intervalo temporal  $t'$ , que suponiendo que el flujo presenta un perfil parabólico consecuencia del rozamiento pared-fluido, siendo el fluido viscoso y el régimen laminar, dicha posición equivale en el espacio cuando  $r = R_1$ , siendo  $r$  la variable radial y  $R_1$  el radio del nozzle, es decir siendo  $x_1(t') = x_1(R, t')$  cosa que en esta modelización se ha obviado afín de simplificarla, del mismo modo  $\dot{x}_1(t') = \dot{x}_1(R, t')$  representa la velocidad media del flujo indistintamente de su ubicación espacial dentro de la sección circular. Por otro lado,  $t'$  representa el intervalo temporal en el que ocurre la eyección luego es finita a diferencia de la variable  $t$  de dominio infinito. Así pues la expresión 3. 146 puede verse rescrita como:

$$\int_0^t \dot{x}_1(t') \dot{x}_1(t')^2 - \int_0^t \dot{x}_1(t') \dot{x}_1(t)^2 = \frac{2\gamma_{FL} P_1}{\rho_0 S_1} x_1(t) \quad 3. 148$$

Haciendo uso de las ecuaciones 3. 142 y 3. 145 la expresión anterior puede verse simplificada como:

$$(1 - \cos(\omega_0 t)) \left[ 2 \cos^2(\omega_0 t) - \cos(\omega_0 t) - \left( \frac{6\gamma_{FL} P_1}{\rho_0 S_1 v_{max}^2} + 1 \right) \right] = 0 \quad 3. 149$$

De la ecuación anterior se aprecia que las soluciones para  $\cos(\omega_0 t)$ , proporcionan un valor mayor o igual a la unidad y por tanto inválido, mientras que en el caso donde las raíces del polinómico anterior son negativas establece un límite para la velocidad máxima, es decir:

$$\cos(\omega_0 t) = \frac{1}{4} \pm \frac{3}{4} \sqrt{1 + \frac{16}{3} \frac{\gamma_{FL} P_1}{\rho_0 S_1 v_{max}^2}} \quad 3. 150$$

Para que  $\cos(\omega_0 t) > -1$  y por tanto esté comprendido entre 1 y  $-1$ , la velocidad máxima del flujo en el interior del nozzle es de:

$$v_{max} > \sqrt{\frac{3\gamma_{FL} P_1}{\rho_0 S_1}} \quad 3. 151$$

De esta forma se evidencia que para formar las gotas, en el interior del nozzle el flujo ha de poseer una velocidad superior al límite anterior, donde el volumen y velocidad del flujo libre se definen mediante las siguientes expresiones:

$$V = S_1 x_1(t^*) = S_1 \frac{v_{max}}{\omega_0} (1 - \cos(\omega_0 t^*))$$

$$\dot{x}_1(t^*) = v_{max} \text{sen}(\omega_0 t^*)$$
3. 152

Donde  $t^*$  representa el tiempo en el que se produce la ruptura del flujo formando la gota, que a su vez se produce cuando  $v_{max}$  se encuentra en el límite anterior, donde  $\omega_0 t^* = \pi$  y por tanto la velocidad de la gota respecto del chorro es cero. Por otro lado, estableciendo que la separación de las gotas se produce cuando la superficie de ésta es de al menos dos veces la superficie del menisco en el nozzle de área  $S_1$ , el efecto de la tensión superficial del flujo libre sobre la energía cinética de la gota puede describirse de la siguiente forma:

$$\frac{1}{2} \rho_0 V \dot{x}_1(t^*)^2 - \gamma_{FL} S_1 = \frac{1}{2} \rho_0 V v_{Gota}^2$$
3. 153

De forma que, la velocidad de la gota tras su separación del flujo o la velocidad de eyección de la misma propiamente dicha se define como:

$$v_{Gota} = \dot{x}_1(t^*) \sqrt{1 - \frac{2\gamma_{FL} S_1}{\rho_0 V} \frac{1}{\dot{x}_1(t^*)^2}}$$
3. 154

Esta expresión define un nuevo límite para la velocidad del flujo en el interior del nozzle, donde para que la velocidad de la gota sea un valor real, ésta en cuando se produzca la ruptura del flujo libre ha de ser:

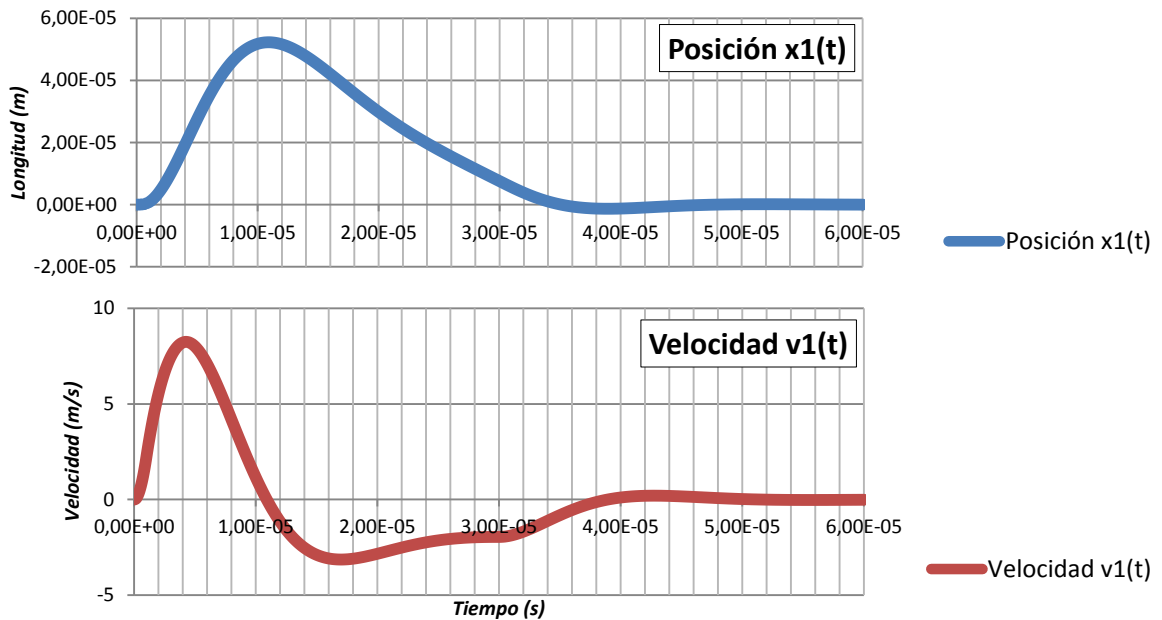
$$\dot{x}_1(t^*) > \sqrt{\frac{2\gamma_{FL} S_1}{\rho_0 V}}$$
3. 155

De modo que como se ha comentado anteriormente, la separación de las gotas se produce una vez se ha superado la velocidad máxima del flujo en el interior del nozzle, siendo  $v_{max} > \dot{x}_1(t^*)$ . Por otro lado, suponiendo que idealmente  $V_{Gota} \approx 4/3 \pi R_1^3$  siendo  $R_1$  el radio del nozzle, es posible afirmar teniendo en cuenta que la ecuación 3. 152 define el volumen de líquido saliente, que cuando este llegue a  $t^*$  se producirá la ruptura siendo este volumen, el de la gota, y por tanto:

$$\pi R_1^2 \frac{v_{max}}{\omega_0} (1 - \cos(\omega_0 t^*)) \leq \frac{4}{3} \pi R_1^3 ; \omega_0 t^* = \pi \rightarrow \frac{2}{3} \geq \frac{v_{max}}{\omega_0 R_1}$$
3. 156

De forma que, tanto el volumen de las gotas como, la velocidad de salida y la frecuencia  $\omega_0$  está relacionada con el tamaño del nozzle. Así, siguiendo el ejemplo anterior para un sistema de impresión Inkjet DOD ideal por piezoeléctricos basado en el resonador de Helmholtz de respuesta positiva, excitado mediante una señal constituido por un conjunto de rampas diseñadas en función de las características del sistema y la viscosidad del fluido empleado (tinta) que a través de éste ofrece una respuesta amortiguada, bajo las condiciones establecidas anteriormente dicho sistema ideal responde proporcionando al

fluido existente en su interior un desplazamiento y una dinámica evidenciada en las gráficas de a continuación:



**Figura 138:** Respuesta del sistema a la señal trapezoidal de la Figura 134 en desplazamiento y velocidad del fluido en el interior del conducto de salida o nozzle en este caso [Fuente: Elaboración propia].

Como se puede apreciar en la Figura 138 la eyección de la gota tiene lugar después de que el fluido en el interior del nozzle alcance la velocidad máxima a  $t_{p1}$ , cuando ésta comienza a decrecer se produce la reducción de la sección hasta que eventualmente parte del chorro libre se desprende manteniendo parte de su inercia inicial en el intervalo  $t = (t_{p1}, t_p)$  concretamente a  $t^*$ , a partir de este momento el flujo retrocede para oscilar hasta atenuarse y finalmente a  $t > t_p$  el piezoeléctrico al volver a su estado inicial y se produce el llenado de la cámara de bombeo.

Por otro lado, teniendo en cuenta las condiciones geométricas del sistema de impresión anterior de respuesta positiva y la reología de la tinta, siendo su tensión superficial de  $\gamma_{FL} = 50 \text{ mN/m}$ , mediante la expresión 3. 151 se establece que la velocidad máxima del flujo afín de generar la eyección de la gota ha de ser  $v_{max} > 4,47 \text{ m/s}$ , de modo que si observamos la Figura 132 donde se compara la respuesta del sistema en términos de posición y velocidad cargado de tinta con viscosidades dinámica ( $\mu$ )  $20 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  y  $2 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , vemos que en el segundo correspondiente a un sistema sub-amortiguado no supera dicho límite luego dicho sistema no será capaz de eyectar la gota. Por otra parte, usando una tinta de una viscosidad intermedia ( $\mu = 10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ) y haciendo uso de una excitación del tipo trapezoidal cuya respuesta se aprecia en la Figura 138, de forma que una vez superada la condición  $v_{max}$ , el sistema eyecta gotas de  $23,3 \text{ pl}$  a una velocidad de  $5,56 \text{ m/s}$  luego el

límite para que estas gotas se produzcan se establece a  $\dot{x}_1(t^*) = 1,74 \text{ m/s}$  con una  $\omega_0 = 409061,5 \text{ rad/s}$ .

### Formación de las gotas (Respuesta negativa)

En el caso de que el sistema presente una respuesta negativa y por tanto el fluido primero retrocede para posteriormente volver a llenar el conducto de salida y producir la eyección de la gota, situación que ocurre una vez el flujo ha cambiado de signo (segunda fase) y por tanto siguiendo la definición de la velocidad como sinusoidal (3. 142) el desplazamiento del flujo en el interior del nozzle puede ser expresada como:

$$x_1(t) = x_0 + \frac{v_{max}}{\omega_0} (1 - \cos(\omega_0 t)) \quad 3. 157$$

Nótese que bajo esta definición la posición del flujo comienza en la segunda fase, donde ahora las condiciones iniciales son:  $x_1(t = 0) = x_0$  es decir, a  $t = 0$  el flujo o el menisco se encuentra a una distancia  $x_0$  del orificio de salida o nozzle siendo  $x_0 < 0$ . De la ecuación anterior tomando como referencia la posición del nozzle podemos decir que:

$$\cos(\omega_0 t) = 1 + \frac{x_0 \omega_0}{v_{max}} \quad 3. 158$$

Por otro lado, se ha de aclarar que el uso de pulsos negativos solo tienen lugar cuando la viscosidad del fluido es baja y por tanto el amortiguamiento también ( $\xi < 0,5$ ). De modo que, retomando el balance energético anterior en el nozzle tenemos:

$$\int_{t_0}^t \dot{x}_1^3(t') - \dot{x}_1(t') \dot{x}_1(t)^2 = \frac{2\gamma_{FL} P_1}{\rho_0 S_1} x_1(t) \quad 3. 159$$

De manera que teniendo en cuenta las expresiones 3. 142 y 3. 157, y teniendo en cuenta que a  $t_0$  el flujo se encuentra a su máximo distanciamiento del nozzle donde su velocidad es cero luego  $\omega_0 t_0 = 0$ , podemos volver a establecer el límite de la velocidad del flujo mediante la ecuación 3. 151. Por otro lado, una vez superado éste límite el volumen del flujo libre se define mediante la siguiente expresión:

$$V = S_1 \left[ x_0 + \frac{v_{max}}{\omega_0} (1 - \cos(\omega_0 t^*)) \right] \quad 3. 160$$

Donde al igual que, para una respuesta positiva,  $t^*$  representa el momento en el que se produce la separación de la gota del flujo libre contando desde que el flujo inicia el cambio de sentido en el interior del conducto de salida. Siendo en este punto la velocidad del chorro  $\dot{x}_1(t^*) = v_{max} \text{sen}(\omega_0 t^*)$ . De forma que, siguiendo la metodología anterior, la velocidad de la gota tras la ruptura puede determinarse teniendo en cuenta la absorción de energía cinética en el chorro libre por parte de la tensión superficial (Ec. 3. 154) de igual manera podemos establecer mediante el volumen de las gotas la siguiente condición:

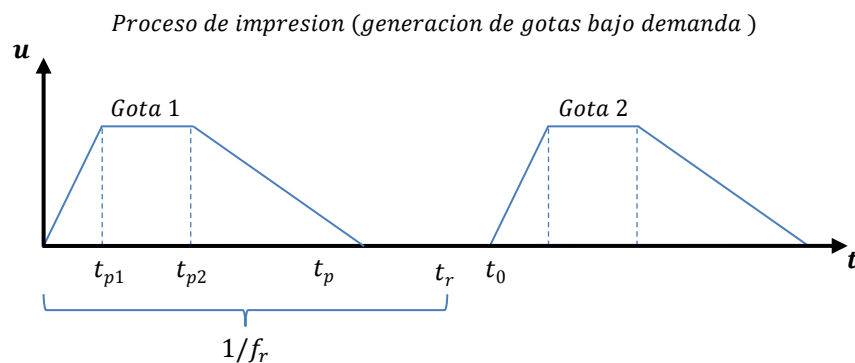
$$\pi R_1^2 \left[ x_0 + \left( \frac{v_{max}}{\omega_0} (1 - \cos(\omega_0 t^*)) \right) \right] \leq \frac{4}{3} \pi R_1^3 ; \omega_0 t^* = \pi$$

$$\frac{4}{3} \geq \frac{x_0 \omega_0 + 2v_{max}}{\omega_0 R_1}$$
3. 161

De modo que, como se puede apreciar el volumen de las gotas eyectadas ahora no depende solo del tamaño del nozzle y de la velocidad máxima del flujo, sino que también depende de la distancia recorrida por éste en la primera fase o fase de succión. Así pues siguiendo el análisis del sistema de inyección mono-nozzle anterior ahora siendo la respuesta del mismo negativa, la primera condición para que se produzca la gota ha de ser  $v_{max} > 4,47 \text{ m/s}$ , condición que se cumple si observamos la Figura 130, y siendo la tensión superficial de la tinta de  $\gamma_{FL} = 50 \text{ mN/m}$  y de baja viscosidad (condición para que el sistema sea sub-amortiguado y funcione adecuadamente)  $\mu = 2 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , el sistema eyecta gotas de  $10 \text{ pl}$  a una velocidad de  $1,87 \text{ m/s}$  luego en este caso como la excitación es pulso de duración  $t_p = 10,4 \mu\text{s}$  implica que  $\omega_0 = 302076,2 \text{ rad/s}$ .

### Amortiguación

Como se ha podido apreciar la respuesta dinámica del presente sistema de impresión, depende del comportamiento del piezoeléctrico. Por otra parte, la excitación de éste sistema se realiza mediante pulsos trapezoidales constituidos por una suma de funciones rampa. Tras cada señal trapezoidal se produce la eyección y el llenado de la cámara de bombeo cosa que tiene lugar durante el intervalo temporal  $t_p$ . La succión de fluido a través del conducto de conexión genera a su vez ondas de presión que ha de ser atenuadas por la propia amortiguación del sistema, afín evitar que las oscilaciones del flujo en las inmediaciones del nozzle afecte la eyección de las gotas siguientes durante el proceso de impresión (eyección de gotas de forma periódica cuya periodicidad no es constante ya que depende de la forma del patrón a reproducir). De forma que, afín de garantizar la estabilidad del sistema y su capacidad de eyectar gotas de forma continua, es necesario establecer una frecuencia máxima de eyección, inferior a la frecuencia de resonancia del sistema  $f_r > f_0$  (ver Figura 139).



**Figura 139:** Tren de pulsos trapezoidales en representación de la deformación del piezoeléctrico en el interior de la cámara de bombeo. Cada pulso trapezoidal equivale a la



*eyección de una gota, la cual se realiza a una frecuencia  $f_0$ , siendo esta frecuencia función de la velocidad de desplazamiento del carro y de la forma del patrón a reproducir sobre el sustrato [Fuente: Elaboración propia].*

De modo que, afín de que las oscilaciones del flujo en el interior del nozzle tras el llenado de la cámara de bombeo no afecten las eyecciones de las gotas siguientes, se ha de establecer una frecuencia máxima de eyección o lo que es lo mismo un tiempo mínimo entre pulso y pulso para que el propio sistema atenué dichas oscilaciones. En este aspecto se ha considerado que la amplitud del desplazamiento del flujo en las inmediaciones del nozzle ha de ser menor al 5% antes de dar inicio a la siguiente eyección, es decir el tiempo mínimo entre gotas o la máxima frecuencia de eyección ha de ser:

$$t_{min} = \frac{\pi}{\xi \omega_n} , f_{max} = \frac{\xi \omega_n}{\pi} \quad 3. 162$$

De modo que, mediante la expresión anterior definimos el tiempo que requiere el sistema para asentarse a un valor casi estacionario, dicho tiempo  $t_{min}$  establece la frecuencia máxima de eyección de gotas condicionando la velocidad de desplazamiento del cabezal Inkjet. Por otro lado, como es lógico éste límite evita que el sistema entre en resonancia siendo  $t_{min} > T = 2t_p$  haciéndose esta condición más evidente mientras menor sea la viscosidad del fluido y por tanto menor la amortiguación del sistema.

### **Recarga (llenado del conducto de salida)**

Después de desprenderse la gota, tanto para una respuesta positiva como para una respuesta negativa, debido a la rigidez del sistema y a la viscosidad del fluido en las inmediaciones del nozzle, el fluido se retrae debido a la tensión superficial introduciéndose en el interior del conducto de salida ( $\Delta L_1 = V_{gota}/S_1$ ), posteriormente este flujo oscila hasta que eventualmente ésta oscilación decae o se amortigua alcanzando una posición de equilibrio, la cual debido al volumen eyectado idealmente debería ubicarse en el interior del conducto de salida aguas arriba del nozzle cosa que debido al fenómeno de recarga no es así, ya que el fluido tras alcanzar el estado de equilibrio se ubica en las inmediaciones del nozzle por tanto ha habido un ligera recarga del sistema.

De modo que, al igual que en apartado anterior donde analizábamos el amortiguamiento necesario afín de garantizar la estabilidad del sistema y su capacidad de eyectar gotas de forma continua ahora analizaremos la fenomenología asociada al llenado del conducto de salida tras la eyección de la gota. En este aspecto, en este apartado se recurre al control de la inercia del fluido en las oscilaciones y a la tensión superficial. Así pues, el llenado de parte del fluido eyectado al exterior del sistema durante el proceso de impresión se realiza por medio de tres mecanismos que a continuación se enumeran:

### a) Influencia de la tensión superficial en el flujo

Mediante la ley de Jurin (como se podrá apreciar en la interacción gota sustrato en apartados posteriores) es posible afirmar que la presión capilar debido a la mojabilidad del conducto de eyección por el fluido del interior del nozzle puede definirse como:

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cdot \cos(\theta_Y)}{R_1} \quad 3.163$$

Siendo éste incremento de presión generado por la tensión superficial y la mojabilidad del sistema por el fluido, recurriendo a la ley de Poiseuille la cual describe el comportamiento de un fluido viscoso en régimen laminar y teniendo en cuenta que tras la eyección, la magnitud del desplazamiento del fluido en el interior de un conducto  $i$  siendo  $i = 1,2$  puede definirse como  $\Delta L_i = V/S_i$ , el tiempo necesario para que por capilaridad se rellene el volumen ausente puede ser definido como:

$$t_a = \frac{4\pi R_1}{\gamma \cdot \cos(\theta_Y)} \left( \frac{L_1}{S_1^2} + \frac{L_2}{S_2^2} \right) V \quad 3.164$$

De modo que, el volumen de la gota ha de ser repuesto por el fluido que entra tanto por el conducto de conexión (2) y el cual también se desplaza por el conducto de salida (1) y siendo el caudal volumétrico  $\dot{V} = V/t_a$ , podemos estimar que idealmente  $t_a$  define el tiempo requerido por el sistema para llenar el volumen ausente por capilaridad.

### b) Flujo generado por la sub-presión (Vacío).

Como se ha comentado anteriormente tras la eyección el fluido oscila creándose una succión en el interior del sistema que debido a la incompresibilidad del fluido mas no del sistema, oscila hasta que la viscosidad atenúa esta oscilación hasta eliminarla y alcanzar el equilibrio. De modo que expresando el movimiento del fluido en el interior del sistema como sinusoidal amortiguado:

$$v(t) = v_{max} \left[ e^{-\xi \omega_n t} \text{sen}(\omega_n t \sqrt{1 - \xi^2}) \right] \quad 3.165$$

Haciendo uso de la ecuación general de Bernoulli donde:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_0 v_{max}^2 \left[ e^{-2\xi \omega_n t} \text{sen}^2(\omega_n t \sqrt{1 - \xi^2}) \right] \quad 3.166$$

De modo que, teniendo en cuenta que la pérdida de carga se modeliza mediante la ley de Poiseuille, podemos establecer el caudal volumétrico en el interior del sistema en función del tiempo como:

$$\dot{V}(t) = \frac{\rho_0 v_{max}^2 \left[ e^{-2\xi \omega_n t} \text{sen}^2(\omega_n t \sqrt{1 - \xi^2}) \right]}{16\pi\mu \left( \frac{L_1}{S_1^2} + \frac{L_2}{S_2^2} \right)} \quad 3.167$$

Así pues, teniendo en cuenta que  $\dot{V} = V/t$ , el tiempo necesario para que se alcance el equilibrio y por tanto se logre remplazar el volumen eyectado toma la siguiente forma:

$$V_{gota} = \frac{\rho_0 v_{max}^2}{16\pi\mu \left( \frac{L_1}{S_1^2} + \frac{L_2}{S_2^2} \right)} \int_{t^*}^{t_b} e^{-2\xi\omega_n t} \text{sen}^2 \left( \omega_n t \sqrt{1 - \xi^2} \right) dt \quad 3. 168$$

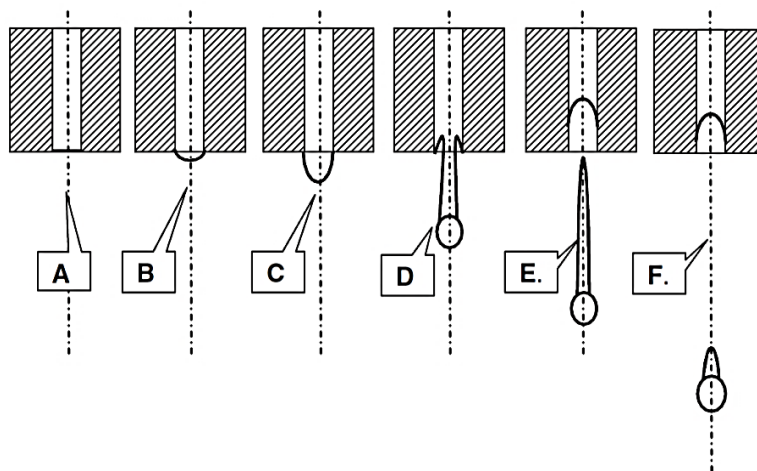
Donde  $t^* < t_b$  siendo  $t^*$  el momento de desprendimiento de la gota y siendo  $t_b$  el momento donde deja de oscilar. Resolviendo la ecuación para un sistema sub-amortiguado ( $\xi \ll 1$ ) anterior puede ser expresado como:

$$t_b = - \frac{\ln \left[ e^{-2\xi\omega_n t^*} - \left[ \frac{64\pi\mu}{\rho_0 v_{max}^2} \left( \frac{L_1}{S_1^2} + \frac{L_2}{S_2^2} \right) V_{gota} \xi \omega_n \right] \right]}{2\xi\omega_n} \quad 3. 169$$

De igual forma el máximo volumen de fluido libre aguas abajo del nozzle viene definido por la siguiente expresión:

$$V_{max} = \frac{\rho_0 v_{max}^2}{16\pi\mu \left( \frac{L_1}{S_1^2} + \frac{L_2}{S_2^2} \right)} e^{-2\xi\omega_n t^*} \quad 3. 170$$

Como se puede apreciar una vez el flujo libre se rompe produciéndose la eyección de la gota cuyo volumen es:  $V_{gota} = V_{max} - V_b$  cosa que ocurre en  $t^*$  y siendo  $V_b$  el volumen de fluido que se retrae como hemos visto anteriormente gracias a la tensión superficial, el sistema sufre una carencia de fluido en el conducto de salida que ha de ser suplido, parte de ésta carencia es solventada durante las oscilaciones en el intervalo  $t^* < t \leq t_b$  incrementando  $V_b$ , de modo que siendo  $V_{max} > V_{gota} > \Delta V_c$ ;  $\Delta V_c = V_{gota} - V_b$ . Es importante resaltar que mientras mayor sea la velocidad del fluido, mayor será la pérdida de carga siendo a su vez ésta para una misma velocidad mayor mientras mayor sea la viscosidad, de modo que la amortiguación del sistema será mayor reduciendo el tiempo del oscilación  $t_b$  y por tanto menor la cantidad de volumen recargado por succión debido a las oscilaciones.



**Figura 140:** Representación de las diferentes etapas del proceso de eyección de las gotas en un sistema de respuesta positiva. A) Estado de equilibrio, B) Inicio de la deformación del piezoeléctrico y por tanto del movimiento del fluido, C) Deformación del menisco y por tanto

*formación de la gota, D) Generación del chorro libre con inicio de la desaceleración del flujo y por tanto, comienzo de la reducción de la sección, E) Ruptura del chorro, eyección de la gota y retracción del flujo, F) Gota reconfigurándose en vuelo, inicio de la recarga del conducto de salida [168].*

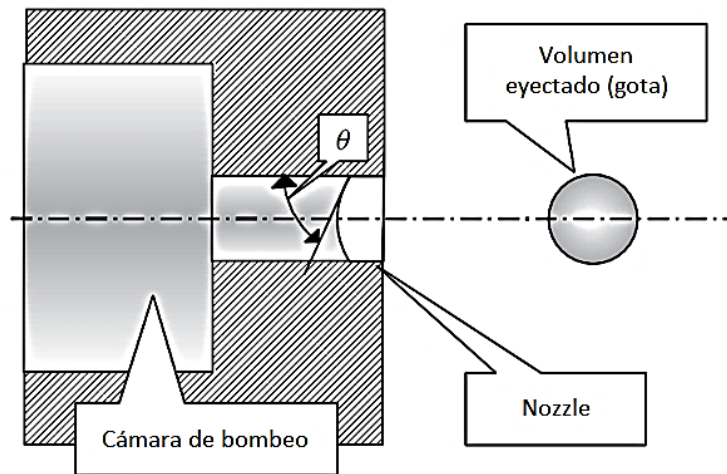
### c) Incremento de la masa en el amortiguamiento del fluido después de la liberación de la gota

Hasta ahora hemos visto como fruto de la tensión superficial y la mojabilidad del sistema por el fluido, el chorro libre tras la separación de la gota retrocede por el conducto de salida y debido a la capilaridad éste se recarga ligeramente. Por otro lado, no solo por capilaridad, sino que debido a las oscilaciones que genera la eyección de la gota, en el interior del nozzle se genera una presión de succión que en consecuencia también produce la recarga de parte del fluido eyectado. Pero, no se ha tenido en cuenta que tras cada oscilación la cantidad de fluido en movimiento aumenta, de modo que  $V_{max}$  disminuye tras cada ciclo, así pues el incremento de la masa oscilante durante la amortiguación ha de ser tenido en cuenta.

De forma que, teniendo en cuenta que:  $\Delta L_1 = V_{gota}/S_1$  y siendo  $L_1^* = L_1 - \Delta L_1$  donde  $L_1$  es constante y representa la longitud total del conducto de salida y siendo  $L_1^*$  la longitud real del fluido en el interior del conducto de salida ya que esta no se encuentra totalmente llena tras la eyección o lo que es la longitud equivalente a la diferencia entre el volumen total de la masa oscilante y el volumen eyectado. De modo que dicha diferencia es máxima a  $t^*$  y por tanto, tras cada oscilación al producirse la recarga de dicho volumen ausente  $L_1^*$  va disminuyendo en magnitud (ver Figura 141). Así pues, haciendo uso del balance de fuerzas expresado en 3. 109, pero ahora un intervalo temporal distinto el cual tiene inicio después de la separación de la gota ( $t > t^*$ ), tenemos:

$$\rho_0 S_1 (L_1^* + x_1) \ddot{x}_1 + 8\pi\mu (L_1^* + x_1) \dot{x}_1 + K_b \left( \frac{S_1^2}{V_c} \right) x_1 = 0 \quad 3. 171$$

Donde la ecuación anterior describe la cantidad de movimiento existente en el interior del conducto de salida una vez la gota se ha desprendido, y cuya masa oscilante se define como:  $M = \rho_0 S_1 (L_1^* + x_1)$ , nótese que  $x_1$  además de representar la posición del fluido respecto al nozzle representa la adición de masa al sistema siendo a su vez decreciente debido a la amortiguación del sistema.



**Figura 141:** Retracción del flujo tras la separación de la gota [168].

Por otra parte, en aquellos casos donde  $\Delta L_1$  sea pequeño en comparación con  $L_1$ , es posible asumir que la solución homogénea de la ecuación anterior tome forma de:

$$x_1 = x_{1,Lineal} + \varepsilon f(t) \quad ; \quad \varepsilon = \frac{\Delta L_1}{L_1^*} \ll 1 \quad 3.172$$

Nótese que aunque  $x_1(t)$  es decreciente, durante las oscilaciones  $f(t)$  aumenta la masa en fase a dichos desplazamientos oscilantes y debido a la amortiguación se cumple  $|x_1| < |\Delta L_1|$ . Nótese a su vez que en este nuevo dominio temporal llamémosle  $t_R = t - t^*$  la posición del fluido a  $t_R = 0$  es  $\Delta L_1$  de modo que la expresión 3.171 puede reescribirse como:

$$\rho_0 S_1 (L_1^*) \varepsilon \ddot{f} + 8\pi\mu (L_1^*) \varepsilon \dot{f} + K_b \left( \frac{S_1^2}{V_c} \right) (\Delta L_1 + \varepsilon f) = 0 \quad 3.173$$

De modo que, mediante la siguiente agrupación de variables:  $M^* = \rho_0 S_1 L_1^*$ ,  $K^* = 8\pi\mu L_1^*$ ,  $C = K_b (S_1^2 / V_c)$  tenemos:

$$M^* \ddot{f} + K^* \dot{f} + C f = C \frac{x_{1,Lineal}^2}{\Delta L_1} \quad 3.174$$

Esta ecuación satisface la condición  $t = t^*$  o lo que es lo mismo  $t_R = 0$ , de modo que definiendo la frecuencia natural y la amortiguación ahora como  $\omega_n^*$  y  $\xi^*$  podemos reescribir la velocidad y el desplazamiento del fluido dentro del nozzle como:

$$v(t_R) = \dot{x}_{1,Lineal}(t_R) = v_{max} e^{-\xi^* \omega_n^* t_R} \cos\left(\omega_n^* t_R \sqrt{1 - \xi^{*2}}\right) \\ x_{1,Lineal}(t_R) = \frac{v_{max}}{\omega_n^*} \left[ \xi^* - e^{-\xi^* \omega_n^* t_R} \left( \xi^* \cos\left(\omega_n^* t_R \sqrt{1 - \xi^{*2}}\right) - \sqrt{1 - \xi^{*2}} \operatorname{sen}\left(\omega_n^* t_R \sqrt{1 - \xi^{*2}}\right) \right) \right] \quad 3.175$$

Nótese que el uso nuevo dominio temporal ( $t_R$ ) en las ecuaciones anteriores modifica la definición de la velocidad del fluido en el interior del conducto de salida, puesto que ahora a  $t_R = 0$  dicha velocidad es la máxima posible tras la eyección. De modo que, como resultado tenemos:

$$M^* \ddot{f} + K^* \dot{f} + Cf = \frac{C}{\Delta L_1} \left( \frac{v_{max}}{\omega_n^*} \xi^* \right)^2 \left[ 1 - e^{-\xi^* \omega_n^* t_R} \left( \cos \left( \omega_n^* t_R \sqrt{1 - \xi^{*2}} + \phi \right) \right) \right]^2 \quad 3.176$$

En nuestro análisis, la solución particular de interés es:

$$f = \frac{1}{\Delta L_1} \left( \frac{v_{max}}{\omega_n^*} \xi^* \right)^2 \left[ 1 + e^{-\xi^* \omega_n^* t_R}(\dots) + e^{-2\xi^* \omega_n^* t_R}(\dots) \right] \approx \frac{1}{\Delta L_1} \left( \frac{v_{max}}{\omega_n^*} \xi^* \right)^2 \quad 3.177$$

Es necesario resaltar que así como en el apartado anterior donde la recarga se realizaba por succión y cuyos efectos se acrecentaban a medida que la viscosidad decrecía, en este caso a medida que la viscosidad del fluido aumenta, los efectos del aumento de la masa oscilante se hacen más mayores aunque dentro de unos límites, ya que en fluidos excesivamente viscosos como la amortiguación es muy elevada el número de oscilaciones se ve reducido en gran medida disminuyendo los efectos de éste mecanismo en la recarga del conducto de salida.

### Desaceleración de las gotas en el proceso de ruptura y evolución a su forma esférica

Como ya se ha comentado con anterioridad la formación de la gota se produce una vez el flujo en el interior del nozzle ha alcanzado la velocidad máxima, que al sufrir una fuerte desaceleración y debido a la inercia que posee el chorro libre por el principio de la conservación de la masa, la reducción de la sección del chorro libre da origen a la desintegración de éste, idealmente en la eyección de un único volumen discreto “la gota” aguas abajo del nozzle. Por otro lado, como se ha podido apreciar en el apartado anterior el flujo en el interior del nozzle tras la eyección da inicio a una etapa de transición donde oscila hasta alcanzar un estado de equilibrio el cual dará inicio al llenado de la cámara de bombeo afín poder reiniciar el ciclo. Así pues, tal y como se puede apreciar en la Figura 137 durante la eyección de la gota, ésta y el flujo se encuentran unidos temporalmente por un filamento (Dijksman, 1984 [222]) de modo que asumiendo que la masa de la gota se encuentra concentrada en el extremo del filamento podemos decir que el volumen de este filamento puede expresarse idealmente como:

$$\pi R_f^2(t_R) L_f(t_R) = V \quad 3.178$$

Donde tanto el radio del filamento como la longitud del mismo son función del tiempo, en el intervalo temporal  $t_R = t - t^*$ , que en fluidos viscosos como es en nuestro caso, la ruptura requiere de un cierto esfuerzo el cual se opone al estiramiento del flujo libre, de modo que haciendo uso de la segunda ley de Newton podemos establecer el siguiente balance de fuerzas:

$$\rho_0 V \frac{dv}{dt_R} = -3\mu \frac{v(t_R) - \dot{x}_1(t_R)}{L_f(t_R)} \pi R_f^2(t_R) \quad 3. 179$$

Donde el término  $3\mu$  representa la elongación viscosa de un cilindro de fluido (Bird, Armstrong and Hassager, 1987 [223]) donde la diferencia entre la velocidad de la gota y la velocidad del fluido en el nozzle representa la variación temporal de la longitud del filamento, es decir  $dL_f/dt_R$ , de modo que esta expresión puede verse simplificada como:

$$\frac{dv}{dt_R} = -\frac{3\mu}{\rho_0} \frac{1}{L_f^2} \frac{dL_f}{dt_R} \quad 3. 180$$

De forma que, como en el momento de la ruptura y desprendimiento de la gota el filamento es infinitamente delgado la ecuación anterior puede aproximarse a:

$$\Delta v = -\frac{3\mu}{\rho_0} \frac{1}{L_f(t_R = 0)} = -\frac{3\mu}{\rho_0 x_1(t^*)} \quad 3. 181$$

Este efecto de desaceleración sufrida por las gotas tras su desprendimiento es mayor mientras más grande sea su tamaño y más alta sea la viscosidad del fluido utilizado. Sin embargo, en aquellos casos donde las tintas posean un comportamiento no Newtoniano (comportamiento visco-elástico), la elongación viscosa se convierte en una función de la elongación: cuanto mayor sea ésta, mayor será la elongación viscosa. Este efecto está fuertemente relacionado con el peso molecular del soluto de polímero en la tinta. Por encima de un cierto peso molecular de polímero (y a una cierta concentración), la formación de gotas se hace imposible.

A modo de resumen se puede agregar que como se ha podido apreciar en apartados anteriores, la formación de las gotas para un sistema de respuesta positiva tiene lugar cuando el flujo en el interior del nozzle supera una velocidad límite ( $v_{max}$ , expresión 3. 151), aunque la ruptura del chorro libre o la eyección de la gota se lleva a cabo a una velocidad inferior a ésta, es decir a  $\dot{x}_1(t^*)$ . De modo que, considerando el volumen eyectado como:  $V_{gota} = \pi R^2 \dot{x}_1(t^*)$  podemos decir que la relación más importante a tener en cuenta en la formación de las gotas viene impuesta de la expresión 3. 156, es decir:

$$\frac{2}{3} \geq \frac{v_{max}}{\omega_0 R_1} \quad 3. 182$$

Esta expresión establece las condiciones requeridas para la formación de las gotas, las cuales vienen determinadas por la velocidad del flujo, las dimensiones del nozzle y la frecuencia característica ofrecida por el sistema a la señal de entrada. Por otra lado, en cuanto a la amortiguación y recarga, es un proceso complejo en el cual se ha de tener en cuenta 3 fenómenos distintos: el llenado debido a la capilaridad y la mojabilidad, el llenado debido a las presiones de succión o de vacío generado en las oscilaciones y el llenado debido a la inercia y el aumento de la masa oscilante tras la eyección de la gota y retracción del menisco, siendo importantes los efectos de las presiones de succión en fluidos o tintas

de baja viscosidad mientras que los efectos inerciales son más pronunciados y de mayor importancia en fluidos de alta viscosidad.

Finalmente, como hemos podido apreciar en este último apartado, las gotas tras su separación del chorro libre sufren una desaceleración fruto de los esfuerzos viscosos del fluido que reduce su velocidad de eyección, siendo esta:

$$v_{eyección} = v_{Gota} - \Delta v \quad 3.183$$

Donde la velocidad de la gota ( $v_{Gota}$ ) se define mediante la expresión 3.154 y donde a  $t = t^*$  o en el nuevo dominio temporal a  $t_R = 0$  (en el momento de ruptura) la velocidad del flujo en el interior del conducto de salida ha de satisfacer la condición 3.155 afín de que se pueda producir la eyección de forma satisfactoria.

### **Evolución de la gota a su forma esférica**

Una vez la gota se ha desprendido del chorro libre, ésta comienza su trayectoria hasta el sustrato, la cual debido al desplazamiento del carro solidario al cabezal de impresión donde se genera la eyección, ésta describe una trayectoria parabólica proceso que se analiza con mayor amplitud en apartados posteriores. Durante dicho trayecto el volumen de tinta se reconfigura de un estado digamos semicilíndrico donde la mayoría de la masa se encuentra ubicada en uno de sus extremos a un estado esférico debido a la tensión superficial en oposición a la viscosidad. De modo que, haciendo uso de un balance energético en la interfaz del volumen eyectado, podemos apreciar que el trabajo realizado en la reconfiguración geométrica de la gota ( $W$ ) para un fluido no viscoso puede expresarse como:

$$W_p + W_s - W = 0 \quad 3.184$$

Donde  $W_p$  representan el trabajo realizado como consecuencia de la variación de la presión interna mientras que  $W_s$  representa el trabajo debido la tensión superficial, de forma que la ecuación anterior puede represarse como:

$$(P_e - P_i(t_R))V_{Gota} + \gamma_{LF}S(t_R) - W(t_R) = 0 \quad 3.185$$

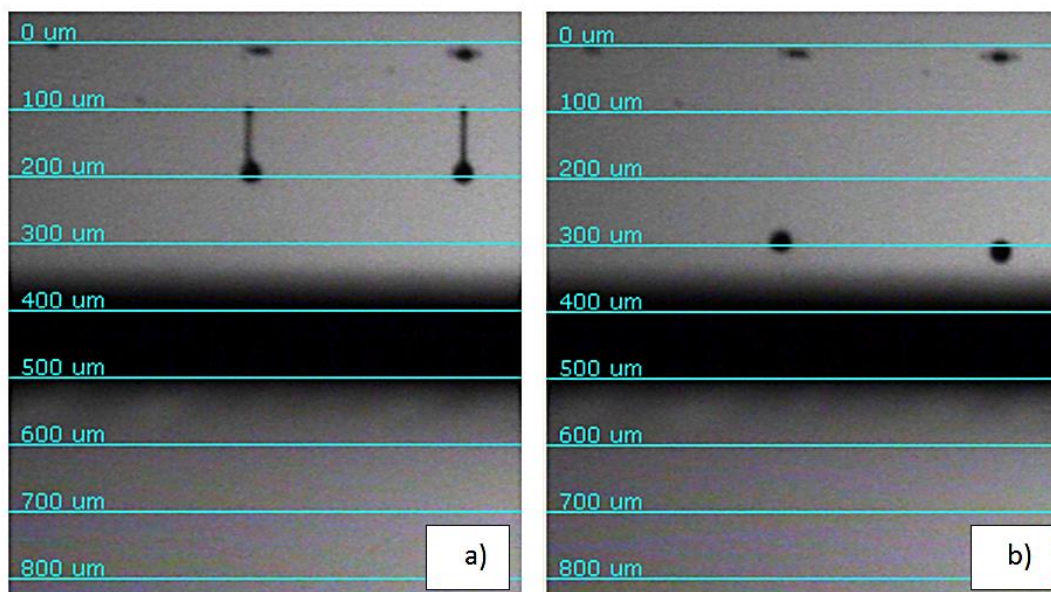
De modo que, durante el transcurso de  $0 < t_R < t_{Esf.}$  o lo que es lo mismo en el dominio temporal global  $t^* < t < (t^* + t_{Esf.})$ , se produce la minimización de la energía libre  $W(t_R)$  hasta anularse, dicha reducción lleva al volumen eyectado a adoptar una forma esférica (la esfera es la forma geométrica de mínima superficie), de manera que a  $t_{Esf.}$  la gota se encuentra internamente en un estado de equilibrio, es decir:

$$W(t_{Esf.}) = (P_e - P_i(t_{Esf.}))V_{Gota} + \gamma_{LF}S(t_{Esf.}) = 0 \quad 3.186$$

A través de la ecuación anterior podríamos decir que, la duración  $t_{Esf.}$  viene definida principalmente por la forma inicial del volumen eyectado, y donde pese a no haberla



considerado, la disipación viscosa aumenta dicha duración siendo ésta una fuerza no conservativa dependiente de la velocidad de dicha reconfiguración. De modo que, si bien el enfoque analítico del problema resulta muy complejo pudiéndose realizarse por numéricamente, mediante experimentación se ha podido comprobar que  $t_{\text{Esf.}}$  es inferior a la duración total del trayecto parabólico (ver Figura 142 duración de la reconfiguración inferior al 10% de la duración total). Finalmente, como debido a que la tensión superficial fomenta la minimización de la superficie en el caso de encontrarnos ante gotas que debido a la elongación viscosa presenten colas de elevada longitud éstas al presentar en ellas cualquier ligera protuberancia, da origen al crecimiento de esta irregularidad hasta convertirse en una gota satélite de menor tamaño.



**Figura 142:** Imágenes de gotas eyectadas de una suspensión de nano partículas de plata (Cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 y tinta ANP) a  $42 \mu\text{s}$  donde se puede ver que las gotas tras la ruptura del flujo libre presentan colas de  $\approx 100 \mu\text{m}$  a) y a  $67 \mu\text{s}$  se puede apreciar las gotas totalmente reconfiguradas en esferas [Fuente: Elaboración propia].

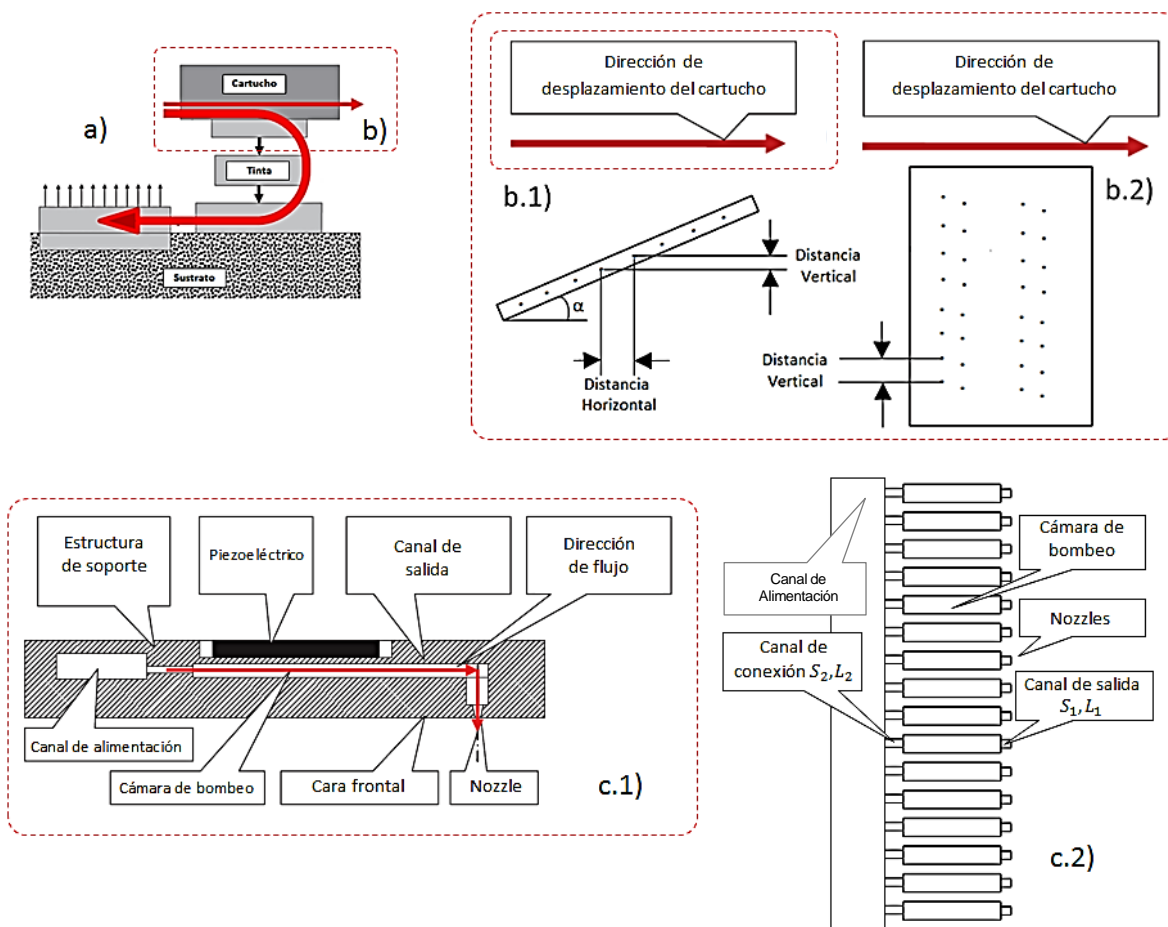
#### 2.4.2. Dinámica de un cabezal multi-nozzle de impresión DOD por piezoeléctricos

A principio del apartado 4, se establece que la razón fundamental de los sistemas de impresión es la de reproducir líneas o patrones mediante la deposición controlada de gotas sobre un sustrato. Por otro parte, la tecnología de impresión descrita en la presente tesis requiere de la formación de gotas en periodos muy reducidos y bajo demanda, lo que se traduce en velocidades de flujo elevadas (dentro del régimen de eyección), pero donde el flujo es oscilante afín de favorecer la ruptura del chorro libre en gotas. De modo que,

haciendo uso de la mecánica de fluidos y recurriendo a la acústica, se ha abordado el funcionamiento de los sistemas de impresión por chorro de tinta mediante piezoeléctricos tomando como base un sistema mono-nozzle, en donde el análisis de la fenomenología asociada a la eyección de las gotas se ha realizado mediante la modelización del mismo con un grado de libertad y basándonos en el resonador de Helmholtz.

El aumento de las sollicitaciones en la técnica, ha hecho que en la actualidad se utilicen volúmenes de gotas cada vez más pequeñas, afín de aumentar la resolución de la reproducción, siendo éstas eyectadas en periodos más cortos con el fin de reducir el tiempo de impresión. En este aspecto afín de hacer de la impresión un proceso más rápido, la técnica ha evolucionado a la utilización de múltiples nozzles alojados en el interior del cartucho o del cabezal de impresión. Por otro lado, la necesidad de reproducir líneas y patrones de distintos colores (tintas con pigmentos) ha requerido que los sistemas posean a su vez múltiples cabezales o cartuchos, y en el caso de la impresión de objetos tridimensionales estos cabezales son los encargados de proporcionar tanto el color como los distintos materiales que constituirán a la pieza a reproducir (múltiples materiales). De forma que, con el objetivo de analizar el estado actual de la técnica de impresión DOD por piezoeléctricos a continuación se abordará el funcionamiento de los cabezales de impresión o en el caso de que éstos sean sustituibles y sean solidarios al depósito de tinta: “cartuchos”, como un sistema multi-nozzle donde a diferencia de sistema anterior, ahora el sistema posee  $n$  cámaras de bombeo idénticas dispuestas en paralelo y alimentados por un único canal principal unido al depósito (Dijksman, 1999 [224]), bajo esta disposición los nozzle conforman una línea capaz de eyectar todas las gotas del mismo volumen y a la misma velocidad y todas a voluntad (no a la vez, cuando la forma a reproducir lo requiera o lo que es lo mismo, cuando la señal adaptada a la reología de la tinta accione al piezoeléctrico  $i$  de los  $n$  existentes).

A continuación se muestra de forma esquematizada un sistema de impresión DOD por piezoeléctrico multi-nozzle (ver Figura 143) constituido por una imagen conceptual del proceso, y las posibles disposiciones de los nozzle en el cabezal de impresión o del cartucho, así como también de las cámaras de bombeo y sus correspondientes canales de conexión y alimentación.



**Figura 143:** Sistema de impresión DOD por Piezoeléctricos multi-nozzles. a) Representación esquemática del proceso de impresión, b) Disposición de los nozzles en el interior del cartucho a lo largo de una línea recta (b.1) o en forma matricial (b.2). c) Vista transversal ampliada del sistema de eyección utilizado dentro del sistema DOD por piezoeléctrico (sistema Bend) (c.1), Representación esquemática del sistema Bend multi-nozzle, disposición lineal de los nozzles con bombas de inyección de tinta en paralelo basado en el resonador de Helmholtz (vista en planta)(c.2) [Fuente: Elaboración propia].

De modo que, ahora en vez de un nozzle constituido por una cámara de bombeo tenemos  $n$  de éstas en paralelo conectadas bajo un único canal de alimentación. Es importante resaltar que durante el proceso de recarga de una o varias cámaras de bombeo se producen ondas de presión que se propagan en el interior del conducto de alimentación, estas ondas de presión afectan y condicionan las demás cámaras de bombeo, estén activas o no. Considerando el caso de que  $k$  de un total de  $n$  se activen a la vez, y siguiendo la línea de pensamiento desarrollado hasta ahora, siendo todas los sistemas de bombeo iguales y utilizando un mismo fluido es posible definir que el desplazamiento de éste en los canales de salida y conexión como  $x_{1i}$  y  $x_{2i}$  respectivamente, donde  $i$  representa el nozzle activo

( $i = 1, \dots, k$ ) y siendo el desplazamiento en los nozzles no activos definidos como  $y_{1j}$  y  $y_{2j}$  donde  $j = 1, \dots, n - k$ , en cuanto al desplazamiento del fluido en el interior del conducto de alimentación este se definirá como  $x_3$ . Por otro lado, considerando al igual que en el caso mono-nozzle en el que los desplazamientos al exterior son positivos ya que son consecuencia del exceso de presión y en el caso contrario negativos, definiremos las velocidades del flujo en el nozzle y en el conducto de conexión como  $\dot{x}_{1i}$  y  $\dot{x}_{2i}$  en el caso de que el nozzle este activo, y como  $\dot{y}_{1j}$  y  $\dot{y}_{2j}$  en el caso de éste no lo esté, de igual forma la velocidad del flujo en el interior del canal de alimentación puede expresarse como  $\dot{x}_3$ .

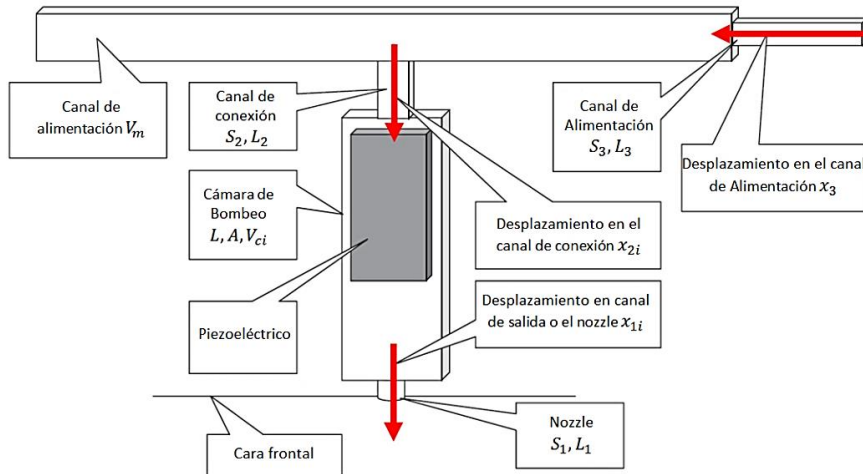
En cuanto a la deformación del piezoeléctrico al igual que en la dinámica básica de cabezal mono-nozzle definiremos al volumen desplazado en el interior de toda cámara de bombeo activa respecto a su estado inicial como  $\Delta V_0$ , mientras que la variación temporal del volumen desplazado al exterior en dicho nozzle activo lo definiremos como  $\Delta V_{ci}$  y del mismo modo  $\Delta V_{cj}$  representa la evolución del volumen en el nozzle no activo. De forma que, bajo el principio de conservación de la masa y de forma similar que en la ecuación 3. 105 para un único nozzle, es posible establecer que el incremento del volumen del conducto de alimentación  $\Delta V_m$  se expresa como:

$$\Delta V_m = S_3 x_3 - S_2 \sum_{i=1}^k x_{2i} - S_2 \sum_{j=1}^{n-k} y_{2j} \quad 3. 187$$

Donde  $S$ ,  $x(t)$  e  $y(t)$  representa la sección del conducto y el desplazamiento del fluido siendo esta una función del tiempo. Así del mismo modo para los nozzles tanto activos como desactivos podemos decir que la variación temporal de volumen en el interior de la cámara de bombeo se define de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \Delta V_{ci} &= S_2 x_{2i} - S_1 x_{1i} + \Delta V_0 & i = 1, \dots, k \\ \Delta V_{cj} &= S_2 y_{2j} - S_1 y_{1j} & j = 1, \dots, n - k \end{aligned} \quad 3. 188$$

De modo que, hemos seguido el mismo criterio termodinámico anterior donde pese a que ambas direcciones del flujo en el interior de la cámara de bombeo se consideran positivas (1,2) puesto que ambos son producto de la sobrepresión consideramos negativo al desplazamiento fuera del nozzle, ya que como principio es energía cedida al entorno (ver Figura 144).

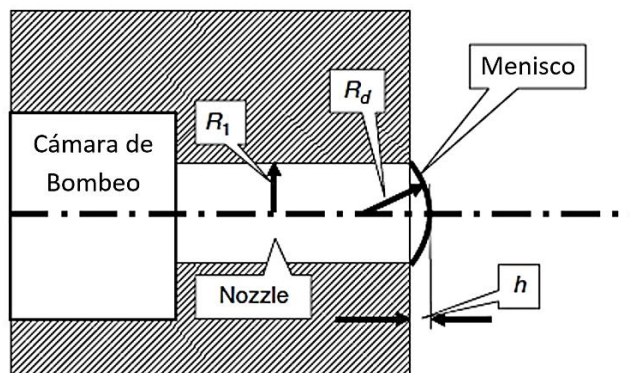


**Figura 144:** Esquema de un sistema multi-nozzle con ampliación de un nozzle activo [168].

Por otro lado, haciendo uso del módulo de compresibilidad adiabático del medio ( $K_b$ ) ecuación 3. 103, es posible relacionar las ondas de presión generadas por las variaciones de volumen, es decir:

$$p_m = \frac{\rho_0 c_m^2}{V_m} \Delta V_m, \quad p_{ci} = \frac{\rho_0 c_c^2}{V_c} \Delta V_{ci}, \quad p_{cj} = \frac{\rho_0 c_c^2}{V_c} \Delta V_{cj} \quad 3. 189$$

Nótese que la densidad del fluido por la velocidad del sonido al cuadrado en cada tramo equivale al módulo de compresibilidad en dicho tramo. Por otra parte, en un estado de equilibrio el fluido forma un menisco en la inmediaciones del nozzle debido a la tensión superficial de éste tal y como se puede apreciar en la Figura 145, de modo que cuando en el interior de la cámara de bombeo el piezoeléctrico se contrae, reduciendo el volumen de la cámara y en consecuencia al aumentar la presión del mismo, éste fluye hacia el exterior deformando el menisco que debido a la tensión superficial, el aumento de superficie se traduce en un aumento de la presión capilar que opone resistencia a dicha deformación. De igual forma cuando el flujo se rompe y la gota es eyectada el flujo al retraerse en el interior del nozzle forma un menisco cóncavo, donde la presión capilar también se opone a dicha deformación.



**Figura 145:** Detalles geométricos de la superficie del menisco, en estado de equilibrio [168].

Mediante el principio de conservación de la masa podemos decir que:

$$S_1 x_1 = \frac{1}{6} \pi h (3R_1^2 + h^2) \quad 3.190$$

Donde el radio de curvatura del domo o del menisco toma la siguiente forma:

$$R_d = \frac{R_1^2 + h^2}{2h} \quad 3.191$$

Por otro lado, haciendo uso de la ecuación de Laplace (ecuación 3. 334) donde  $\Delta P_0$  representa la diferencia de presiones a ambos lados de la interfaz en un punto donde la altura sea cero  $z = 0$ , o donde conozcamos el radio de curvatura medio ( $R_d$ ) podemos definir la presión capilar como:

$$P_{cap.} = \Delta P_0 = \frac{2\gamma_{LF}}{R_d} \cong \frac{8\gamma_{LF}}{R_1^2} x_1 \quad 3.192$$

Asumiendo que  $h \ll R_1$  y que  $h \cong 2x_1$ . Por otro lado, la expresión anterior muestra que la presión depende linealmente del desplazamiento del fluido  $x_1(t)$ . A continuación, bajo esta suposición se desarrolla una teoría basada en ésta dependencia. De modo que, estableciendo las ecuaciones de equilibrio en el nozzle, en el conducto de conexión y en el canal de alimentación, y teniendo en cuenta que presión es fuerza por unidad de superficie bajo el criterio termodinámico anterior, es posible establecer el siguiente balance de presiones:

$$\begin{aligned} \text{a.1) Nozzles (activos):} & \quad \rho_0 L_1 \ddot{x}_{1i} = \left( p_{ci} - \frac{8\gamma_{LF}}{R_1^2} x_{1i} \right) S_1 \\ \text{a.2) Nozzles (no activos):} & \quad \rho_0 L_1 \ddot{y}_{1j} = \left( p_{cj} - \frac{8\gamma_{LF}}{R_1^2} y_{1j} \right) S_1 \\ \text{b.1) C. conexión (Nozzles activos):} & \quad \rho_0 L_2 \ddot{x}_{2i} = (p_m - p_{ci}) S_2 \\ \text{b.2) C. conexión (Nozzles no activos):} & \quad \rho_0 L_2 \ddot{y}_{2j} = (p_m - p_{cj}) S_2 \\ \text{c.1) C. Alimentación:} & \quad \rho_0 L_3 \ddot{x}_3 = -p_m S_3 \end{aligned} \quad 3.193$$

De modo que mediante la combinación de las ecuaciones 3. 187, 3. 188, 3. 189 y 3. 193, con las cuales se satisface el principio de la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, podemos establecer 5 ecuaciones fundamentales con las cuales abordar la dinámica de un sistema de impresión multi-nozzle DOD por piezoeléctricos, es decir:

$$\ddot{x}_{1i} + \left( \frac{c_c^2 S_1}{V_c L_1} + 8 \frac{\gamma_{LF}}{\rho_0 R_1^2 L_1} \right) x_{1i} - \frac{c_c^2 S_2}{V_c L_1} x_{2i} = \frac{c_c^2}{V_c L_1} \Delta V_0 \quad 3.194$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{1j} + \left( \frac{c_c^2 S_1}{V_c L_1} + 8 \frac{\gamma_{LF}}{\rho_0 R_1^2 L_1} \right) y_{1j} - \frac{c_c^2 S_2}{V_c L_1} y_{2j} &= 0 \\ \ddot{x}_{2i} + \frac{c_c^2 S_2}{V_c L_2} x_{2i} + \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_2} \sum_{i=1}^k x_{2i} + \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_2} \sum_{j=1}^{n-k} y_{2j} - \frac{c_c^2 S_1}{V_c L_2} x_{1i} - \frac{c_m^2 S_3}{V_m L_2} x_3 &= -\frac{c_c^2}{V_c L_2} \Delta V_0 \\ \ddot{y}_{2j} + \frac{c_c^2 S_2}{V_c L_2} y_{2j} + \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_2} \sum_{i=1}^k x_{2i} + \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_2} \sum_{j=1}^{n-k} y_{2j} - \frac{c_c^2 S_1}{V_c L_2} y_{1j} - \frac{c_m^2 S_3}{V_m L_2} x_3 &= 0 \\ \ddot{x}_3 + \frac{c_m^2 S_3}{V_m L_3} x_3 - \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_3} \sum_{i=1}^k x_{2i} - \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_3} \sum_{j=1}^{n-k} y_{2j} &= 0 \end{aligned}$$

Por otro lado, puesto que todas las bombas son iguales tanto las activas como las que no, y éstas se recargan de la misma forma introduciendo las mismas ondas de presión al canal de alimentación, bajo este principio podemos obviar el uso de los subíndices  $i, j$  y en vez de  $n$  grupos de ecuaciones distintas (una para cada nozzle) es posible reducir el sistema a:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + \left( \frac{c_c^2 S_1}{V_c L_1} + \frac{8\pi\gamma_{LF}}{\rho_0 S_1 L_1} \right) x_1 - \frac{c_c^2 S_2}{V_c L_1} x_2 &= \frac{c_c^2}{V_c L_1} \Delta V_0 \\ \ddot{y}_1 + \left( \frac{c_c^2 S_1}{V_c L_1} + \frac{8\pi\gamma_{LF}}{\rho_0 S_1 L_1} \right) y_1 - \frac{c_c^2 S_2}{V_c L_1} y_2 &= 0 \\ \ddot{x}_2 + \left( \frac{c_c^2 S_2}{V_c L_2} + k \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_2} \right) x_2 + (n-k) \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_2} y_2 - \frac{c_c^2 S_1}{V_c L_2} x_1 - \frac{c_m^2 S_3}{V_m L_2} x_3 &= -\frac{c_c^2}{V_c L_2} \Delta V_0 \quad 3.195 \\ \ddot{y}_2 + \left( \frac{c_c^2 S_2}{V_c L_2} + (n-k) \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_2} \right) y_2 + k \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_2} x_2 - \frac{c_c^2 S_1}{V_c L_2} y_1 - \frac{c_m^2 S_3}{V_m L_2} x_3 &= 0 \\ \ddot{x}_3 + \frac{c_m^2 S_3}{V_m L_3} x_3 - k \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_3} x_2 - (n-k) \frac{c_m^2 S_2}{V_m L_3} y_2 &= 0 \end{aligned}$$

Afín de solucionar este sistema pentadimensional (cinco grados de libertad) de ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden no homogéneas, al igual que en el caso mono-nozzle puesto que la modificación del volumen de la cámara de bombeo se realiza de forma gradual (dependiente del tiempo) es necesario definir previamente dicha excitación (3. 196), para posteriormente poder analizar la respuesta del sistema a una excitación trapezoidal constituida por uno sumatorio de funciones rampa de duración  $t_p$  (ver Figura 134).

$$\Delta V_0 = \Delta V_{max} \frac{t}{t_{p1}} \quad 3.196$$

Nótese que las ecuaciones 1 y 3 del sistema 3. 195 se ven afectados por dicha función rampa definida anteriormente. Por otra parte, convirtiendo el sistema anterior a un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden lineal no homogéneo ahora de diez

dimensiones del tipo  $[\dot{x}] = [A][x] + [B(t)]$  por medio del método de variación de las constantes, en notación matricial adopta la solución toma la siguiente forma:

$$[x_G] = ([\Phi(t)] \cdot [C]) + \left( [\Phi(t)] \int_t [\Phi(t)]^{-1} [B(t)] dt \right) \quad 3. 197$$

Donde  $[x_G]$  representa el vector columna de soluciones generales del sistema y  $[\Phi(t)]$  su matriz fundamental, así como  $[C]$  la matriz de constantes, de modo que los valores propios de la matriz  $[A]$  ( $\lambda_j$   $j = 1, \dots, 10$ ) del sistema son complejos conjugados cuya parte imaginaria definen las diferentes frecuencias de resonancia del sistema, 5 en este caso, uno por tramo. Por otra parte, tomando el sistema anterior sin modificarlo, es decir, del tipo  $[\dot{x}] = [M][x] + [B(t)]$ , vemos que los valores propios de la matriz  $[M]$  son ahora reales negativos ( $\lambda_j$   $j = 1, \dots, 5$ ) de modo que las frecuencias de resonancia del sistema vuelven a ser cinco iguales al método anterior pero de esta segunda forma pueden ser expresados como:

$$\omega_j = \sqrt{-\lambda_j} \quad 3. 198$$

Mediante esta segunda forma de abordar el sistema de ecuaciones anterior vemos que los vectores propios de la matriz  $[M]$  pertenecen también a los reales siendo estos pentadimensionales. De modo que, siendo la solución general de cada variable de sistema 3. 195 constituido por la suma de la parte homogénea más la particular, ésta llamémosle  $[Z]$  toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned} [Z] &= -[M]^{-1}[B] \\ x_1 &= y_1 = y_2 = 0 \\ x_2 &= -\frac{\Delta V_0}{S_2} \frac{t}{t_{p1}} \\ x_3 &= -k \frac{\Delta V_0}{S_3} \frac{t}{t_{p1}} \end{aligned} \quad 3. 199$$

Desde el punto de vista geométrico la solución particular anterior representa que las todas la cámaras de bombeo activas empujan el fluido al interior del conducto de alimentación a través sus  $k$  conductos de conexión y el canal de alimentación a su vez envía el fluido hacia el deposito aguas arriba de éste.

Se ha de aclarar que el sistema anterior satisface el principio de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento pero no satisface el principio de conservación de la energía puesto que en el sistema anterior la viscosidad no tiene protagonismo o lo que es lo mismo, en el sistema 3. 195 del tipo  $[\ddot{x}] = [M][x] + [B(t)]$ , podemos apreciar que no existe término asociado a la velocidad o primera derivada de la variable  $x$ . De modo que, cuando el fluido se pone en movimiento tras la excitación del piezoeléctrico, no se tiene en cuenta las



pérdidas de carga por rozamiento pared-fluido en los diferentes tramos, los cuales disipan la energía cinética del fluido atenuando la amplitud de las oscilaciones, es decir, atenuando las ondas de presión. Por tanto, para poder modelizar la dinámica del fluido en el interior del cabezal Inkjet es necesario abordar el problema teniendo en cuenta dicho fenómeno, cosa que se expone más adelante.

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente el sistema 3. 195 posee cinco dimensiones una para cada tramo  $i$ , de manera que posee cinco valores propios ( $\lambda_j$ ) de los cuales sabemos que el sistema posee cinco frecuencias de resonancia ( $\omega_j$ ) o lo que es lo mismo la dinámica del fluido se lleva a cabo de  $j$  modos distintos y a su vez el sistema posee cinco vectores propios asociados a cada valor propios y estos son pentadimensionales ( $\xi_{ij}$ ). De forma que:  $i = 1, \dots, 5$  y  $j = 1, \dots, 5$ , dicho esto  $x_1$  representa la función que describe la posición del fluido en el interior del tramo 1 (conducto de salida) para los nozzles activos, así como  $x_2$  para el tramo 2 (conducto de conexión),  $x_3$  la posición del fluido en el tramos 3 o canal de alimentación y en el caso de los nozzles desactivos  $y_1, y_2$  la posición del fluido en el interior de los conductos de salida y conexión respectivamente (tramos 1 y 2 que renombraremos ahora como 4 y 5) y estos desplazamientos a su vez se llevan a cabo de  $j$  modos distintos. De modo que, la solución del sistema de ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden no homogéneas anterior toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \sum_{j=1}^5 D_j \xi_{1j} \text{sen}(\omega_j t) & , \quad \dot{x}_1 &= \sum_{j=1}^5 D_j \xi_{1j} \omega_j \text{cos}(\omega_j t) \\
 y_1 &= \sum_{j=1}^5 D_j \xi_{4j} \text{sen}(\omega_j t) & , \quad \dot{y}_1 &= \sum_{j=1}^5 D_j \xi_{4j} \omega_j \text{cos}(\omega_j t) \\
 x_2 &= \sum_{j=1}^5 D_j \xi_{2j} \text{sen}(\omega_j t) - \frac{\Delta V_0}{S_2} \frac{t}{t_{p1}} & , \quad \dot{x}_2 &= \sum_{j=1}^5 D_j \xi_{2j} \omega_j \text{cos}(\omega_j t) - \frac{\Delta V_0}{S_2 t_{p1}} \\
 y_2 &= \sum_{j=1}^5 D_j \xi_{5j} \text{sen}(\omega_j t) & , \quad \dot{y}_2 &= \sum_{j=1}^5 D_j \xi_{5j} \omega_j \text{cos}(\omega_j t) \\
 x_3 &= \sum_{j=1}^5 D_j \xi_{3j} \text{sen}(\omega_j t) - k \frac{\Delta V_0}{S_3} \frac{t}{t_{p1}} & , \quad \dot{x}_3 &= \sum_{j=1}^5 D_j \xi_{3j} \omega_j \text{cos}(\omega_j t) - k \frac{\Delta V_0}{S_3 t_{p1}}
 \end{aligned} \tag{3. 200}$$

Nótese de las soluciones del sistema 3. 200 que: Primero, podemos apreciar cinco soluciones anteriores si consideramos solo los términos de la izquierda una para cada tramo, o diez si consideramos también sus correspondientes derivadas. Segundo,  $\xi_{ij}$  como se ha comentado hace referencia al vector propio asociado a cada tramo  $i$  y modo  $j$ , y  $\omega_j$  representa la frecuencia de resonancia por modo. Tercero, siendo éstas las soluciones

generales del sistema, en cada solución se puede observar la presencia de las soluciones particulares  $[Z]$  y su correspondiente  $[\dot{Z}]$  sumadas a las soluciones homogéneas del mismo, que como se ha comentado anteriormente no satisfacen el principio de conservación de la energía. Por último, dado que las condiciones iniciales del sistema son: a  $t = 0$  tanto la posición como la velocidad del fluido en el interior de cada tramo  $i$  es cero, la constante  $D_j$  término que hace alusión a la atenuación de las ondas puede ser obtenido mediante las velocidades  $[\dot{x}] = 0$ .

De modo que, una vez conocido el término asociado a la atenuación de la onda por modo en las condiciones iniciales  $D_j(t = 0)$ , la estimación del amortiguamiento del sistema como una función dependiente del tiempo y del modo  $j$ , en esta modelización es alcanzada teniendo en cuenta el decrecimiento de la energía cinética del fluido en el sistema a causa de la disipación viscosa [225]. Este método es aplicable siempre que el sistema requiera algunas oscilaciones para alcanzar el equilibrio.

Por otro parte, puesto que como hemos podido apreciar en la modelización de la dinámica del fluido en un sistema Inkjet mono-nozzle, la energía cinética total generada por la deformación del piezoeléctrico siendo esta consecuencia de una señal eléctrica externa constituida por funciones rampa, desde el punto de vista de su respuesta, siendo esta negativa, puede ser calculada a intervalos dentro de un dominio temporal. Así conocido la velocidad del fluido por los distintos conductos  $i$  (tramo de salida, conexión y alimentación) es posible calcular las pérdidas de carga por rozamiento pared-fluido fruto de la viscosidad propia de la tinta y la rugosidad del interior de los tramos aunque éste solo toma protagonismo en regímenes turbulentos, luego el régimen en el que trabaje el fluido también tomará protagonismo. Así conocida las velocidades del fluido en los distintos tramos  $i$  es posible conocer la energía cinética del mismo en todo momento, de modo que teniendo en cuenta que  $E_c = 1/2 mv^2$ , en un sistema multi-nozzle dicha energía cinética se define como:

$$E_c = k \left( \frac{1}{2} \rho_0 S_1 L_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} \rho_0 S_2 L_2 \dot{x}_2^2 \right) + \frac{1}{2} \rho_0 S_3 L_3 \dot{x}_3^2 + (n - k) \left( \frac{1}{2} \rho_0 S_1 L_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} \rho_0 S_2 L_2 \dot{y}_2^2 \right) \quad 3. 201$$

De forma que, conocidas las velocidades por tramo  $\dot{x}_i$  siendo estas dependientes de las distintas frecuencias de resonancia y siendo éstas independientes entre sí, podemos estudiar la amplitud de la energía cinética para cada modo ( $j$ ) sustituyendo las velocidades (3. 200) en la expresión anterior, de forma que:

$$E_{c,j} = \frac{1}{2} \rho_0 \omega_j^2 D_j^2 [k(S_1 L_1 \xi_{1j}^2 + S_2 L_2 \xi_{2j}^2) + S_3 L_3 \xi_{3j}^2 + (n - k)(S_1 L_1 \xi_{4j}^2 + S_2 L_2 \xi_{5j}^2)] \quad 3. 202$$

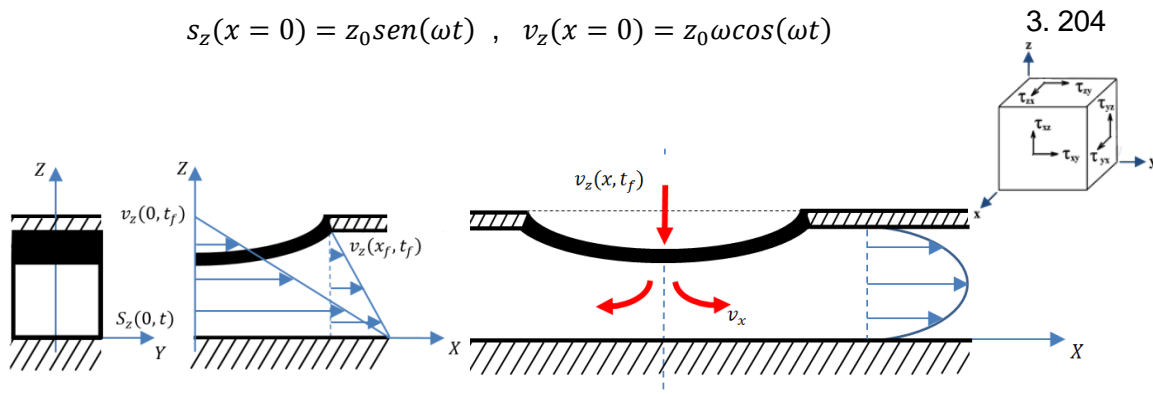
Por otro lado, teniendo en cuenta que potencia es fuerza por velocidad podemos decir que la energía disipada en el sistema durante el intervalo  $\Delta t$  a causa de la fricción viscosa al moverse el fluido armónicamente puede definirse como:

$$E_{diss} = \int_0^{\Delta t} [k(F_1 \dot{x}_1 + F_2 \dot{x}_2) + F_3 \dot{x}_3 + (n - k)(F_4 \dot{y}_1 + F_5 \dot{y}_2)] dt \quad 3. 203$$

Donde  $F_i$  representan las fuerzas de fricción debido a la viscosidad del fluido en cada tramo  $i$ . Por otra parte, a partir de este punto se ha de hacer una diferenciación entre el comportamiento del sistema a alta y baja frecuencia ( $\omega_j$ ), puesto que el fluido se desplaza a diferentes velocidades y por tanto trabaja en regímenes diferentes (régimen turbulento o laminar) y en consecuencia las pérdidas por viscosidad son distintas.

Para el cálculo de la potencia disipada por viscosidad a altas frecuencias abordaremos el problema de una forma simplificada. Centrándonos en la inmediaciones del piezoeléctrico (cámara de bombeo) y considerando que el fluido ocupa un espacio infinito donde  $x > 0$  con respecto a un eje de coordenadas rectangular ( $0XYZ$ ) y donde fruto de la deformación de éste genera la propagación de una onda plana, es decir un movimiento armónico del plano  $X = 0$  (ver Figura 46), de modo que si consideramos el movimiento del piezoeléctrico como:

$$s_z(x = 0) = z_0 \text{sen}(\omega t) \quad , \quad v_z(x = 0) = z_0 \omega \text{cos}(\omega t)$$



**Figura 146:** Deformación del piezoeléctrico y pérdidas viscosas por rozamiento pared-fluido en régimen laminar [Fuente: Elaboración propia].

En la imagen anterior podemos apreciar que la velocidad del piezoeléctrico es función de la posición y del tiempo, es decir:  $v_z = v_z(x, t)$  de modo que teniendo en cuenta el principio de la conservación de la cantidad de movimiento, podemos afirmar que en el equilibrio (primera ley de Newton), la cantidad de movimiento aportado por el piezoeléctrico al fluido, equivale a la cantidad de movimiento perdido por el rozamiento pared-fluido a consecuencia de la viscosidad del mismo, y del mismo modo teniendo en cuenta que el esfuerzo cortante consecuencia de dicho rozamiento en oposición al movimiento es:  $\tau_{xz} = \mu \frac{dv_x}{dz}$  y este a su vez es equivalente su correspondiente simétrico  $\tau_{zx}$ , tenemos:

$$\rho_0 \frac{\partial v_z}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} \quad 3. 205$$

Por otro lado, el desplazamiento de una onda plana se describe como:  $x(x, t) = ae^{i(kx - \omega t)}$  de modo que afín de satisfacer la condición  $v_z(0, t)$  y la condición inicial  $v_z(0, 0) = 0$  se

propone la siguiente solución a la ecuación en diferencias parciales anterior tomada de [226]:

$$v_z = z_0 \omega e^{-Kx} \cos(\omega t - Kx) , \quad K = \sqrt{\frac{\rho_0 \omega}{2\mu}} \quad 3.206$$

Por otra parte, para los modos de baja frecuencia se puede suponer con seguridad que la ecuación de Poiseuille es válida (el fluido se desplaza en régimen laminar) mostrando en este caso un perfil de velocidad como el de la Figura 146. De modo que, en el caso en el que nos encontramos, a altas frecuencias y siguiendo la definición del esfuerzo cortante, la tensión de cizallamiento ejercida por el entorno al desplazamiento del fluido o plano  $X = 0$  se define en función de la frecuencia ( $\omega_j$ ) suponiendo que estas son elevadas como:

$$\tau_{zx} = \mu \frac{\partial v_z}{\partial x} = \mu z_0 \omega K [-\cos(\omega t) + \text{sen}(\omega t)] \quad 3.207$$

Del mismo modo, teniendo en cuenta que la energía disipada puede definirse como la potencia disipada evaluada en un intervalo temporal y pudiendo ser está definida a su vez como fuerza por velocidad, la energía cedida por el sistema a causa de la fricción viscosa al moverse el fluido armónicamente se establece como:

$$\begin{aligned} E_{diss} &= \int F_z \dot{s}_z dt = \int (\tau_{zx} S_x) \frac{ds}{dt} dt = \int \left( \mu \frac{dv_z}{dx} (2\pi RL) \right) v_z(x=0) dt \\ &= 2\pi RL \mu K \omega z_0^2 \int_0^{\omega t} (\cos(\omega t) - \text{sen}(\omega t)) \cos(\omega t) d\omega t \\ &= O L \mu K \omega z_0^2 \int_0^{\omega t} (\cos(\omega t) - \text{sen}(\omega t)) \cos(\omega t) d\omega t \end{aligned} \quad 3.208$$

Donde  $O$  representa el perímetro del conducto considerado, de modo que para un sistema de respuesta positiva mono-nozzle, donde la velocidad de salida del flujo alcanza su máximo a  $t_{p1}$ , en nuestro caso como la respuesta del sistema es negativa y este es multi-nozzle dicha velocidad máxima de salida en el nozzle activo se alcanza a  $t_p$ , pero desde el punto de vista de la deformación del piezoeléctrico y considerando éste como sinusoidal la velocidad máxima de succión se alcanza con la máxima deformación del mismo a medio periodo o lo que es lo mismo a  $t = \pi/\omega$  de modo que la energía disipada en dicho intervalo temporal  $\Delta t$  toma la siguiente forma:

$$E_{diss} = -\frac{\pi}{2} O L \mu K \omega z_0^2 \quad 3.209$$

Sustituyendo  $z_0$  por las amplitudes del movimiento del fluido en cada tramo y sumándolos entre si obtendríamos la energía total disipada por la viscosidad a altas frecuencias en dicho intervalo temporal y debido a que los cinco modos son linealmente independientes entre sí, es posible calcular ésta por cada modo de alta frecuencia, es decir:

$$E_{diss,j} = -\frac{\pi}{2} \mu K \omega_j [k(O_1 L_1 \xi_{1j}^2 + O_2 L_2 \xi_{2j}^2) + O_3 L_3 \xi_{3j}^2 + (n-k)(O_1 L_1 \xi_{4j}^2 + O_2 L_2 \xi_{5j}^2)] D_j^2 \quad 3.210$$

Del mismo modo en al cálculo de la energía disipada en las frecuencias bajas, siguiendo la ley de Poiseuille donde las fuerzas viscosas por tramo pueden expresarse como:

$$\begin{aligned} F_1 &= 8\pi\mu L_1 \dot{x}_1, \quad F_2 = 8\pi\mu L_2 \dot{x}_2, \quad F_3 = 8\pi\mu L_3 \dot{x}_3 \\ F_4 &= 8\pi\mu L_1 \dot{y}_1, \quad F_5 = 8\pi\mu L_2 \dot{y}_2 \end{aligned} \quad 3.211$$

Al igual que en el caso anterior en un tiempo correspondiente a medio periodo, es decir:  $\Delta t = \pi/\omega_j$  se tiene que:

$$\begin{aligned} E_{diss,j} &= \int_0^{\Delta t} \sum_{i=1}^5 F_{ij} v_{ij} dt \\ E_{diss,i,j} &= \int_0^{\Delta t} 8\pi\mu L_i \left( D_j \xi_{ij} \omega_j \cos(\omega_j t) \right)^2 dt \end{aligned} \quad 3.212$$

$$E_{diss,j} = -4\pi^2 \mu \omega_j \left[ k \left( L_1 \xi_{1j}^2 + L_2 \xi_{2j}^2 \right) + L_3 \xi_{3j}^2 + (n-k) \left( L_1 \xi_{4j}^2 + L_2 \xi_{5j}^2 \right) \right] D_j^2$$

De forma que, ahora es posible abordar el cálculo de la amortiguación del sistema teniendo en cuenta que la reducción de la amplitud de la energía cinética siendo ésta mayor que cero siempre que el fluido esté en movimiento, es consecuencia de la energía disipada en dicho intervalo temporal cuando la deformación alcanza su máximo, es decir:

$$E_{diss,j} = \int_0^{\Delta t} \left( \frac{dE_c}{dt} \right) dt \quad 3.213$$

Haciendo uso de la expresión anterior es posible establecer por modo que:

$$\begin{aligned} \frac{dD_j}{dt} &= \frac{-4\pi\mu}{\rho_0} \left[ \frac{k(L_1 \xi_{1j}^2 + L_2 \xi_{2j}^2) + L_3 \xi_{3j}^2 + (n-k)(L_1 \xi_{4j}^2 + L_2 \xi_{5j}^2)}{k(S_1 L_1 \xi_{1j}^2 + S_2 L_2 \xi_{2j}^2) + S_3 L_3 \xi_{3j}^2 + (n-k)(S_1 L_1 \xi_{4j}^2 + S_2 L_2 \xi_{5j}^2)} \right] D_j \\ D_j(t) &= D_j(t=0) e^{-\xi_j \omega_j t} \quad j = \text{modos de baja frecuencia} \end{aligned} \quad 3.214$$

Del mismo modo, para el caso de alta frecuencia para cada modo j se tiene que:

$$\begin{aligned} \frac{dD_j}{dt} &= \frac{-\mu \sqrt{\rho_0 \omega_j}}{2\rho_0} \left[ \frac{k(O_1 L_1 \xi_{1j}^2 + O_2 L_2 \xi_{2j}^2) + O_3 L_3 \xi_{3j}^2 + (n-k)(O_1 L_1 \xi_{4j}^2 + O_2 L_2 \xi_{5j}^2)}{k(S_1 L_1 \xi_{1j}^2 + S_2 L_2 \xi_{2j}^2) + S_3 L_3 \xi_{3j}^2 + (n-k)(S_1 L_1 \xi_{4j}^2 + S_2 L_2 \xi_{5j}^2)} \right] D_j \\ D_j(t) &= D_j(t=0) e^{-\xi_j \omega_j t} \quad j = \text{modos de alta frecuencia} \end{aligned} \quad 3.215$$

De manera que de las ecuaciones anteriores se puede concluir que, tanto para modos de frecuencias elevadas como de bajas frecuencias se cumple que si  $\Delta E_c < 1$  es porque existen pérdidas energéticas en el sistema, en nuestro caso desde un punto de vista hidráulico y de manera global, dichas pérdidas en el sistema son consecuencia de la viscosidad viéndose reflejado en la amortiguación de las ondas de presión, cumpliéndose así el principio de conservación de la energía.

Así pues, se han alcanzado expresiones que definen las velocidades y desplazamientos del fluido en función del tiempo para todo tramo i de cada nozzle (n), siendo estos dependientes del número de bombas de activas (k), y teniendo en cuenta los j modos en los que se lleva a cabo dicha respuesta del sistema a una deformación gradual del

piezoeléctrico o una excitación de tipo rampa. Por otra parte, teniendo en cuenta que los sistemas de impresión DOD por piezoeléctricos funcionan mediante trenes de pulsos constituidos por la suma de funciones rampa (ver Figura 134) dirigidos a cada nozzle de forma independiente y cuya periodicidad está condicionada por el patrón a reproducir y la velocidad de desplazamiento del carro (ver Figura 139), la respuesta dinámica de un sistema de impresión multi-nozzle en un dominio temporal puede ser modelizada siguiendo la metodología del apartado 4.1.1.

De manera que, mediante la modelización anterior basada en la mecánica de fluidos y en la acústica es posible controlar dicho sistema de impresión multi-nozzle DOD por piezoeléctrico del tipo bend basado en el resonador de Helmholtz. Funcionamiento a su vez condicionado a los fenómenos de ruptura del chorro libre (formación de las gotas), a la amortiguación de las ondas acústicas en su interior y a la recarga de la cámara de bombeo tras cada eyección, siendo éstos parámetros condicionantes función del comportamiento reológico de los materiales eyectados a depositar sobre el sustrato.

Por otra parte, a continuación, se analiza la respuesta dinámica de un sistema de impresión multi-nozzle basado en el resonador de Helmholtz, cuyos piezoeléctricos ante un estímulo exterior se contraen generando una concavidad que aumenta el volumen de la cámara de bombeo (sistemas de respuesta negativa). Así con unas dimensiones particulares y una tinta de baja viscosidad. Dicho sistema responde a una excitación trapezoidal de la siguiente forma:

#### Datos del sistema ideal múltiple-nozzle DOD basado en el resonador de Helmholtz:

Particularidades del sistema:	Tramo 1 (Conducto de salida):	Tramo 2 (Conducto de conexión):	Tramo 3 (Conducto de alimentación):	Fluido:	Excitación:
$V_c = 3,6 \cdot 10^{-10} m^3$	$R_1 = 25 \cdot 10^{-6} m$	$R_2 = 3,088 \cdot 10^{-5} m$	$R_3 = 4,997 \cdot 10^{-4} m$	$\rho_0 = 1.000 kg/m^3$	$t_{p1} = 20 \cdot 10^{-6} s$
$V_m = 3 \cdot 10^{-9} m^3$	$O_1 = 150,1 \cdot 10^{-6} m$	$O_2 = 194 \cdot 10^{-6} m$	$O_3 = 3,14 \cdot 10^{-3} m$	$\mu = 2,4 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$	$t_{p2} = 148 \cdot 10^{-6} s$
$\Delta V_0 = 3,6 \cdot 10^{-14} m^3$	$L_1 = 50 \cdot 10^{-6} m$	$L_2 = 5 \cdot 10^{-4} m$	$L_3 = 4 \cdot 10^{-3} m$	$C_c = 1.000 m/s$	$t_p = 150 \cdot 10^{-6} s$
$n = 24$	$S_1 = 1,963 \cdot 10^{-9} m^2$	$S_2 = 3 \cdot 10^{-9} m^2$	$S_3 = 7,778 \cdot 10^{-7} m^2$	$C_m = 100 m/s$	$t_f = 500 \cdot 10^{-6} s$
$K = 1$				$C_m^* = 1.200 m/s$	

**Figura 147:** Datos del sistema multi-nozzle con excitación trapezoidal [226].

Se ha de resaltar que en esta modelización como las magnitudes de las ondas de presión generadas dependen de la compresibilidad del fluido y de la rigidez de las paredes que lo contienen, la velocidad de propagación de las ondas sonicas no se llevan a cabo a la velocidad isentropica del sonido sino por debajo de ésta, así debido a que dicha rigidez varía en las distintas zonas se ha establecido diferentes velocidades del sonido entre la cámara de bombeo y el conducto de alimentación, siendo este último un parámetro abierto sujeto a diseño.

**Respuesta dinámica del sistema de impresión multi-nozzle anterior:****Con un único nozzle activo de 24:**

Modos	Frecuencia de resonancia por modo (Hz)	Vectores propios por tramo y modo				
		$(\xi_{1j})$	$(\xi_{2j})$	$(\xi_{3j})$	$(\xi_{4j})$	$(\xi_{5j})$
1	3.436	1,00E+00	7,28E-01	2,40E-01	1,00E+00	7,28E-01
2	6.282	1,00E+00	7,22E-01	3,79E-17	-4,35E-02	-3,14E-02
3	7.407	1,00E+00	7,18E-01	-2,84E-02	1,00E+00	7,18E-01
4	58.902	1,00E+00	-9,07E-02	-3,99E-18	-4,35E-02	3,94E-03
5	58.913	1,00E+00	-9,10E-02	4,00E-05	1,00E+00	-9,10E-02

**Con 12 nozzles activos de 24:**

Modos	Frecuencia de resonancia por modo (Hz)	Vectores propios por tramo y modo				
		$(\xi_{1j})$	$(\xi_{2j})$	$(\xi_{3j})$	$(\xi_{4j})$	$(\xi_{5j})$
1	3.436	1,00E+00	7,28E-01	2,40E-01	1,00E+00	7,28E-01
2	6.282	1,00E+00	7,22E-01	3,56E-16	-1,00E+00	-7,22E-01
3	7.407	-1,00E+00	-7,18E-01	2,84E-02	1,00E+00	-7,18E-01
4	58.902	1,00E+00	-9,07E-02	1,37E-17	-1,00E+00	9,07E-02
5	58.913	-1,00E+00	9,10E-02	-4,00E-05	-1,00E+00	9,10E-02

**Con 23 nozzles activos de 24:**

Modos	Frecuencia de resonancia por modo (Hz)	Vectores propios por tramo y modo				
		$(\xi_{1j})$	$(\xi_{2j})$	$(\xi_{3j})$	$(\xi_{4j})$	$(\xi_{5j})$
1	3.436	1,00E+00	7,28E-01	2,40E-01	1,00E+00	7,28E-01
2	6.282	4,35E-02	3,14E-02	1,13E-15	-1,00E+00	-7,22E-01
3	7.407	-1,00E+00	-7,18E-01	2,84E-02	-1,00E+00	-7,18E-01
4	58.902	4,35E-02	-3,94E-03	-2,68E-17	-1,00E+00	9,07E-02
5	58.913	-1,00E+00	9,10E-02	-4,00E-05	-1,00E+00	9,10E-02

**Figura 148:** Frecuencias de resonancia y vectores propios del sistema considerando distintos números de nozzles activos al mismo tiempo y la velocidad del sonido en el conducto de alimentación como  $C_m = 100 \text{ m/s}$  [Fuente: Elaboración propia].

De las tablas anteriores cabe mencionar que existen cinco modos propios de resonancia así como cinco vectores propios siendo estos vectores pentadimensionales a su vez  $(\xi_{ij})$ . Cada modo propio representa un patrón de movimiento, en el primer modo de resonancia tanto en las bombas activas como en las no activas el movimiento oscilatorio del fluido en el conducto de salida se lleva a cabo en oposición al fenómeno de capilaridad, es decir, en oposición a la tensión superficial en los distintos nozzles. El segundo modo también hace alusión a los fenómenos de capilaridad pero en este caso en sentido contrario puesto que en la activación de las cámaras de bombeo parte del fluido se desplaza a través de los canales de conexión y alimentación a otras cámaras de bombeo no activas (no existe o se desprecia la inducción de movimiento en el canal de conexión al depósito de tinta). El tercer modo o la tercera frecuencia es la frecuencia de Helmholtz del canal de alimentación, unido al canal de conexión al depósito y conectado a todos los conductos de alimentación y éstos a las bombas esten activas o no, el fluido se desplaza en oposición al flujo proveniente del depósito de tinta, en dicho choque la compresibilidad del fluido toma un papel prioritario en dicho canal, aunque si bien el fluido es incompresible las paredes del conducto que lo contiene no, ofreciendo cierta flexibilidad. La cuarta frecuencia de resonancia es la frecuencia de Helmholtz de la cámara de bombeo donde el movimiento del fluido consecuencia de las bombas activas se ven enfrentado a las deformaciones en las cámaras de bombeo de las bombas no activas. El quinto y último modo es también la

frecuencia de resonancia de la cámara de bombeo pero donde debido a la diferente rigidez existente entre la cámara de bombeo y el canal de alimentación la frecuencia de resonancia se ve notablemente incrementada.

Condiserando la influencia de la rigidez de los distintos tramos, en concreto el de la cámara de bombeo y el canal de alimentación, se ha considerado oportuno analizar dos caso:

a) Fijado la rigidez de la cámara de bombeo como constante y siendo común en ambos casos, en primer lugar se ha considerado a la rigidez del canal de alimentación como baja, y por tanto como ya se ha comentado, la velocidad de propagación de las ondas de presión en dicho conducto se verá afectado por la compresibilidad del medio y siendo el fluido el mismo más no la del conducto, la velocidad del sonido en dicho tramo es  $C_m = 100 \text{ m/s}$  (Caso anterior, Figura 148).

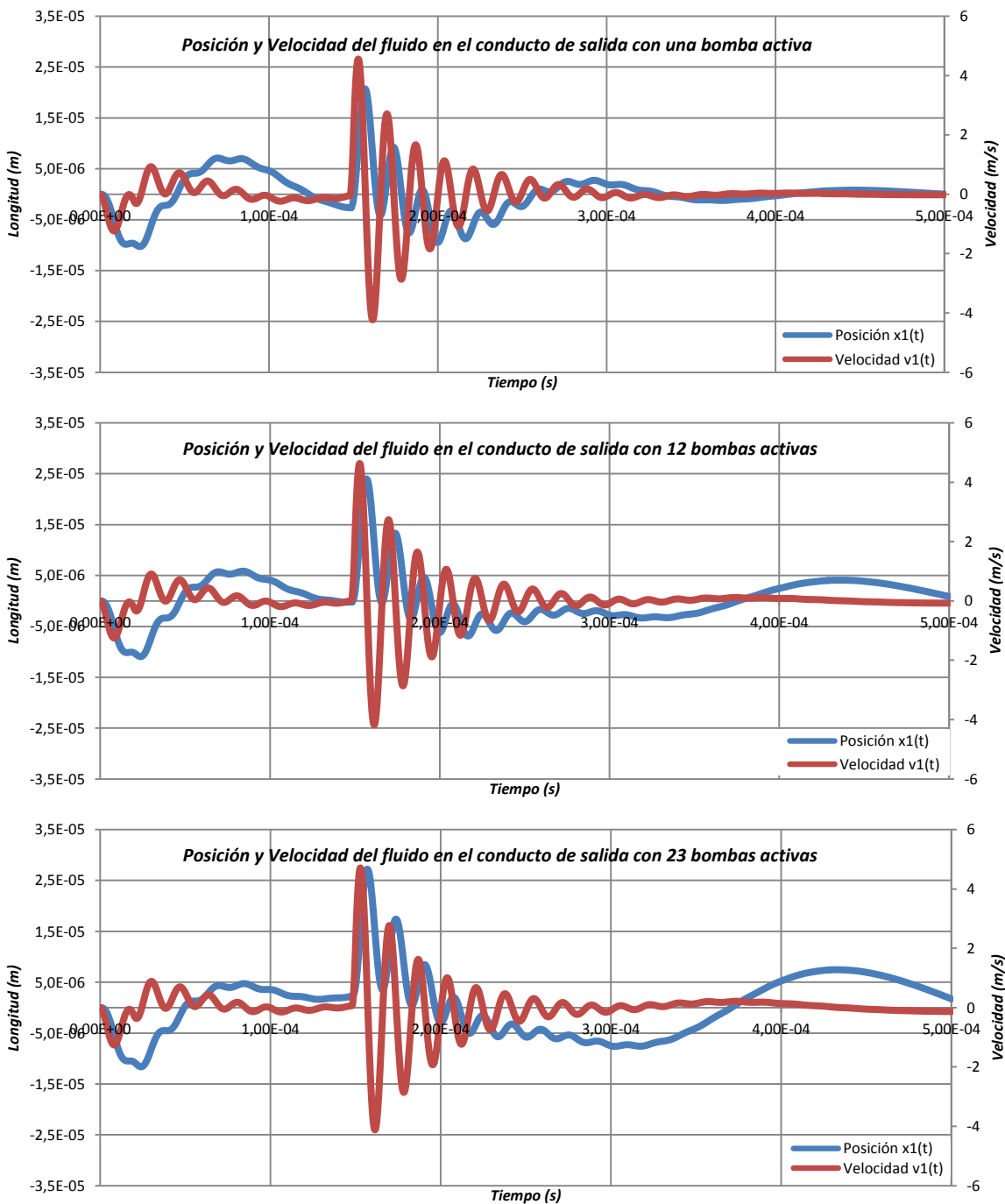
Bajo estas condiciones se aprecia que, con una bomba activada en el comportamiento del sistema viene determinado principalmente por los fenomenos capilares (modos primero y segundo) mientras que a medida que el número de bombas activas aumenta cobra mayor relevancia los fenomenos asociados a las distintas rigideces de los conductos y por tanto a la propagación de las ondas sónicas, así como también los fenomenos asociados al rozamiento viscoso, en el caso donde casi todas las bombas estan activas son los modos tercero y quinto los que combran mayor relevancia en el comportamiento del sistema.

b) En el segundo caso de estudio, se ha considerado al canal de alimentación como rígido y por tanto, la velocidad del sonido en dicho conducto se ha elevado a  $C_m = 1.200 \text{ m/s}$  (Caso posterior, Figura 150). En este caso se aprecia un cambio gradual del predominio de los modos segundo y cuarto cuando una bomba se activa, a una influencia casi dominante de los modos primero y tercero, cuando casi se activan todas las bombas al mismo tiempo.

Por otor lado, como se puede apreciar en las Figura 148 y Figura 150 el número de bombas activas o piezoeléctricos excitados no modifican de manera sustancial las distintas frecuencias de resonancia aunque si los vectores propios asociados a éstas.

A continuación se muestra la respuesta del sistema de impresión múlti-nozzle DOD por piezoeléctricos basado en el resonador de Helmholtz anterior, de respuesta negativa y donde las bombas son exitadas mediante una señal trapezoidal. Se representa gráficamente dicha respuesta cuando exitamos un única bomba de 24, posteriormente 12 y finalmente 23 bombas a la vez de las 24 existentes y cabe resaltar que inicialmente se muestra el caso donde la rigidez del canal de alimentación es baja. Y posteriormente se representa la respuesta del sistema del segundo caso ya comentado, donde la rigidez del canal de alimentación es elevada.





**Figura 149:** Representación gráfica de la respuesta del sistema de impresión multi-nozzle DOD basado en el resonador de Helmholtz, excitado mediante un tren de impulsos de forma trapezoidal y considerando la velocidad del sonido en el conducto de alimentación como  $C_m = 100 \text{ m/s}$  [Fuente: Elaboración propia].

En las gráficas anteriores se puede apreciar como el sistema multi-nozzle responde a una excitación externa aplicada sobre uno o varios piezoeléctricos, los cuales al deformarse modifican el volumen de las cámaras de bombeo produciéndose el desplazamiento del

fluido y eventualmente la eyección del mismo tras la ruptura del chorro libre aguas abajo del nozzle. Como se puede apreciar en la Figura 147 donde se exponen los datos de dicho sistema, se puede apreciar que la deformación máxima de los piezoeléctricos suponen un incremento del volumen de la cámara de bombeo del 0.01% situación que tiene lugar a  $t_{p1}$  es decir, tras los primeros  $20 \cdot 10^{-6} \mu s$ . Por otro lado, tras mantener la deformación del piezoeléctrico se puede apreciar como la velocidad del fluido se atenúa fruto de la disipación viscosa entre otros fenómenos, posteriormente se produce la aceleración del fluido tras la reducción del volumen de la cámara de bombeo, es en este punto donde el fluido alcanza su velocidad máxima la cual como se ha comentado anteriormente será la responsable de la eyección de los volúmenes discretos de tinta en régimen de eyección. Nótese también el número de bombas activas influye notablemente en el comportamiento del sistema, con una bomba activa el desplazamiento del fluido a través del nozzle es independiente de las propiedades del canal de alimentación pero en este caso acústicamente suave, se puede apreciar que a medida que se aumenta el número de bombas activas se producen ligeras interferencias que reducen la amortiguación del mismo.

**Respuesta dinámica del sistema de impresión multi-nozzle anterior considerando la rigidez del canal de alimentación como elevada:**

Con un único nozzle activo de 24:						
Modos	Frecuencia de resonancia por modo (Hz)	Vectores propios por tramo y modo				
		$(\xi_{1j})$	$(\xi_{2j})$	$(\xi_{3j})$	$(\xi_{4j})$	$(\xi_{5j})$
1	4.868	1,00E+00	7,26E-01	6,78E-02	1,00E+00	7,26E-01
2	6.282	1,00E+00	7,22E-01	-9,14E-17	-4,35E-02	-3,14E-02
3	53.988	1,00E+00	4,08E-02	-1,62E-02	1,00E+00	4,08E-02
4	58.902	1,00E+00	-9,07E-02	2,91E-17	-4,35E-02	3,94E-03
5	68.451	1,00E+00	-3,79E-01	3,57E-02	1,00E+00	-3,79E-01

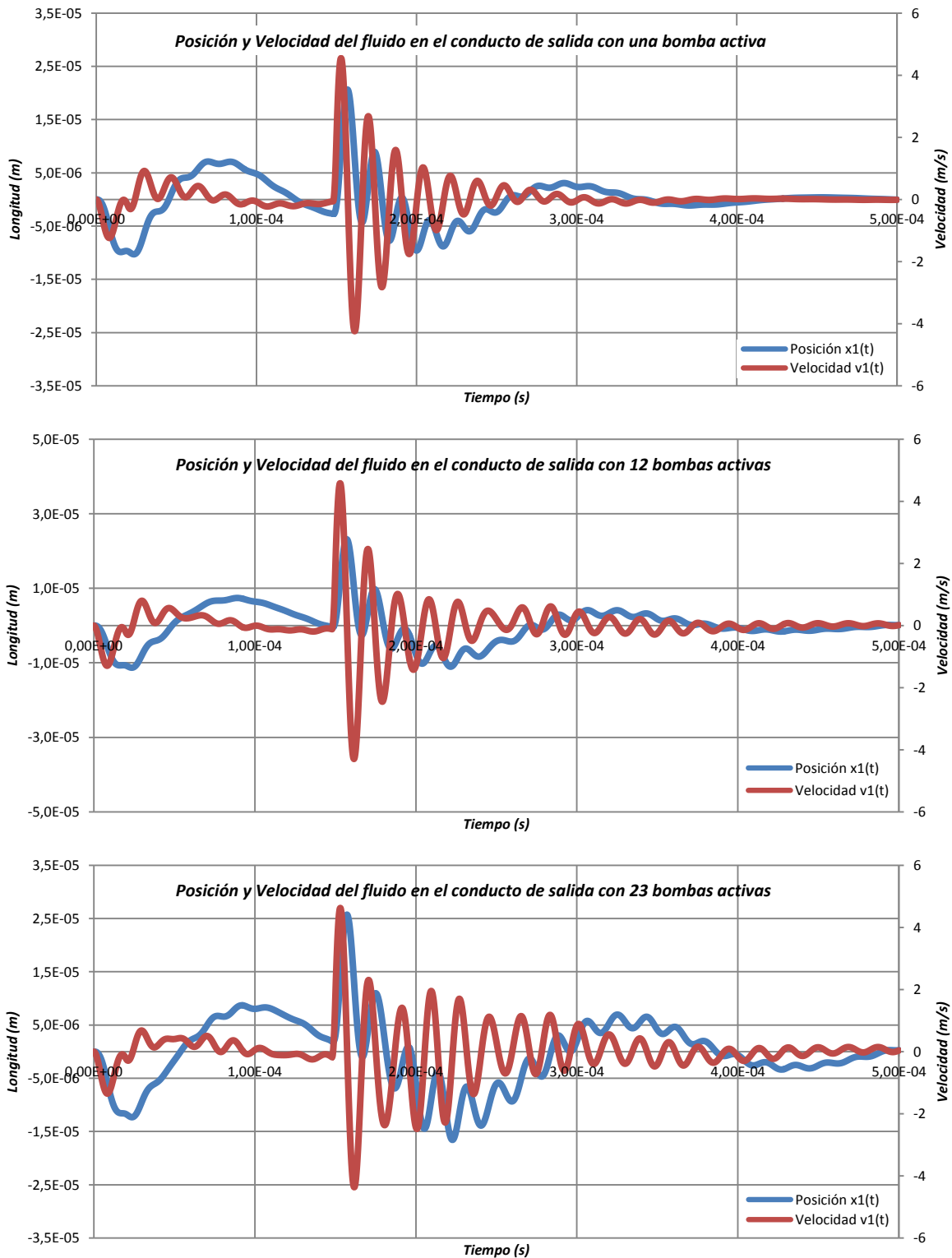
  

Con 12 nozzles activos de 24:						
Modos	Frecuencia de resonancia por modo (Hz)	Vectores propios por tramo y modo				
		$(\xi_{1j})$	$(\xi_{2j})$	$(\xi_{3j})$	$(\xi_{4j})$	$(\xi_{5j})$
1	4.868	1,00E+00	7,26E-01	6,78E-02	1,00E+00	7,26E-01
2	6.282	-1,00E+00	-7,22E-01	-7,17E-15	1,00E+00	7,22E-01
3	53.988	-1,00E+00	-4,08E-02	1,62E-02	-1,00E+00	-4,08E-02
4	58.902	-1,00E+00	9,07E-02	-3,78E-17	1,00E+00	-9,07E-02
5	68.451	-1,00E+00	3,79E-01	-3,57E-02	-1,00E+00	3,79E-01

Con 23 nozzles activos de 24:						
Modos	Frecuencia de resonancia por modo (Hz)	Vectores propios por tramo y modo				
		$(\xi_{1j})$	$(\xi_{2j})$	$(\xi_{3j})$	$(\xi_{4j})$	$(\xi_{5j})$
1	4.868	1,00E+00	7,26E-01	6,78E-02	1,00E+00	7,26E-01
2	6.282	-4,35E-02	-3,14E-02	-7,09E-15	1,00E+00	7,22E-01
3	53.988	-1,00E+00	-4,08E-02	1,62E-02	-1,00E+00	-4,08E-02
4	58.902	-4,35E-02	3,94E-03	6,62E-17	1,00E+00	-9,07E-02
5	68.451	-1,00E+00	3,79E-01	-3,57E-02	-1,00E+00	3,79E-01

**Figura 150:** Frecuencias de resonancia y vectores propios del sistema considerando distintos números de nozzles activos al mismo tiempo y la velocidad del sonido en el conducto de alimentación como  $C_m = 1.200 \text{ m/s}$  [Fuente: Elaboración propia].



**Figura 151:** Representación gráfica de la respuesta del sistema de impresión multi-nozzle DOD basado en el resonador de Helmholtz, excitado mediante un tren de impulsos de forma trapezoidal y considerando la velocidad del sonido en el conducto de alimentación como  $C_m = 1.200 \text{ m/s}$  [Fuente: Elaboración propia].

En las gráficas anteriores se muestra la respuesta del sistema multi-nozzle en el cual se ha considerado que la rigidez del canal de alimentación es superior y por tanto acústicamente este sistema es menos suave que el anterior. Por otro lado, bajo una excitación similar y comparando dicha respuesta con la del caso anterior, es posible notar fruto del aumento del número de bombas activas al mismo tiempo se producen interferencias que reducen la amortiguación del mismo, estas interferencias son más evidentes cuando más rígido es el canal de alimentación.

Por otro lado, y desde un punto de vista general, se ha de resaltar que, a altas frecuencias de excitación, la posición del fluido al momento de la contracción del volumen de la cámara de bombeo es dependiente del número de bombas activas al mismo tiempo, lo cual influye en el volumen y en la velocidad de las gotas eyectadas siendo mayor en el caso donde la rigidez del canal de alimentación es alta. En el caso donde los trenes de impulso llevados a los piezoeléctricos se realizan con periodos elevados, es decir a bajas frecuencias de excitación, la influencia del número de bombas activas en el volumen y velocidad de las gotas eyectadas se reduce drásticamente siendo despreciable en el caso donde el canal de alimentación es acústicamente suave, estos efectos pueden apreciarse en las figuras anteriores (Figura 149 y Figura 151) donde la duración total del pulso es de  $150\mu s$  mientras que la representación gráfica abarca los  $500\mu s$  de duración.

De modo que, en este apartado se ha establecido expresiones con las cuales modelizar el funcionamiento y la fenomenología asociada a la dinámica del fluido en el interior del sistema de impresión DOD por piezoeléctricos, dichas expresiones definen la posición y la velocidad del fluido en el interior del cabezal o cartucho según sea el caso, siendo éstos mono-nozzle o multi-nozzle. Por otro lado, en apartados anteriores se ha vinculado dicha respuesta del sistema con la fenomenología asociada a la de formación y ruptura de chorros libres en régimen de eyección (formación de las gotas), así como también se ha abordado las peculiaridades y los requisitos necesarios por parte de los sistemas de impresión (llenado de las cámaras de bombeo) afín de poder repetir el proceso de eyección cuantas veces se requiera y bajo demanda. Finalmente, en la modelización presentada, el funcionamiento de dichos sistemas de impresión, han sido condicionados a las características reológicas de los fluidos o tintas a eyectar y eventualmente depositar sobre los sustratos.

### **2.4.3. Modelización del comportamiento dinámico del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 utilizado en el sistema de impresión híbrido multimaterial desarrollado en la presente tesis**

Llegados a este punto donde se ha establecido los fundamentos necesarios para la modelización del comportamiento dinámico del fluido en el interior de los sistemas Inkjet DOD por piezoeléctrico, a continuación, se aplican dichos fundamentos en la modelización y

control dinámico del funcionamiento de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610 desde un punto de vista de la mecánica de fluidos y con ayuda de la acústica.

Como se ha comentado en capítulos anteriores el presente trabajo de investigación surge a partir del proyecto Nhibrid32D en donde se buscó validar la posibilidad de construir mediante la combinación de múltiples tecnologías aditivas, geometrías tridimensionales complejas dotadas de circuitería y elementos electrónicos pasivos inmersos en el interior de dicha estructura, afín de proporcionar a éstas de nuevas propiedades con las cuales incrementar la relación hombre-objeto, una relación más allá de su superficie y la percepción sensorial del usuario (vista, olfato, gusto, tacto, etc.).

Con el fin de alcanzar dichos objetivos se ha concebido un sistema capaz de combinar la tecnología de impresión tridimensional por DLP (Digital Light Processing) junto con un sistema de impresión por chorro de tinta o Inkjet, siendo éste del tipo DOD por piezoeléctrico y perteneciente a la subcategoría Bend, el cual se utiliza para la deposición de tintas (donde pequeñas partículas de escala nanométrica no solubles dispersas en una fase líquida constituyen las suspensiones eyectadas con propiedades conductivas), por otro lado, las líneas y patrones reproducidos mediante la deposición controlada de gotas eyectadas por estos sistemas, se realiza sobre sustratos generados previamente por el sistema DLP los cuales constituirán la geometría de la estructura tridimensional de los objetos a reproducir a partir de un archivo digital.

En cuanto a la tecnología utilizada para la deposición de las tintas, se ha desarrollado un sistema fundamentado en el equipo de impresión Fujifilm Dimatix DMP-2800. Estos equipos de impresión están concebidos como una herramienta donde investigadores, científicos e ingenieros pueden evaluar, analizar y optimizar tanto sus diseños como sus tintas en la fabricación mediante pruebas de concepto de dispositivos electrónicos. Estos equipos de impresión están ideados para laboratorios y centros tecnológicos del ámbito de la electrónica impresa no para la producción en masa, ofreciendo a los usuarios una alta flexibilidad y una alta sofisticación experimental. Aunque también se ha de decir, que los fundamentos descritos en la presente tesis son aplicables a muchos otros sistemas del tipo Bend sean éstos destinados a la producción en masa o no.

#### **2.4.3.1. Cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610**

Antes particularizar los fundamentos establecidos en la presente tesis afín de analizar el comportamiento del fluido en el interior del cartucho Dimatix DMC-11610 y mediante éste análisis establecer un sistema de control del mismo con el cual ser capaz de reproducir mediante el desplazamiento del cabezal de impresión en  $X$  e  $Y$  líneas y/o patrones sobre un sustrato plano es necesario conocer las peculiaridades del mismo.

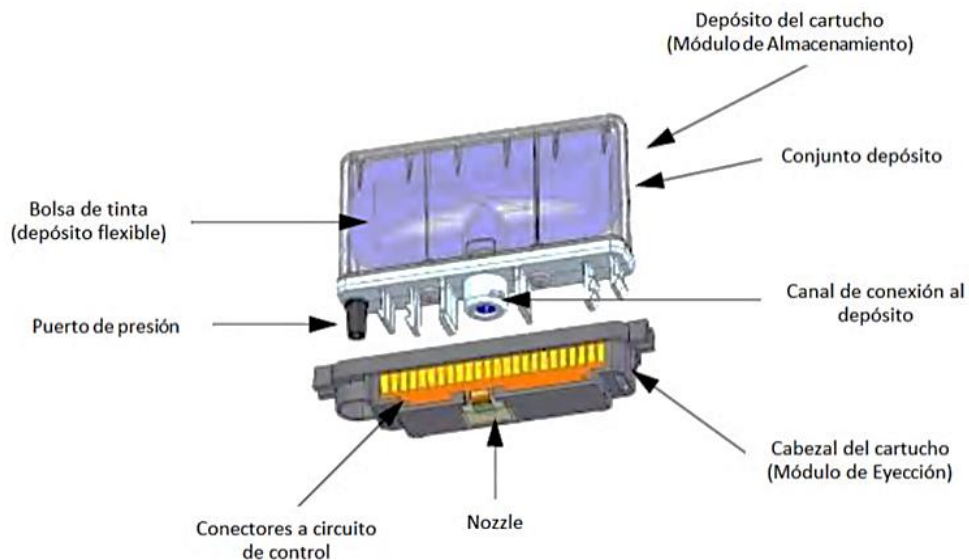
Cabe resaltar que los cartuchos Dimatix DMC-11610, son totalmente intercambiables, van alojados en el interior de cabezal de impresión el cual ha sido completamente rediseñado

atendiendo a las particularidades del equipo Nhibrid32D como se podrá apreciar el capítulo siguiente, por otra parte dicho elemento desde un punto de vista funcional ofrece la posibilidad de rotar el cartucho alojado en su interior y su sustitución, así como también posee la capacidad de desplazarse sobre y paralelo al plano que describe el área o el dominio de impresión. Por último, constructivamente estos cartuchos están constituidos por dos elementos fundamentales:

**Módulo de Eyección:** constituido por una carcasa plástica negra de resina epoxi en el cual se aloja el sistema de microbombeo (corazón del sistema Inkjet) junto con un sistema calefactor constituido por resistencia y termistor, en este módulo también se ubica los electrodos con los cuales mediante un circuito electrónico se controla dicho cartucho.

**Módulo de Almacenamiento:** este elemento es el que le da nombre al cartucho como tal, ya que se diferencian de los cabezales de impresión a aquellos dispositivos que, siendo intercambiables llevan consigo al depósito de tinta. Este elemento tiene la particularidad de ser desechable, y está constituido por una carcasa plástica de polipropileno transparente en cuyo interior se encuentra una bolsa flexible presurizada que contiene y almacena el fluido a utilizar.

Por otro lado, la unión entre ambos Módulos se realiza mediante clipajes de enganche y a través del canal de conexión al depósito, el cual une éste al de alimentación para completar el circuito hidráulico. A continuación en la Figura 152 se muestra una representación de forma conceptual de los elementos constitutivos de cartucho Dimatix DMC-11610.



**Figura 152:** Elementos constitutivos del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 [227].

Cabe resaltar que dichos cartuchos se caracterizan por ofrecer una elevada precisión, control y adaptabilidad, con capacidad de eyectar gotas de un volumen mínimo de 10 pL y constituidos de 16 nozzles dispuestos de forma lineal.

A continuación se particularizan los fundamentos establecidos con anterioridad en la modelización de un sistema multi-nozzle basado en el resonador de Helmholtz, con los cuales se establecerá un sistema de control del mismo en función de las condiciones reológicas de los fluidos (tintas) a eyectar. En este aspecto es necesario establecer en primer lugar las limitaciones reológicas impuestas y las recomendaciones del fabricante, así como también esquematizar el sistema hidráulico del mismo, las dimensiones de sus conductos y otras peculiaridades de dicho cartucho. Se ha de aclarar por otro lado, que el sistema híbrido multimaterial desarrollado en la presente tesis para el cual se ha desarrollado éste sistema de deposición de material por tecnología Inkjet, solo hace uso de los cartuchos comentados, mientras que el desarrollo de los sistemas de desplazamiento y control del mismo desde un punto de vista mecánico, electrónico y de software ha sido completamente propio.

### **Limitaciones reológicas impuestas por el sistema Inkjet**

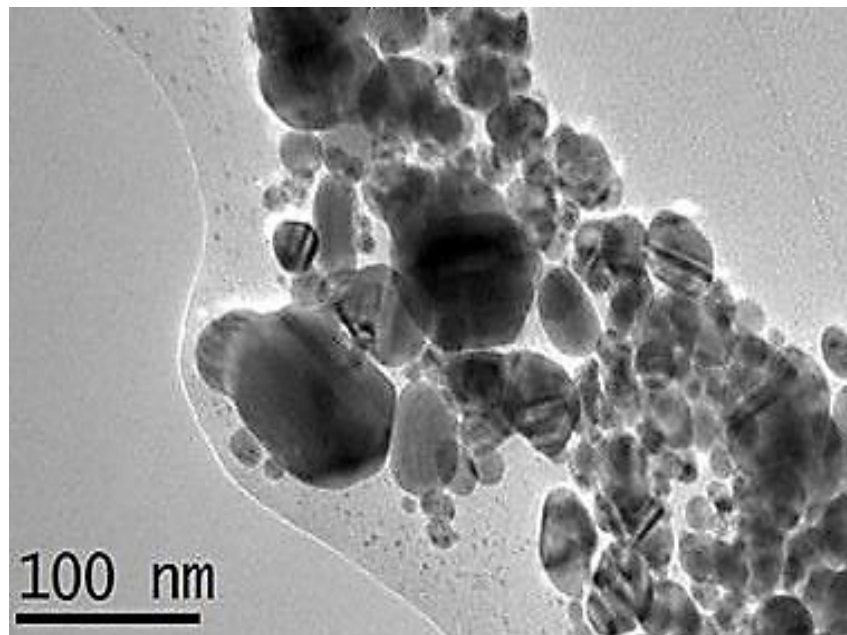
Si bien algunos de los fundamentos en los que se sustenta dichas limitaciones se ha comentado ya en apartados previos y de una manera superficial se ha hecho un repaso de algunas de las tintas, fluidos y materiales susceptibles a ser impresos por los sistemas Inkjet DOD, sus características y funcionalidades en capítulos precedentes, a continuación por otro lado, se exponen las recomendaciones y pautas establecidas por Fujifilm para la formulación de las tintas a ser utilizadas por estos sistemas.

**Solvente y evaporación de las tintas:** Los cartuchos Dimatix DMC-11610 son compatibles con la mayoría de solventes orgánicos así como materiales en base a acrilatos, en general poseen una buena compatibilidad con la mayoría de los disolventes tales como; alcoholes alifáticos (de alto punto de ebullición) y glicoles, hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos alifáticos y solventes oxigenados, así como también solventes a base de Lactato de Etilo, Cetonas Alifáticas y aromáticas de rápida evaporación. En este aspecto, los fluidos a eyectar deben tener una tasa de evaporación lo suficientemente baja como para no secarse en la interface existente en el nozzle. Los fluidos acuosos usualmente mejoran con la adición de un humectante como un glicol para disminuir la evaporación, en cambio las tintas a base de disolventes no acuosos deben ser formulados de forma similar usando disolventes de alto punto de ebullición y baja velocidad de evaporación [228].

**Rango de viscosidades:** La viscosidad recomendada de los fluidos a eyectar debe estar entre 10 y 12 cPs ( $1,0 \times 10^{-2}$  a  $1,2 \times 10^{-2}$  Pa\*s) a la temperatura de funcionamiento, cosa que en éstos cartuchos está comprendida entre los 15°C y 70°C siendo ésta última la temperatura máxima a la que puede alcanzar el sistema calefactor. Por otra parte, se han llegado a eyectar con estos cartuchos fluidos desde 2 a 30 cPs aunque las velocidades de salida de las gotas en el caso de alcanzar éste límite máximo suelen ser mucho más lentas disminuyendo la velocidad de reproducción.

**Rango de tensiones superficiales:** En cuanto a la tensión superficial de las tintas o fluidos a ser susceptibles a ser eyectados por estos cartuchos deben estar entre 28 y 33 dinas/cm (0,028 a 0,033 N/m). Típicamente se suele añadir tensoactivos a los fluidos de base acuosa con el fin de alcanzar dichos valores recomendados. Por otra parte, en fluidos de mayor tensión superficial (hasta 70 dinas/cm) también pueden ser eyectados, aunque con un rendimiento inferior.

**Suspensiones:** En cuanto a las suspensiones las recomendaciones por parte del fabricante de los cartuchos, se centran en el uso de partículas de pequeñas dimensiones cuyo asentamiento o difusión en la fase líquida sea lenta y que no presente aglomeraciones, afín de asegurar la correcta fluidez de éstas en el interior del sistema. En este aspecto, las partículas han de ser de al menos 1/100 el tamaño del orificio de salida. De modo que, siendo el nozzle de 21  $\mu\text{m}$  en el caso del cartucho de 10 pL (DMC-11610), cualquier partícula o agregado debe ser inferior a 0,2  $\mu\text{m}$ . En cartuchos de 1 pL (DMC-11601) cuyo diámetro de nozzle es de 9  $\mu\text{m}$  las dimensiones de estas partículas se reducen a inferiores de 0,09  $\mu\text{m}$  de diámetro. En este aspecto la tinta comercial empleada afirma en sus especificaciones que puede ser empleada en los cabezales Dimatix y por tanto debe cumplir con los requisitos impuestos por estos, en este aspecto a modo de complemento a continuación se muestra una imagen tomada del través del microscopio electrónico de transmisión (TEM) marca JEOL modelo JEM-2100, en donde se puede apreciar algunas de estas partículas de plata inmersas en la tinta (las partículas fueron dispersadas en etanol y depositadas en una rejilla porta muestras de cobre recubiertas con carbón, ver Figura 153).



**Figura 153:** Imagen de micrografía electrónica de transmisión de las nanopartículas de plata de la tinta utilizada [Por cortesía de E. Xuriguera del departamento de ciencia de materiales y química física de la universidad de Barcelona].



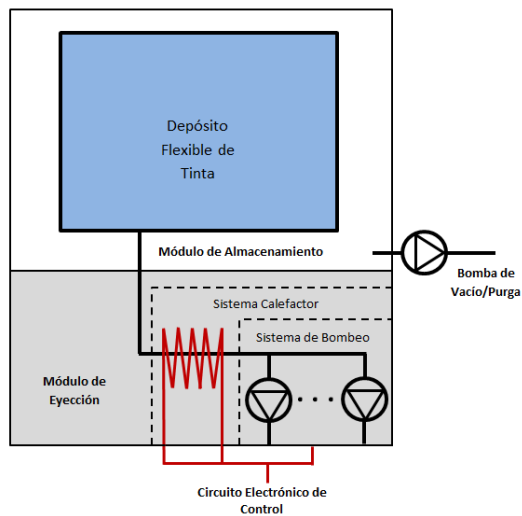
**Desgasificación y pH:** La eliminación del gas disuelto mejora las características de chorro siendo especialmente útil en fluidos de base acuosa, en cuanto al pH de las tintas o fluidos a eyectar éstas pueden ser tanto acidas como básicas, pero dentro del rango de 4-9. Los fluidos fuera de este rango podrían causar corrosión y dañar el cartucho de impresión.

### **Esquema hidráulico del cartucho Dimatix DMC-11610**

Desde un punto de vista netamente hidráulico los cartuchos utilizados en sistemas de impresión DOD por piezoeléctricos del tipo Bend, pueden ser vistos como un sistema de microbombeo cuyas bombas se disponen en paralelo (16 de ellas, una por cada nozzle separadas a una distancia de 254  $\mu\text{m}$  en nuestro caso) alimentadas por un único conducto de alimentación, el cual une dicho sistema de bombeo con un depósito presurizado. Dicho depósito constructivamente está constituido por una bolsa flexible de polipropileno de 50  $\mu\text{m}$  de espesor que en el caso de utilizarse tintas o fluidos de bajo peso molecular u otros disolventes o materiales más agresivos que puedan afectar la integridad de dicha bolsa ésta puede ser de LCP (Liquid Crystal Polymer). Afín de compensar la altura piezométrica del depósito, la cual fomentaría en fluidos poco viscosos y de baja tensión superficial el goteo de los mismos a través de los nozzles cuando el sistema se encuentra en reposo, se genera una ligera presión manométrica negativa (presión de vacío) entre el recipiente que contiene al depósito flexible y éste, siendo ambos estancos (ver Figura 155). La estanqueidad de ambos recipientes, así como la unión entre el módulo de almacenamiento y el módulo de eyección se realiza mediante juntas toricas de caucho de etileno propileno dieno (EPDM).

Por otra parte, la purga del sistema de bombeo se realiza modificando la presión en el interior del recipiente que contiene al depósito flexible, al aumentarla, el depósito se comprime, fomentando la salida de la tinta. La presión máxima requerida durante el proceso de purga ha sido establecida por parte de Fujifilm en 5 psi.

Una de las características fundamentales de éstos sistemas de microbombeo es que no están provistos de válvulas, es por ello que fundamentados en la acústica pueden trabajar a frecuencias muy elevadas, en el caso de los cartuchos analizados, el fabricante establece una limitación máxima en el rango de los 80 kHz (cifra que requiere ser considerada con detenimiento, ya que equivale a 4.800.000 ciclos (gotas) por minuto y por nozzle). Por último, el sistema se complementa con un sistema calefactor provisto de resistencia y termistor con el cual es posible modificar las condiciones reológicas de los fluidos a eyectar mediante la adición de temperatura al sistema.



**Figura 154:** Imagen conceptual del esquema hidráulico del cartucho Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia].

### Condiciones geométricas del sistema (dimensiones y otras peculiaridades)

**Depósito:** la capacidad máxima de depósito (bolsa flexible) es de 1,5 ml mientras que el mínimo de tinta necesario afín de garantizar la correcta impresión se establece a un volumen de 0,2 ml. Con estos márgenes se puede establecer que la duración de los cartuchos se ve condicionada por el número y la cantidad de tinta eyectada en las purgas del mismo, aunque excluyendo dicha cantidad y considerando que el depósito impresión se encuentra cargado con 1 ml, éste podrá proporcionar  $1 \times 10^8$  gotas 10 de pl durante el proceso de impresión.

Por otra parte, el depósito de tinta se encuentra fijo en el interior del módulo de almacenamiento, sujeto mediante clips que permiten su esanchamiento más no su desplazamiento y al ser este flexible, en su interior no existe una superficie libre, por tanto no existe modificación en la altura del nivel de tinta. La presión piezométrica es siempre constante y se encuentra compensada por la presión de succión.



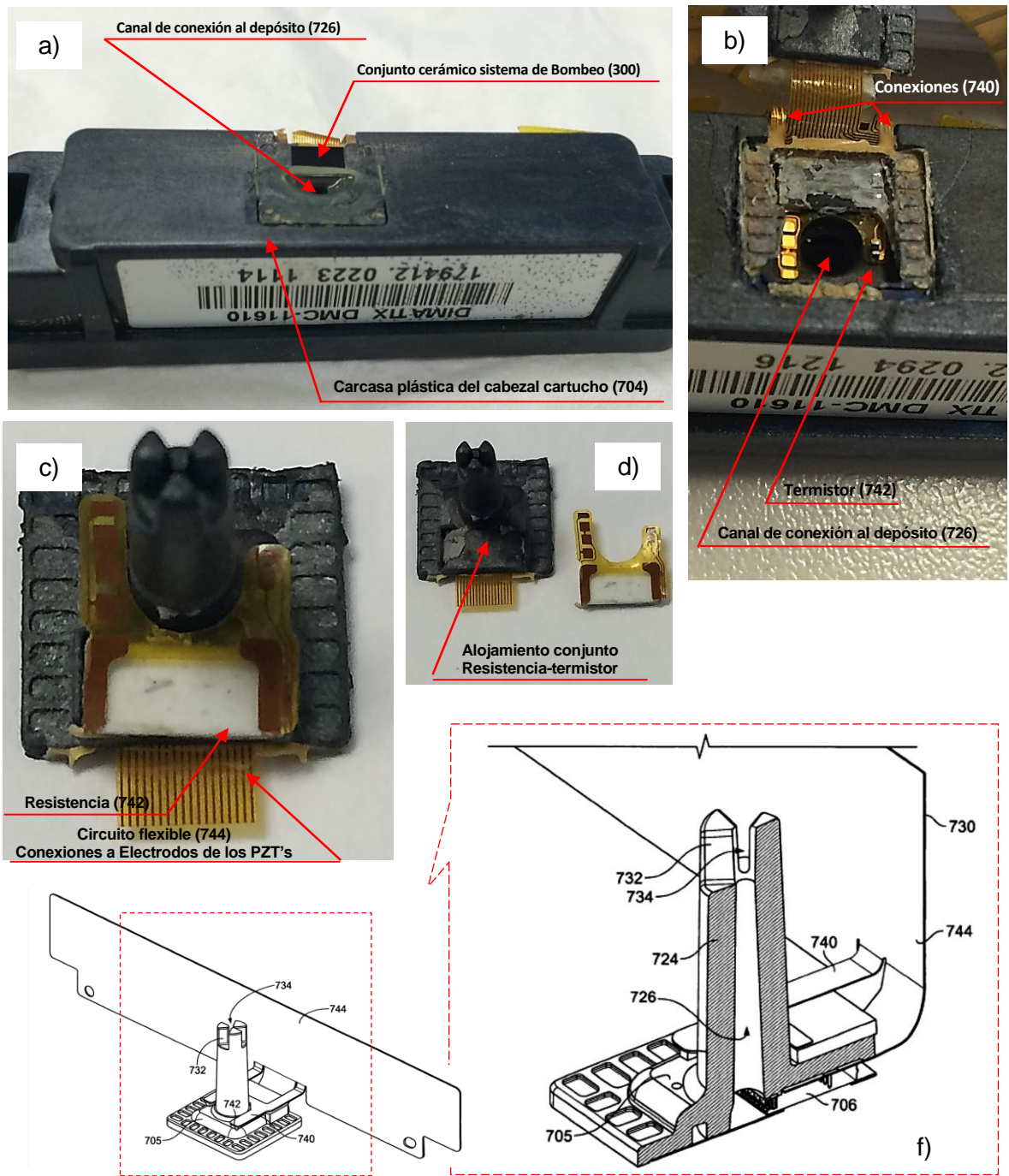
**Figura 155:** Módulos de almacenamiento del cartucho Dimatix DMC-11610 cargado de tinta de plata ANP y sin tinta, en vacío [Fuente: Elaboración propia].

## Conductos y conexiones

Como hemos podido apreciar en la Figura 154 el cartucho esta constituido por dos módulos; Por un lado se tenemos el módulo de almacenamiento en donde se encuentra ubicado el depósito presurizado de tinta y por otro lado tenemos al módulo de eyección, en cuyo interior se encuentran ubicados las distintas cámaras de bombeo. La unión entre ambos módulos se realiza a través de lo que hemos llamado canal de conexión al depósito. Este canal esta constituido por dos conductos o tramos cada uno perteneciente a cada módulo, los cuales a su vez se asocian en serie de forma estanca, a través de un sistema provisto de una junta tórica.

En cuanto al módulo de eyección, en su interior se aloja el sistema de bombeo constituido por las cámaras de bombeo, el canal de alimentación y el primer tramo del canal de conexión al depósito, todos ellos integrados en el elemento columna 705 (Figura 156 e y f). A este último a su vez, se le auna el sistema de calefacción comentado anteriormente y representado conceptualmente en la Figura 154 y en conjunto alojado todos en un carcasa plástica de resina epoxi que constituye dicho módulo del cartucho Dimatix DMC-11610.

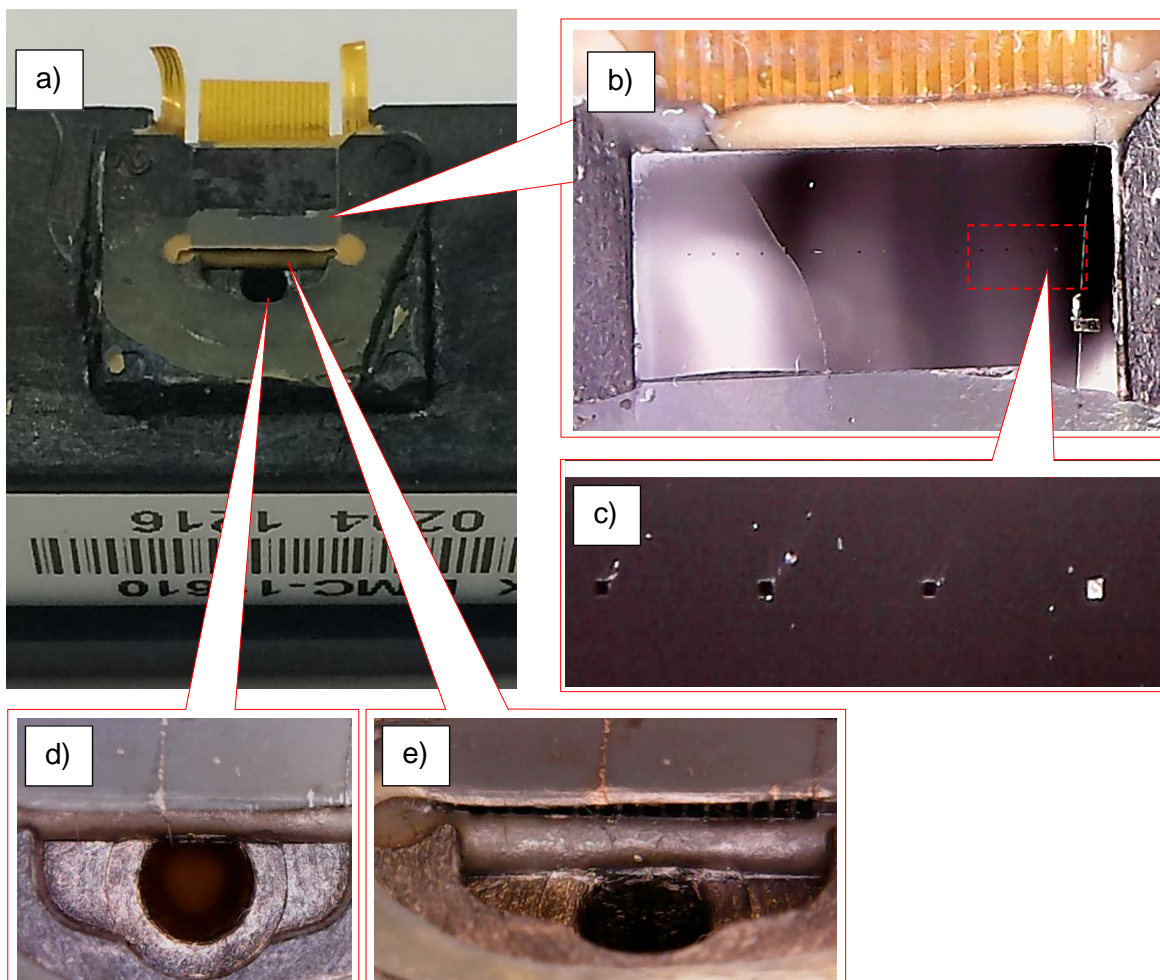
Afín de comprender la particularidades del cartucho de impresión utilizado, a continuación se muestra en imágenes el interior módulo de eyección del cartucho, en ellas se puede apreciar la ubicación del sistema calefactor constituido por resistencia y termistor sobre el sistema de bombeo aunque separado por la carcasa que constituye al elemento columna 705 (Figura 156 e y f). Puede ser observado también, una representación esquemática completa del conjunto calefactor-columna-conexiones eléctricas tomadas de la patente US 7,631 962 B2 propiedad de FUJIFILM Dimmatix, Inc., así como también una vista ampliada y seccionada del elemento columna afín de aportar claridad a la ubicación del sistema de bombeo en su interior. Es importante resaltar que en la imágenes del interior del canal de conexión al depósito han sido posible ya que se ha retirado previamente el precinto protector del mismo.



**Figura 156:** Imágenes del interior del módulo de eyección del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 sin precinto protector del canal de conexión al depósito (elemento 726) a). Vista interna ampliada de dicho canal b). Imagen del conjunto columna (elemento 705) c). Imagen del conjunto calefactor separado del elemento columna d). Representación esquemática del completa del conjunto calefactor-columna-conexiones eléctricas, existente en el interior del módulo de eyección y amplización del conjunto anterior seccionado (Imágenes obtenidos de la patente US 7,631 962 B2 propiedad de FUJIFILM Dimmatix, Inc.), e) y f)

[Fuente: Elaboración propia].

Como se ha podido ver en las imágenes y esquemas de las figuras anterior las tintas fluyen desde el depósito hasta los nozzles a través del canal de conexión al depósito y el canal de alimentación punto en el cual, el flujo entra en el conjunto al cual hemos denominado sistema de bombeo. A partir de éste momento el flujo se divide tomando 16 direcciones cada una de las cuales les conduce a los correspondientes nozzles dispuesto linealmente. De ésta forma y tras una purga inicial del sistema, éste (el cartucho) se encuentra en disposición de ser utilizado. Por otra parte, durante dicho proceso y durante la impresión (eyección de gotas consecuencia de excitación eléctrica de los piezoeléctricos del sistema de bombeo) el fluido puede experimentar un incremento de temperatura.



**Figura 157:** Imágenes del elemento columna alojado en el módulo de eyección del cartucho DMC-11610 a), Vista ampliada de conjunto sistema de eyección b), Disposición lineal de los nozzles de sección cuadrada sobre el conjunto sistema de eyección c), vista perpendicular de la base del conducto de conexión al depósito y vista completa del canal de alimentación d), Imagen de los conductos de conexión o de admisión a las cámaras de bombeo e)

[Fuente: Elaboración propia].

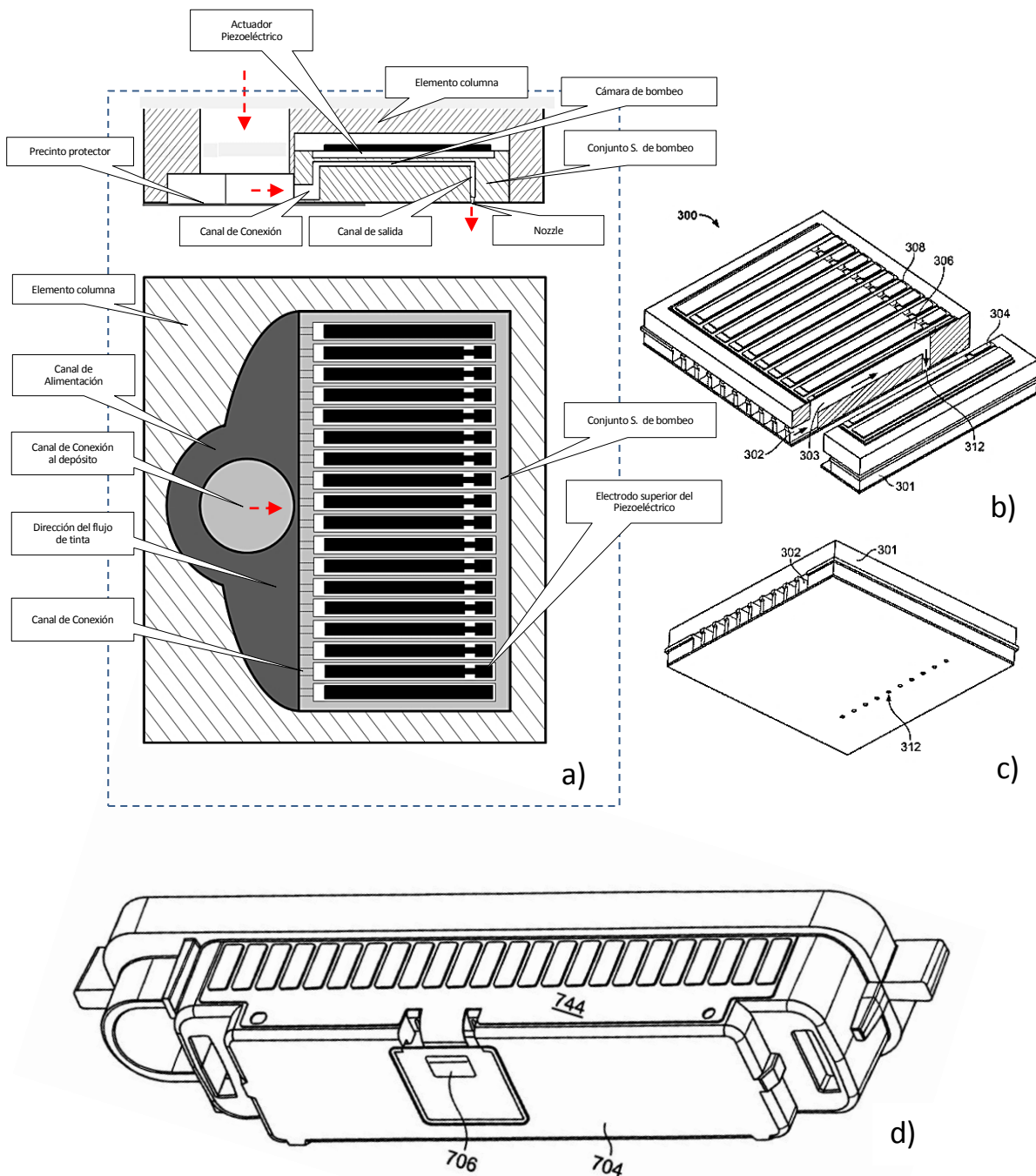
### Sistema de Bombeo

El conjunto denominado sistema de bombeo está constituido por una estructura de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) comúnmente utilizado en MEMS, en cuyo interior se han mecanizado los conductos o canales de conexión, las cámaras de bombeo sobre las cuales van alojados los actuadores piezoeléctricos (PZT's), los conductos de salida y sus correspondientes orificios de salida en forma de tobera (nozzles). Todas las conducciones incluidos los nozzles y las cámaras de bombeo son de sección rectangular pudiendo ser éstas apreciadas en las imágenes obtenidas a través del microscopio de electrónico de barrido SEM que a continuación se muestran. Por otro lado, se ha de resaltar que debido a que en estos sistemas exentos de valvulería, el sentido que toma el fluido tras la contracción de la cámara de bombeo es forzado mediante la resistencia que ofrecen los conductos de admisión y expulsión al paso de éste, en el cartucho que nos ocupa en relación a este aspecto, el conducto de conexión (aguas arriba de la cámara de bombeo) ofrece una pequeña obstrucción al paso libre de la tinta mediante el uso pilares (ver Figura 161).

En cuanto a los orificios de salida estos como ya se ha comentado se encuentran dispuestos en línea y separados a  $254\ \mu\text{m}$ , son de sección cuadrada y en forma de tobera en cuya sección mínima poseen de longitud  $21\ \mu\text{m}$  (ver Figura 160). Esta geometría atiende a las características de los fluidos a eyectar, generalmente de baja viscosidad y tensión superficial, en consecuencia con una alta afinidad a las superficies del nozzle (mojabilidad), por estos motivos éstos fluidos en reposo por efectos capilares adoptan una forma de domo cóncavo reduciendo la superficie interfacial, lo cual supone una ventaja en fluidos de alta velocidad de evaporación o de bajo punto de ebullición, así como también incrementa la velocidad de salida del chorro libre. Por otro lado, estos cartuchos en estado de reposo mantienen a los actuadores excitados mediante una señal periódica de frecuencia media, que los mantiene vibrando, de esta forma se evita una obstrucción de los nozzles que en el caso de utilizar como ya se ha comentado tintas a base de solventes de bajo punto de ebullición o de alta velocidad de evaporación, o fluidos de rápida solidificación que puedan causar problemas en la repetitividad del proceso (por obstrucción del nozzle).

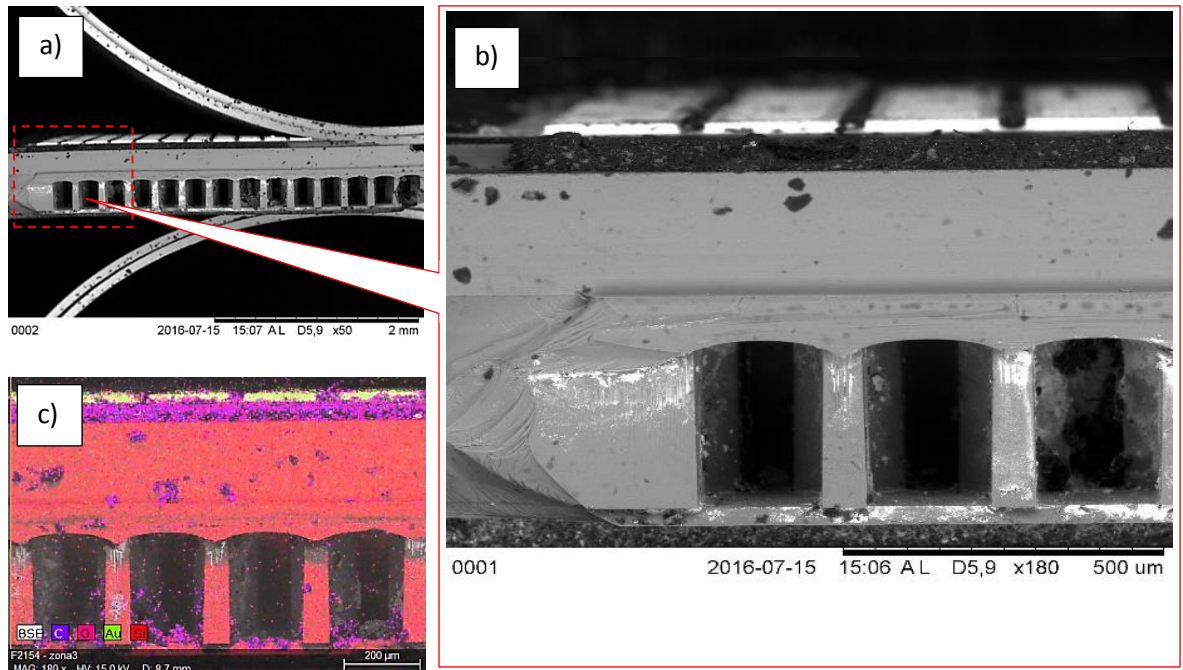
De igual manera que en apartados anteriores, a continuación se muestra de forma conceptual y siguiendo la secuencia de los apartados anteriores el conjunto sistema de bombeo (elemento 300) existente en el interior del módulo de eyección de los cartuchos analizados. En dichas imágenes se aprecia que, según la disposición de los piezoeléctrico y de las cámaras de bombeo, éstos cartuchos poseen un sistema de impulsión pertenecientes dentro de la clasificación a los del tipo Bend y a modo de complemento se recurre también a las imágenes y esquemas ofrecidas por Fujifilm Dimmatix, Inc., a través de su patente US 7,631 962 B2.



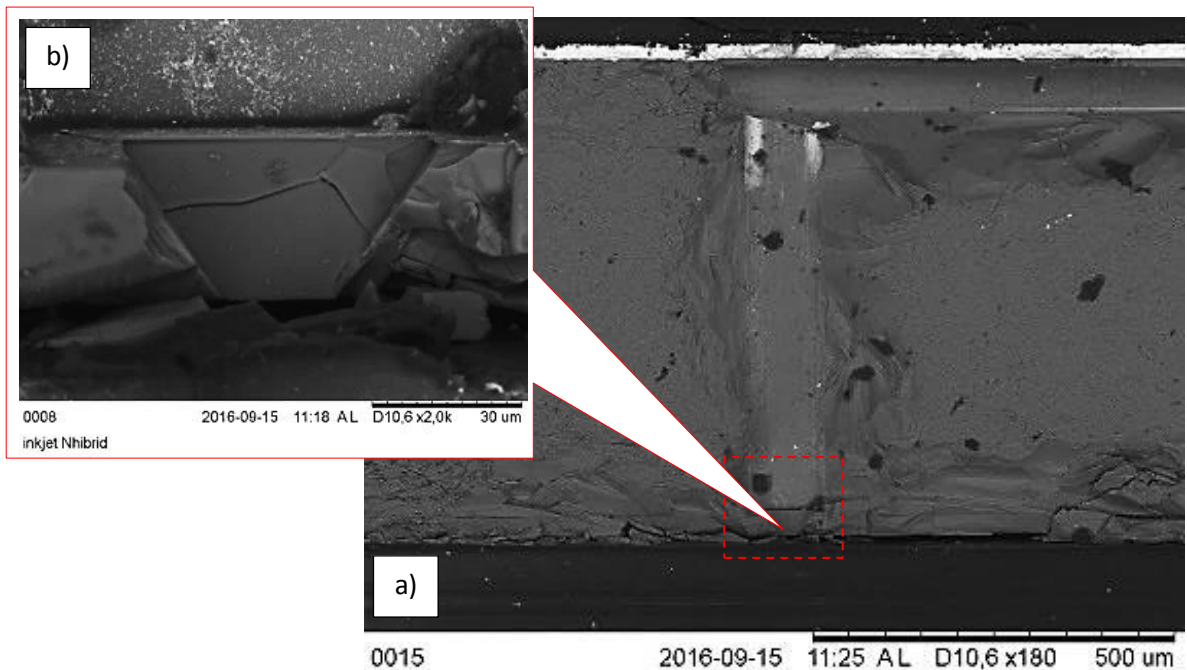


**Figura 158:** Representación esquemática con vista lateral y vertical del sistema de bombeo por piezoeléctricos del cabezal del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 a), Imágenes de dicho cabezal obtenidos de la patente US 7,631 962 B2 propiedad de FUJIFILM Dimmatix, Inc., de la vista tridimensional del sistema de bombeo (sección ampliada de a) b), imagen de la disposición de los múltiples nozzles en línea recta c), imagen completa de módulo de eyección del cartucho DMC-11610 d) [229].

Imágenes del conjunto sistema de bombeo obtenido del microscopio electrónico de barrido SEM (Scanning electron microscopy), FEI-Quanta 200 tomadas a bajo vacío.

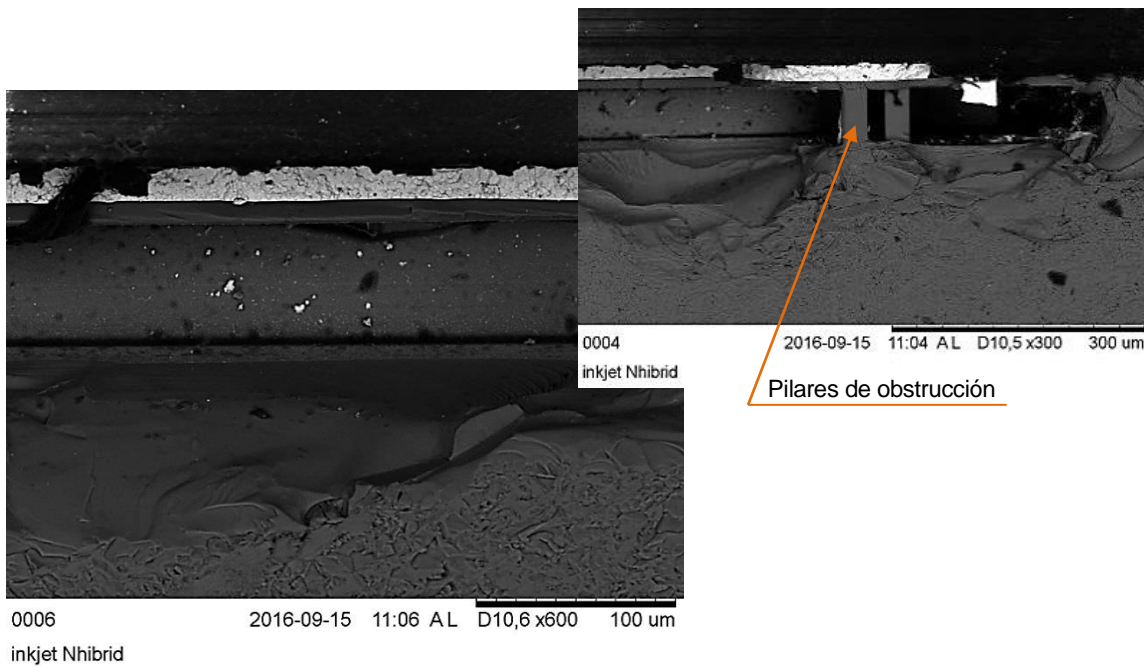


**Figura 159:** Imagen frontal del conjunto sistema de bombeo y en detalle los canales de acceso a la cámara de bombeo o los canales de conexión (tramo 2 según la enumeración seguida en el apartado anterior) a y b respectivamente, análisis de los elemento químicos constitutivos de dicho conjunto c) [Fuente: Elaboración propia].

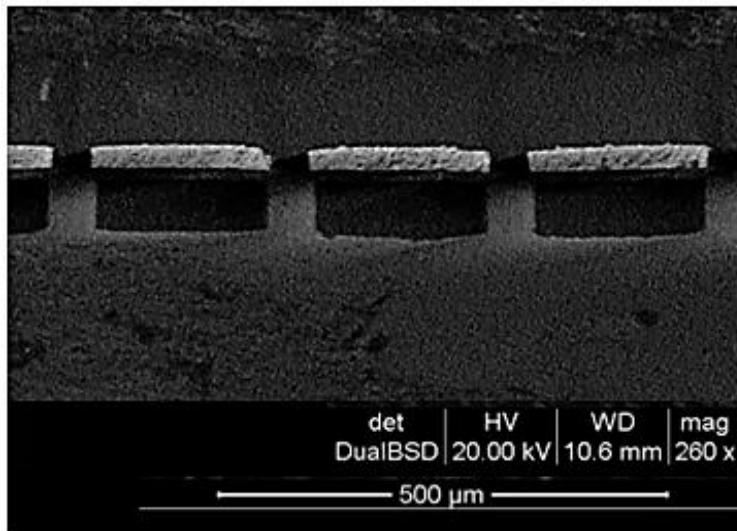


**Figura 160:** Sección transversal del conjunto sistema de bombeo a), Imagen en detalle de los nozzles u orificios de salida b) [Fuente: Elaboración propia].





**Figura 161:** Sección transversal del final de la cámara de bombeo e inicio del conducto de conexión [Fuente: Elaboración propia].

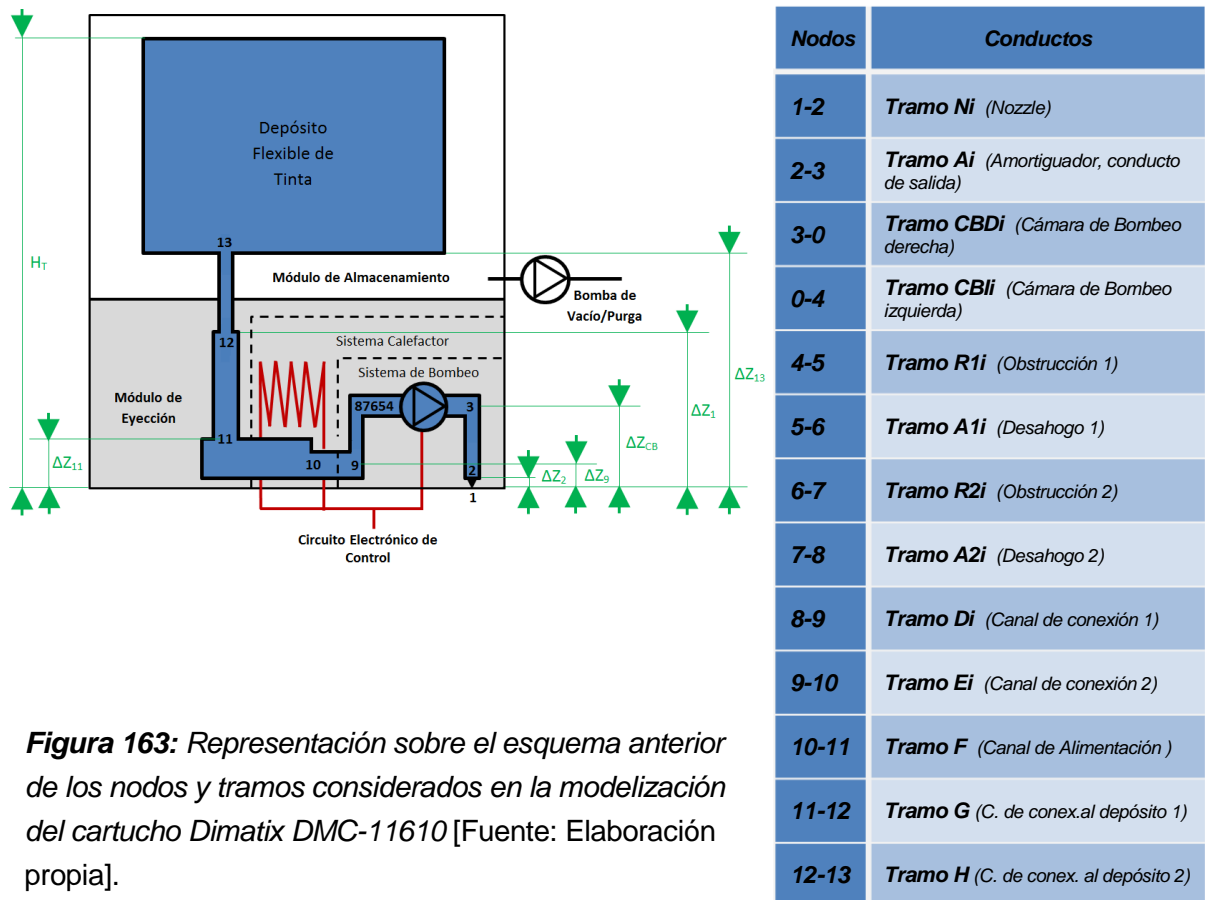


**Figura 162:** Vista seccionada en alzado de las cámaras de bombeo [Fuente: Elaboración propia].

#### 2.4.3.2. Modelización del comportamiento hidrodinámico del fluido en el interior de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610

La modelización del comportamiento dinámico del fluido (tintas) existentes en el interior de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610 por ser un sistema Electro-mecánico-acústico-hidráulico-térmico requiere ser abordado gradualmente. En este aspecto inicialmente y

recurriendo a la acústica se planteará una modelización desde un enfoque hidráulico, en donde siguiendo con la línea de pensamiento desarrollada hasta ahora basándonos en el resonador de Helmholtz, se analizarán las consecuencias que desencadena una señal de excitación tomada del equipo de impresión Fujifilm Dimatix DMP-2800 y cuya respuesta es conocida. Posteriormente dicho modelo aumentara en complejidad admitiendo nuevos fenómenos físicos. De modo que, a tal fin, a continuación se muestra de forma esquemática una representación del sistema hidráulico de los cartuchos mencionados. Posteriormente, en la Tabla se resume las dimensiones, particularidades y otras consideraciones tenidas en cuenta.



**Figura 163:** Representación sobre el esquema anterior de los nodos y tramos considerados en la modelización del cartucho Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia].

La representación de la figura anterior muestra esquemáticamente la sección transversal del cartucho basada en el esquema mostrado en la Figura 154 en donde se identifican los nodos y tramos considerados en la modelización del cartucho afín de facilitar su comprensión.

Nos encontramos pues, ante un sistema de 16 nozzle dispuesto de forma lineal, y por tanto, las distintas conducciones asociados a cada una de las  $i$  cámaras de bombeo existentes, se encuentran dispuestos en paralelo ( $i = 1..16$ ). Dichas conducciones son alimentadas mediante una especie de pulmón el cual se ha denominado canal de alimentación, y éste a

su vez se encuentra conectado al depósito presurizado de tinta a través de un conjunto de conductos verticales (ver Figura 163).

A diferencia de la modelización planteada en el apartado anterior (4.2) en donde el término amortiguador inicialmente no era tenido en cuenta ahora en la presente modelización si será tomada en cuenta, es decir nos encontraremos ante un sistema del tipo en notación matricial del tipo:  $[M][\ddot{x}] + [C][\dot{x}] + [K][x] = [F(t)]$  siendo las pérdidas de carga por rozamiento viscoso el término resistivo que dará origen a la amortiguación del sistema. En este caso debido a las diminutas dimensiones de los conductos es posible hacer uso de la ecuación de Poiseuille y considerar al flujo pese a que su velocidad es dependiente del tiempo y de la excitación, como laminar ( $Re < 2300$ ). Por otra parte, debido a que se propone el uso de un modelo monodimensional con múltiples grados de libertad nos obliga a plantear un sistema en donde analizaremos los efectos dinámicos de la excitación de los piezoeléctricos, desde el nodo 1i hasta el nodo 11, considerando a éstos a una misma cota y despreciando así la presión piezométrica existente entre dichos puntos. La presión piezométrica existente en el punto 11 por otro lado, se considera anulada a consecuencia de la presión de vacío a la que se ve sometido el depósito presurizado en el interior del módulo de almacenamiento.

De forma que, nos encontramos ante un sistema de 163 puntos de control constituido por 147 tramos, o lo que es lo mismo 9 conductos por cada nozzle activo (i) más 3 tramos comunes. La eyección de las gotas se realiza en el nozzle (tramo N) el cual conecta con el conducto de salida (tramo A) y éste a su vez con la cámara de bombeo (tramo CB), aguas arriba de esta se encuentra un primer tramo de sección reducida (tramo R1) cuya función es la de restringir el paso del flujo, posteriormente se encuentra un primer conducto de desahogo de mayor sección (tramo A1) para posteriormente conectarse a un segundo conducto obstructor (tramo R2) y éste último a un segundo conducto de desahogo (tramo A2). El sistema de bombeo elemento 706 de la Figura 153 se completa con los canales de conexión es decir con los tramos D y E.

Los 16 tramos E o canales de conexión 2, se encuentran unidos al canal de alimentación (tramo F) y éste a su vez con el canal de conexión al depósito 1 (tramo G, elemento 726 de la Figura 156) constituyendo así el circuito hidráulico existente en el módulo de eyección del cartucho Dimatix DMC-11610.

El Módulo de almacenamiento donde se encuentra ubicado el depósito de tinta por otra parte, se une al módulo de eyección mediante la unión estanca a través de un sistema provisto de una junta tórica u o-ring en donde los tramos G y H establece una conexión en serie. De esta forma, el circuito hidráulico del cartucho se completa. Por último, cabe destacar que, pese a que el sistema calefactor se encuentra ubicado sobre la cámara de bombeo y por conducción térmica éste afecta a todo el módulo de eyección, afín de simplificar los cálculos se ha considerado que su efecto será global en el cartucho.

Al igual que en apartados anteriores y como se ha podido apreciar a través del esquema, la alimentación de las distintas cámaras de bombeo se realiza mediante el tramo F, de modo que en la modelización mono-dimensional planteada donde la posición del fluido respecto un punto inicial se ha denotado con la letra  $x$  se hará uso de la notación  $x_{ji}$  para representar la posición del fluido respecto al punto  $j$  de la cámara de bombeo  $i$  donde  $j = 1, \dots, 10$  y  $i = 1, \dots, 16$  despreciando como ya se ha comentado los tramos 11 y 12.

Por último, nótese que en el planteamiento actual a diferencia del anterior divide la cámara de bombeo en dos tramos haciendo distinción entre el tramo a la derecha del punto 0 y a la izquierda del mismo. En dicho punto cero tendremos en consideración la compresibilidad de la tinta siendo éste el punto en entrada de la excitación.

**Datos, dimensiones, particularidades y otras consideraciones tenidas en cuenta:**

Tramo Ni(1-2): (Nozzle):	Tramo Ai (2-3) (Amortiguador):	Tramo CBDi (3-4) (Cámara de Bombeo):	Tramo Ri1 (4-5) (Obstrucción 1):	Tramo Ai1 (5-6) (Desahogo 1):
$H = 31 \mu\text{m}$ $b_0 = 10,50 \mu\text{m}$ $b_H = 30,25 \mu\text{m}$ $\beta = 32,5011^0$ $\theta = 58,2405^0$ $\varnothing_N = 21 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_N = 31 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Delta Z_n = 0 \text{ m}$ $\Sigma(L_A/\varnothing_A)_i = 9,4174$	$\varnothing_A = 136.5554 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_A = 551 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Delta Z_2 = 31 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$\varnothing_{CB} = 86.6859 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_{CB} = 1970 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Delta Z_{CB} = 609,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $C_{CB} = 1500 \text{ m/s}$ $\Sigma(L_{CBD}/\varnothing_{CBD})_i = 30$	$\varnothing_{R1} = 80.5596 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_{R1} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Delta Z_{CB} = 609,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$\varnothing_{A1} = 86.6859 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_{A1} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Delta Z_{CB} = 609,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

Tramo R2i (6-7) (Obstrucción 2)	Tramo A2i (7-8) (Desahogo 2):	Tramo Di (8-9) (Canal de conexión 1):	Tramo Ei (9-10) (Canal de conexión 2):
$\varnothing_{R2} = 82.9306 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_{R2} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Delta Z_{CB} = 609,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$\varnothing_{A2} = 86.6859 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_{A2} = 225 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Delta Z_{CB} = 609,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Sigma(L_{A2}/\varnothing_{A2})_i = 30$	$\varnothing_D = 122.8595 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_D = 551 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Delta Z_{CB} = 609,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Sigma(L_D/\varnothing_D)_i = 30$	$\varnothing_E = 130.6631 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_E = 664,50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Delta Z_9 = 175 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Sigma(L_E/\varnothing_E)_i = 3$

Tramo F (10-11) (Canal de Alimentación):	Tramo G (11-12) (C. de conex. al depósito 1):	Tramo H (12-13) (C. de conex. al depósito 2):	Tramo I (13-DT) (Depósito de tinta presurizado):
$\varnothing_F = 1575 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_F = 2.088,8211 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $\Delta Z_9 = 175 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $C_F = 1200 \text{ m/s}$	$\varnothing_G = 1575 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_G = 10,20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $\Delta Z_{11} = 405 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$\varnothing_H = 3000 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ $L_H = 19,769 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $\Delta Z_{12} = 10,20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$R_{V_{DT}}(t), O_{V_{DT}}(t), S_{V_{DT}}(t)$ $L_{DT} = 19,80 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ $V_{DT} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ $V_{DA} = 24,267,07 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$ $V_T = 25,767,07 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$ $\Delta Z_{13} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $H_T = 55 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

**Tabla 6:** Datos y dimensiones constructivos del circuito hidráulico de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia].

Por otro lado, se ha considerado al igual que en los casos mono-nozzle y multi-nozzle descritos anteriormente, los desplazamientos son consecuencia directa de la presión y en consecuencia, es ésta la que induce el sentido del desplazamiento, y centrándonos en la cámara de bombeo consideraremos positiva los desplazamientos fuera de estas y negativas en caso contrario. Cabe destacar también, que como se ha podido observar en las imágenes tomadas en el microscopio SEM de las cámaras de bombeo, no encontramos

ante conductos de secciones cuadradas o en su defecto, rectangulares, y por tanto en la modelización de la dinámica del fluido se ha recurrido al diámetro hidráulico de los mismos, es decir:

$$\emptyset_H = \frac{2ab}{(a + b)} \quad 3. 216$$

Donde  $a$  y  $b$  representan las dimensiones de cada conducto.

Por otra parte, en esta primera modelización no se tendrá en cuenta la deformación que genera el piezoeléctrico en la membrana superior de la cámara de bombeo incrementando el volumen de ésta, por el contrario, consideraremos que en el nodo 0 el sistema sufre una entrada o salida de volumen, siendo dicho volumen de entrada dependiente del tiempo.

Recurriendo a la acústica y por medio de la compresibilidad del fluido podemos establecer que el incremento de presión que ésta, entrada o salida de masa en el sistema por el nodo 0, vence a la oposición que ejercen las sucesivas conducciones aguas debajo de la cámara de bombeo impulsando el fluido. La aceleración por tanto que experimenta el fluido es producto del incremento de presión generado en el sistema, que posteriormente consideraremos fruto de la deformación de los actuadores y como ya sabemos, las características de las conducciones (geometría y rigidez) fomentará que el fluido tome un sentido u otro en el interior del sistema. Siendo a su vez las condiciones reológicas de la tinta (densidad, viscosidad, compresibilidad, tensión superficial, etc.) las que condicionarán la respuesta del sistema o lo que es lo mismo, condicionará la excitación del mismo afín de obtener una respuesta deseada.

Cabe destacar por otra parte que en esta primera modelización, consideraremos como flexibles únicamente las cámaras de bombeo y el conducto de alimentación siendo éste último constituido por tres materiales distintos (resina epoxi del elemento columna, dióxido de silicio del sistema de bombeo y una lámina adhesiva flexible de PVC plastificado o de PP, que constituye el precinto protector del canal de conexión al depósito) por tanto, desde un punto de vista de la rigidez del mismo y de su influencia en la propagación de las ondas sonicas recurriremos a la velocidad del sonido en dicho tramo como un parametro de diseño ajustable en la modelización.

Finalmente y pese a que en la modelización de los fenomenos transitorios generados por la excitación del sistema no son tenidos en cuenta por ser un modelo monodimensional, se ha de resaltar que el canal de conexión al depósito constituido por el tramo final del módulo de eyección y del tramo inicial del módulo de almacenamiento, la velocidad de propagación de las ondas sónicas se ven afectadas por la compresibilidad del o-ring (junta tórica).

Por último en el depósito de tinta, se ha observado que éste es flexible más no elástico, al ser una bolsa flexible de poliuretano presurizada en el interior del Módulo de almacenamiento. Desde el punto de vista de la propagación de las ondas sonicas, éstas deforman al depósito fruto de la compresibilidad del aire que le rodea sin que éste (la bolsa

flexible) se oponga a dicho desplazamiento, por tanto la atenuación de las ondas se ve en parte afectadas por dicha compresibilidad del aire reduciendo su velocidad propagación y fomentando su atenuación con más rapidez.

De forma que, continuando con la modelización desde un punto de vista netamente hidráulico con la acústica acoplada en el que no se involucra el comportamiento electromecánico de los actuadores, es decir, en el que se desconoce la función de transferencia que relaciona la excitación eléctrica de los piezoeléctricos con la deformación de éstos y en consecuencia con el aumento o reducción del volumen en las cámaras de bombeo encargadas de desplazar e impulsar el fluido a través de las distintas conducciones sistema. La modelización del sistema puede llevarse a cabo bajo una primera aproximación, considerando una relación proporcional entre la variación del volumen de la cámara de bombeo y la variación del voltaje aplicado. De manera que, partiendo de dicha suposición tenemos que a 0V el volumen de la cámara de bombeo (volumen inicial) es de 11.6266 pL mientras que a un máximo voltaje (35V) consideremos dicho volumen sufre una reducción del 0.05%.

Así pues, considerando la variación temporal del volumen en el interior de las cámaras de bombeo definida como  $\Delta V_0$  y proporcional en magnitud y tiempo a la variación del voltaje aplicado en la excitación de los PZT's de modo que aplicando el principio de conservación de la masa por tramos y bajo la máxima: *Todo lo que entra ha de salir y si no, todo lo que ahora hay es lo que había menos lo que ha salido o entrado*, tenemos que:

Nodos	Conductos	Conservación de la masa
1i-2i	Tramo Ni (Nozzle)	$\Delta V_{Ni} = S_2 x_{2i} - S_1 x_{1i}$
2i-3i	Tramo Ai (Amortiguador, conducto de salida)	$\Delta V_{Ai} = S_3 x_{3i} - S_2 x_{2i}$
3i-4i	Tramo CBi (Cámara de Bombeo)	$\Delta V_{CBi} = \Delta V_{0i} - S_3 x_{3i} - S_4 x_{4i}$
4i-5i	Tramo R1i (Obstrucción 1)	$\Delta V_{R1i} = S_4 x_{4i} - S_5 x_{5i}$
5i-6i	Tramo A1i (Desahogo 1)	$\Delta V_{A1i} = S_5 x_{5i} - S_6 x_{6i}$
6i-7i	Tramo R2i (Obstrucción 2)	$\Delta V_{R2i} = S_6 x_{6i} - S_7 x_{7i}$
7i-8i	Tramo A2i (Desahogo 2)	$\Delta V_{A2i} = S_7 x_{7i} - S_8 x_{8i}$
8i-9i	Tramo Di (Canal de conexión 1)	$\Delta V_{Di} = S_8 x_{8i} - S_9 x_{9i}$
9i-10i	Tramo Ei (Canal de conexión 2)	$\Delta V_{Ei} = S_9 x_{9i} - S_{10} x_{10i}$
10i-11	Tramo F (Canal de Alimentación)	$\Delta V_F = S_{10} \sum_{i=1}^{16} x_{10i} - S_{11} x_{11}$

3. 217

De igual manera, con el objetivo de plantear las ecuaciones que validarán el principio de conservación de la cantidad de movimiento por nodos, debido a que en ésta modelización considera únicamente la propagación de las ondas sónicas, hemos de plantear una relación

que tenga en cuenta como el incremento en los tramos flexibles afecta la presión existente en el mismo. De modo que bajo la máxima: *el decremento de volumen supone un incremento de presión debido a la compresibilidad del medio y en el caso contrario ante un incremento de presión en el interior de un recipiente y ante un medio incompresible será el contenedor el que experimentará la deformación del mismo*, tenemos que, haciendo uso de la expresión 3. 104 en donde se relaciona los incrementos de volumen producidos en los tramos con incrementos de presión, a través del módulo de compresibilidad del medio ( $K_b$ ), podemos establecer que  $\forall$  tramo flexible:

$$P_{ji} = \frac{\rho_0 c_j^2}{V_j} \Delta V_{ji} \quad 3. 218$$

Siendo como ya se ha comentado  $j$  el tramo ( $j = 1, \dots, 10$ ) e  $i$  la cámara activa ( $i = 1, \dots, 16$ ) y donde la velocidad del sonido ( $c_j$ ) es un parámetro de diseño, el cual se verá ajustado en la experimentación.

Por otra parte, además de las presiones inducidas por la variación del volumen, es necesario considerar la existencia de otras presiones como son; la presión debido a la altura piezométrica y la presión capilar. Esta última, consecuencia de la tensión superficial del fluido o tinta utilizada, la geometría del nozzle u orificio de salida y la mojabilidad del mismo.

### Presión capilar en los nozzles

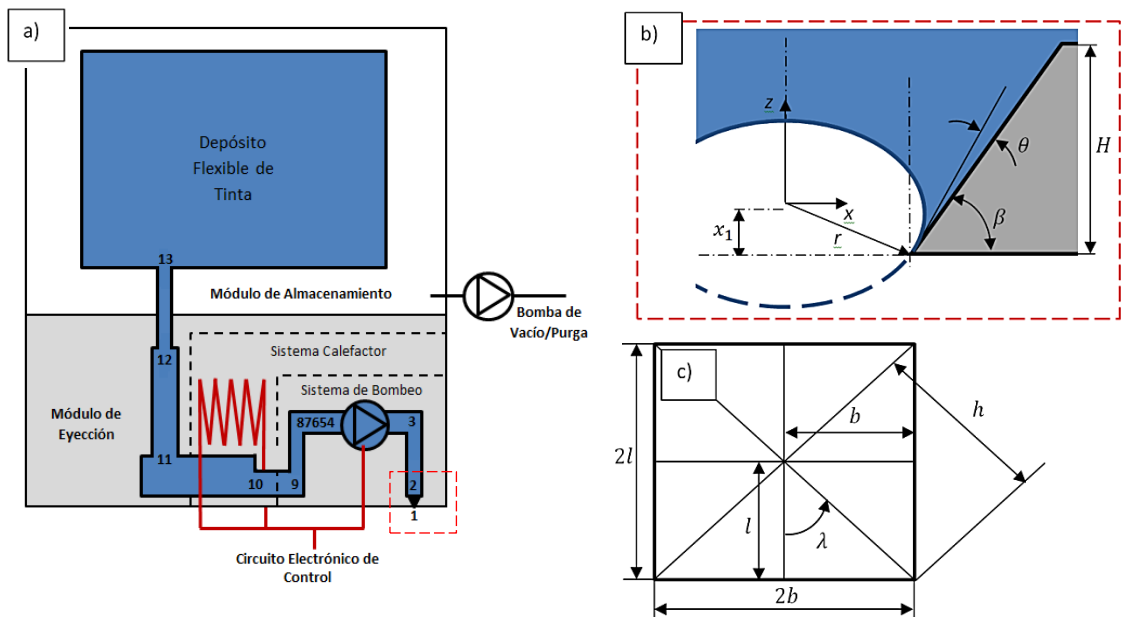
En el caso que nos ocupa, los nozzles de los cartuchos Dimatix DMC-11610 poseen forma de tobera de sección cuadrada (ver Figura 157.c y Figura 160.b). El hecho de encontrarnos ante un conducto de sección variable dificulta los cálculos y al ser ésta de sección cuadrada aún más. Sin embargo, con el objetivo de simplificar los cálculos a continuación consideraremos ésta sección cuadrada como circular. Por tanto, si bien la presión capilar puede hallarse a través de la ecuación de Young-Laplace donde la mojabilidad se define como:  $\mu = \cos(\theta_y)$  y siendo  $\theta_y$  el ángulo de contacto (Eq. 3. 340). En este sentido recurriendo a la fuerza capilar tenemos:

$$F_{cap} = (2b + 2l) \gamma \cos(\theta_y) \text{sen}(\beta) = (2\pi R) \gamma \cos(\theta_y) \text{sen}(\beta) \quad 3. 219$$

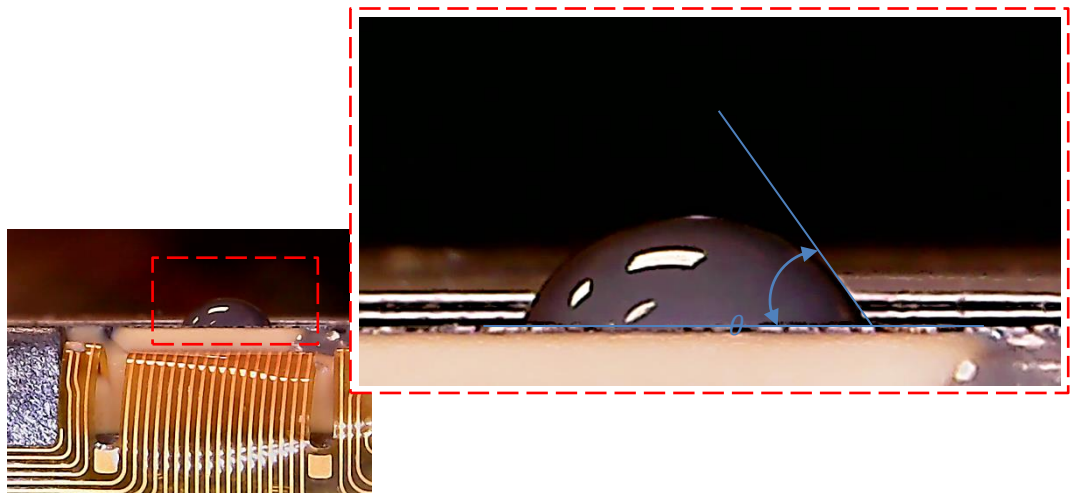
Donde  $(2b + 2l)$  representa el perímetro de una sección rectangular,  $R$  el radio hidráulico equivalente,  $\gamma$  la tensión superficial de la tinta, y  $\beta$  el ángulo de inclinación de la tobera, siendo todos ellos valores fijos bajo una temperatura y una posición del fluido constantes.  $\theta_y$  dependiente también de la temperatura, por otro lado, representa el ángulo de contacto y éste define la mojabilidad de la tobera por la tinta, que considerando a ésta como hidrófila ( $\theta_y < 90$ ) y por tanto su superficie es mojada por la suspensión de partículas de plata (la tinta) podemos decir que la presión capilar en los nozzle en estado de reposo puede expresarse como:

$$P_{cap} = F_{cap}/S \quad 3. 220$$

Siendo  $S$  el área interfacial del domo de base cuadrada.



**Figura 164:** Representación esquemática del cartucho Dimatix DMC-11610 a). Vista lateral y en planta amplia de la sección transversal del nozzle i b) y de dicho nozzle c) [Fuente: Elaboración propia].



**Figura 165:** Mojabilidad de la cámara de bombeo de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) por la tinta ANP silverjet DGP HRA a través de la determinación del ángulo de contacto estático ( $\theta_y = 58,2405^\circ$ ) [Fuente: Elaboración propia].

Sin embargo, la situación representada a través de la Figura 164 constituye el caso donde la presión existente en el interior del conducto de salida es tal que se ve compensada por la presión capilar, alcanzando el equilibrio (situación descrita por la ley de Jurin; Ec. 3. 343) haciendo que el menisco adopte una forma de domo de base cuadrada cuya superficie libre



en contacto con el aire representa una superficie convexa. Dicha situación de equilibrio por otro lado, es alcanzada gracias a la presurización del módulo de almacenamiento ya que como se ha podido apreciar en apartados anteriores en donde se describe la fenomenología asociada al goteo a través de la ley de Tate, dicha presurización hace posible compensar la presión piezométrica modificando las condiciones a las que se encuentran sometidos los nozzles y en consecuencia se evita que en éste se genere flujo (goteo), condicionando a su vez la forma y posición del menisco en estado de reposo.

Cabe destacar por otro lado que, cuando el sistema se encuentra en funcionamiento (durante la impresión) la excitación controlada de lo piezoeléctricos modifica la presión en el interior del nozzle modificando la convexidad del menisco y la posición del fluido respecto del mismo ( $x_1$ ), que debido a ser de sección variable acelera el flujo y modifica la magnitud de la presión capilar magnificándola o disminuyéndola en función a dicho desplazamiento.

De forma que, hemos de establecer una relación que tenga en cuenta dicha eventualidad diferenciando lo que ocurre aguas arriba de dicho orificio de salida con lo que ocurre una vez fuera de éste, es decir:

$$\begin{aligned} r \cdot \text{sen}(\beta + \theta) \leq x_1 < H - [r \cdot \text{sen}(\beta + \theta)] &\rightarrow \text{sección variable} \\ x_1 < [r \cdot \text{sen}(\beta + \theta)] &\rightarrow \text{sección cte.} \end{aligned} \quad 3. 221$$

Por otra parte, también se ha de decir que la convexidad del menisco cambia con la presión existente en el interior nozzle más no su posición y es importante destacar que si bien el efecto capilar en los nozzles, se hace menor a medida que la posición del flujo asciendo en su interior. El volumen de tinta contenido en el interior de dicha tobera, supone más de 5 veces el volumen de las gotas eyectas, lo cual aleja la posibilidad de que la posición del flujo ( $x_1$ ) supere la altura de la tobera durante la fase de retroceso tras la eyección de las gotas (volúmenes discreto de tinta) y por tanto, genere cambio brusco en la presión capilar aguas arriba del mismo a consecuencia de un cambio en la sección.

De modo que, que la presión capilar puede definirse de forma similar a la expresión 3. 192 siendo la posición inicial de fluido  $x_1(t = 0) = r \cdot \text{sen}(\beta + \theta)$  y siendo ésta nuestra cota cero de referencia como:

$$\begin{aligned} \text{a) } P_{cap}(x_1 < 0) &= \left[ \frac{8\pi\gamma}{S_0 + \left(\frac{S_H - S_0}{H}\right)x_1} \right] x_1 \\ \text{b) } P_{cap}(x_1 \geq 0) &= \left[ \frac{8\pi\gamma}{S_0} \right] x_1 \end{aligned} \quad 3. 222$$

Pese a ello, en ésta primera modelización del cartucho Dimatix DMC-11610 utilizaremos la expresión 3. 222.b en la definición dicha presión capilar.

De manera que, afín de no incrementar la complejidad de los cálculos nos es posible ahora introducir la presión capilar en el planteamiento de las condiciones de equilibrio para cada nodo existentes en el interior de cartucho analizado y siendo éstas necesarias en la

modelización del comportamiento dinámico de las tintas tras la excitación de los piezoeléctricos.

Ecuaciones de equilibrio en los distintos nodos:

Nodos	Balace de fuerzas
1	$(\rho_0 L_N S_N) \ddot{x}_{1i} + (8\pi\mu L_N) \dot{x}_{1i} = (P_{Ni} - P_{CAP} - P_A) S_N$
2	$(\rho_0 L_A S_A) \ddot{x}_{2i} + (8\pi\mu L_A) \dot{x}_{2i} = (P_{Ai} - P_{Ni}) S_A$
3	$(\rho_0 L_{CBD} S_{CB}) \ddot{x}_{3i} + (8\pi\mu L_{CBD}) \dot{x}_{3i} = (P_{CBi} - P_{Ai}) S_{CB}$
4	$(\rho_0 L_{CBI} S_{CB}) \ddot{x}_{4i} + (8\pi\mu L_{CBI}) \dot{x}_{4i} = (P_{CBi} - P_{R1i}) S_{CB}$
5	$(\rho_0 L_{R1} S_{R1}) \ddot{x}_{5i} + (8\pi\mu L_{R1}) \dot{x}_{5i} = (P_{R1i} - P_{A1i}) S_{R1}$
6	$(\rho_0 L_{A1} S_{A1}) \ddot{x}_{6i} + (8\pi\mu L_{A1}) \dot{x}_{6i} = (P_{A1i} - P_{R2i}) S_{A1}$
7	$(\rho_0 L_{R2} S_{R2}) \ddot{x}_{7i} + (8\pi\mu L_{R2}) \dot{x}_{7i} = (P_{R2i} - P_{A2i}) S_{R2}$
8	$(\rho_0 L_{A2} S_{A2}) \ddot{x}_{8i} + (8\pi\mu L_{A2}) \dot{x}_{8i} = (P_{A2i} - P_{Di}) S_{A2}$
9	$(\rho_0 L_D S_D) \ddot{x}_{9i} + (8\pi\mu L_D) \dot{x}_{9i} = (P_{Di} - P_{Ei}) S_D$
10	$(\rho_0 L_E S_E) \ddot{x}_{10i} + (8\pi\mu L_E) \dot{x}_{10i} = (P_{Ei} - P_{Fi}) S_E$
11	$(\rho_0 L_F S_F) \ddot{x}_{11i} + (8\pi\mu L_F) \dot{x}_{11i} = (P_{Fi} - P_{Bi}) S_F$

3. 223

Como se puede apreciar en el conjunto de ecuaciones anteriores en donde a través de la presión se establece las ecuaciones de equilibrio, validando el principio de conservación de la cantidad de movimiento, además de la inercia y las fuerzas disipativas, en ellas se ha involucrado la presión capilar en el nozzle y la presión de compensación de la presión piezométrica ( $P_B$ ) (ver Figura 163) y la presión atmosférica ( $P_A$ ).

De modo que, mediante la combinación de las ecuaciones 3. 217, 3. 218 y 3. 223 se establece un sistema de ecuaciones capaz de satisfacer: el principio de la conservación de la masa, el de conservación de la cantidad de movimiento, y ahora tras la introducción del término disipativo (Mediante la ecuación de Poiseuille (Régimen laminar)), el principio de conservación de la energía. De forma que nos encontramos ante un sistema de 161 ecuaciones diferenciales de segundo orden no homogéneas.

Es necesario resaltar que bajo ésta interpretación y analizando los fenómenos transitorios que se producen tras la excitación de los piezoeléctricos y en consecuencia tras el incremento del volumen en las cámaras de bombeo, es decir, durante el proceso de impresión. Los chorros libres de posición  $x_{1i}$  oscilan periódicamente hasta amortiguarse, lo cual como se ha comentado no es cierto puesto que, tras la desaceleración del flujo en el interior del nozzle, el chorro libre mantienen su inercia, y fomentado por la tensión superficial

y por el principio de conservación de la masa dichos chorros libres pertenecientes a cada nozzle activo se desintegran generándose la eyección de las gotas, por tanto, nos encontramos ante un sistema que pierde masa en función de la excitación que este recibe.

En un estado ideal en reposo donde el depósito de tinta se encuentra completamente lleno (1,5 ml) a  $t_0$  dicho volumen comenzará a disminuir a medida que el sistema comience a imprimir y en consecuencia a eyectar gotas fuera del sistema, validándose el principio de conservación de la masa y por tanto, estableciéndose un flujo de salida expresable como:

$$\dot{V} = \sum_i^n V_{gota\ i} \cdot f_i \quad 3. 224$$

Donde el caudal de salida  $\dot{V}$  puede definirse como el volumen de cada gota eyectada ( $V_{gota}$ ) por la frecuencia de eyección ( $f$ ) de cada uno de los nozzles activos ( $i$ ) sumados.

Este razonamiento nos lleva a establecer que la función de las presiones positivas o negativas en el módulo de almacenamiento, es la de evitar el goteo de las tintas a través de los nozzles cuando estos estén en reposo, en donde a medida que el depósito de tinta reduce su volumen a su vez incrementa el volumen de aire presurizado que lo rodea a este, es decir:

- Se requerirá una presión negativa en el módulo de almacenamiento allí donde las tintas por ser muy poco viscosas y/o por tener una tensión superficial muy baja con la cual la presión capilar no es suficiente para mantener contenida a ésta. Así se evitará en condiciones normales que la tinta gotee o que gotee debido a las fuerzas inerciales generadas durante el desplazamiento del cabezal de impresión.
- Se requerirá una presión positiva allí donde las tintas sean más viscosas y/o tengan una alta tensión superficial. De este modo, se evita que la tinta ascienda por capilaridad por el interior del nozzle y se facilita su desplazamiento al establecer unas condiciones que contribuyan a la salida del mismo por compresión del depósito flexible de tinta.

A su vez, se ha de traer a colación el proceso de purga. Dicho proceso se lleva a cabo antes de cada impresión y cuya función, es la destaponar los posibles nozzles obturados afín de asegurar con ello que el sistema se encuentra en las condiciones óptimas de funcionamiento. Dicho proceso como ya se ha comentado se lleva a cabo gracias a un exceso de la presión en el interior del Módulo de almacenamiento, es decir, comprimiendo el depósito flexible de tinta con una fuerza tal que impulse el fluido a través de todas las conducciones hasta que éste sea eyectado con la fuerza suficiente para romper las posibles obstrucciones.

Continuando con la modelización a continuación se desarrollan el sistema de ecuaciones mostrado anteriormente a través de los distintos nodos de control bajo la hipótesis donde todos los tramos son rígidos excepto las cámaras de bombeo y el canal de alimentación.

Nodos	Balace de fuerzas
1	$(\rho_0 L_N) \ddot{x}_{1i} + \left( \frac{8\pi\mu(L_N + L_N^*)}{S_N} \right) \dot{x}_{1i} + \left( \frac{8\pi\gamma}{S_N} \right) x_{1i} = 0$
2	$(\rho_0 L_A) \ddot{x}_{2i} + \left( \frac{8\pi\mu(L_A + L_A^*)}{S_A} \right) \dot{x}_{2i} = 0$
3	$(\rho_0 L_{CBD}) \ddot{x}_{3i} + \left( \frac{8\pi\mu(L_{CBD} + L_{CBD}^*)}{S_{CB}} \right) \dot{x}_{3i} + \left( \frac{\rho_{0C_{CB}^2 S_3}}{V_{CBD}} \right) x_{3i} + \left( \frac{\rho_{0C_{CB}^2 S_4}}{V_{CBD}} \right) x_{4i} = \left( \frac{\rho_{0C_{CB}^2 S_{CB}}}{V_{CBD}} \right) \Delta V_{0i}$
4	$(\rho_0 L_{CBI}) \ddot{x}_{4i} + \left( \frac{8\pi\mu(L_{CBI} + L_{CBI}^*)}{S_{CB}} \right) \dot{x}_{4i} + \left( \frac{\rho_{0C_{CB}^2 S_{CB}}}{V_{CBD}} \right) x_{3i} + \left( \frac{\rho_{0C_{CB}^2 S_{CB}}}{V_{CBD}} \right) x_{4i} = \left( \frac{\rho_{0C_{CB}^2 S_{CB}}}{V_{CBD}} \right) \Delta V_{0i}$
5	$(\rho_0 L_{R1}) \ddot{x}_{5i} + \left( \frac{8\pi\mu(L_{R1} + L_{R1}^*)}{S_{R1}} \right) \dot{x}_{5i} = 0$
6	$(\rho_0 L_{A1}) \ddot{x}_{6i} + \left( \frac{8\pi\mu(L_{A1} + L_{A1}^*)}{S_{A1}} \right) \dot{x}_{6i} = 0$
7	$(\rho_0 L_{R2}) \ddot{x}_{7i} + \left( \frac{8\pi\mu(L_{R2} + L_{R2}^*)}{S_{R2}} \right) \dot{x}_{7i} = 0$
8	$(\rho_0 L_{A2}) \ddot{x}_{8i} + \left( \frac{8\pi\mu(L_{A2} + L_{A2}^*)}{S_{A2}} \right) \dot{x}_{8i} = 0$
9	$(\rho_0 L_D) \ddot{x}_{9i} + \left( \frac{8\pi\mu(L_D + L_D^*)}{S_D} \right) \dot{x}_{9i} = 0$
10	$(\rho_0 L_E) \ddot{x}_{10i} + \left( \frac{8\pi\mu(L_E + L_E^*)}{S_E} \right) \dot{x}_{10i} + \sum_{i=1}^{16} \left( \frac{\rho_{0C_F^2 S_F}}{V_{CBD}} \right) x_{10i} - \left( \frac{\rho_{0C_F^2 S_F}}{V_{CBD}} \right) x_{11} = 0$
11	$(\rho_0 L_F) \ddot{x}_{11i} + \left( \frac{8\pi\mu(L_F + L_F^*)}{S_F} \right) \dot{x}_{11i} + \left( \frac{\rho_{0C_F^2 S_F}}{V_{CBD}} \right) x_{11} - \sum_{i=1}^{16} \left( \frac{\rho_{0C_F^2 S_F}}{V_{CBD}} \right) x_{10i} = 0$

3. 225

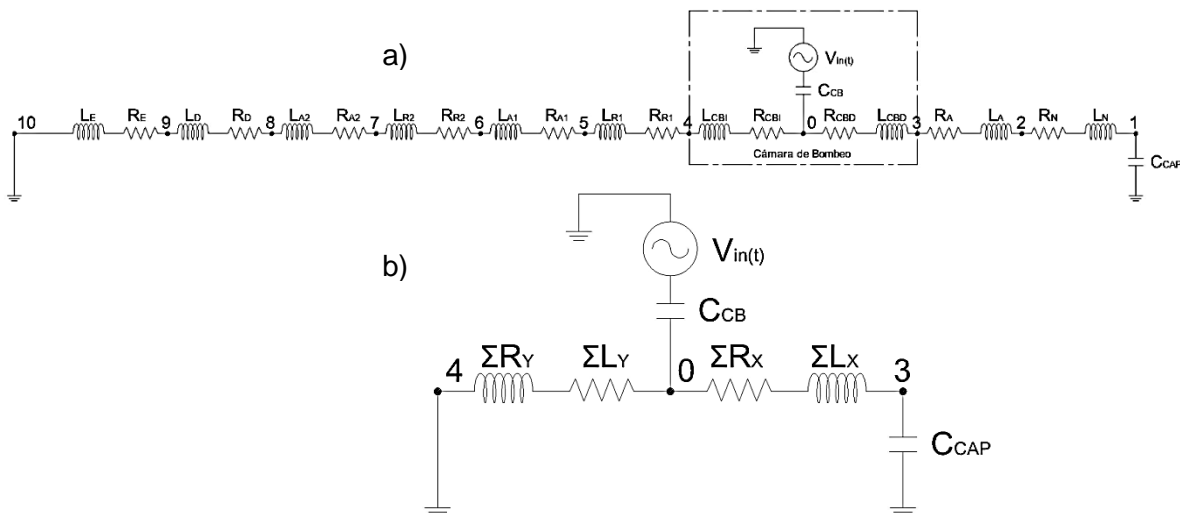
Nótese que al término disipativo se les ha añadido la longitud equivalente a las pérdidas de carga secundarias existentes en cada tramo, por otra parte, y como puede apreciarse, tras considerar a todos los tramos como rígidos o no deformables excepto la cámara de bombeo y el conducto de alimentación, el sistema de ecuaciones anterior puede verse simplificado y reducido en dimensión. De hecho, si interpretamos al sistema dinámico anterior como un circuito eléctrico RLC análogo y hacemos uso de las leyes de Kirchhoff dicha simplificación se hace más evidente.

De modo que, nos encontramos ante un sistema dinámico que a través de la acústica describe el movimiento del fluido y que en notación matricial podemos definirlo como:  $[M][\ddot{x}] + [C][\dot{x}] + [K][x] = [F(t)]$  y éste a su vez si lo interpretamos ahora como:  $[L][\ddot{q}] + [R][\dot{q}] + [1/c][q] = [V(t)]$  bajo la analogía Fuerza=Voltaje y Volumen=Carga tenemos que el sistema anterior puede ahora describirse como:

Nodos	Balace de fuerzas
1	$L_N \ddot{q}_{11} + R_N \dot{q}_{11} + \left(\frac{1}{C_N}\right) q_{11} = 0$
2	$L_A \ddot{q}_{2i} + R_A \dot{q}_{2i} = 0$
3	$L_{CBD} \ddot{q}_{3i} + R_{CBD} \dot{q}_{3i} + \left(\frac{1}{C_{CBD}}\right) q_{3i} + \left(\frac{1}{C_{CBD}}\right) q_{4i} = \left(\frac{1}{C_{CBD}}\right) q_{0i}$
4	$L_{CBI} \ddot{q}_{4i} + R_{CBI} \dot{q}_{4i} + \left(\frac{1}{C_{CBI}}\right) q_{4i} + \left(\frac{1}{C_{CBI}}\right) q_{3i} = \left(\frac{1}{C_{CBI}}\right) q_{0i}$
5	$L_{R1} \ddot{q}_{5i} + R_{R1} \dot{q}_{5i} = 0$
6	$L_{A1} \ddot{q}_{6i} + R_{A1} \dot{q}_{6i} = 0$
7	$L_{R2} \ddot{q}_{7i} + R_{R2} \dot{q}_{7i} = 0$
8	$L_{A2} \ddot{q}_{8i} + R_{A2} \dot{q}_{8i} = 0$
9	$L_D \ddot{q}_{9i} + R_D \dot{q}_{9i} = 0$
10	$L_E \ddot{q}_{10i} + R_E \dot{q}_{10i} + \sum_{i=1}^{16} \left(\frac{1}{C_F}\right) q_{10i} - \left(\frac{1}{C_F}\right) q_{11} = 0$
11	$L_F \ddot{q}_{11} + R_F \dot{q}_{11} + \left(\frac{1}{C_F}\right) q_{11} - \sum_{i=1}^{16} \left(\frac{1}{C_F}\right) q_{10i} = 0$

3. 226

Donde ahora  $L$  representa la Inductancia,  $R$  la resistencia y  $C$  la capacitancia de cada tramo sistema, cuya representación esquemática puede apreciarse en las imágenes de las Figura 166 y Figura 167.



**Figura 166:** Representación del circuito eléctrico análogo al sistema dinámico que modeliza el comportamiento del fluido en el interior de cada cámara de bombeo del cartucho Dimatix DMC-11610 bajo esta primera interpretación basada unicamente en la hidráulica y en la acústica (a) y simplificación del mismo (b) [Fuente: Elaboración propia].

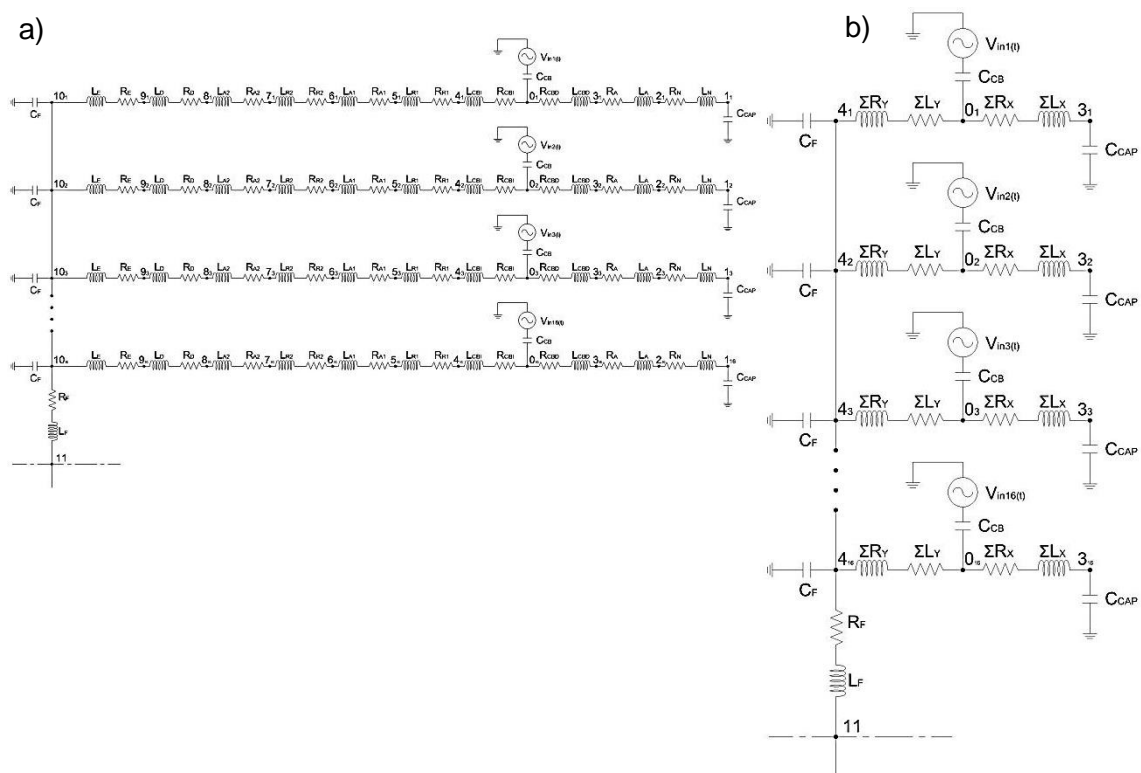
En el esquema eléctrico anterior se representa al sistema dinámico de cada cámara de bombeo interpretado como un circuito eléctrico, con lo cual se puede apreciar que nos encontramos ante un sistema de dos mallas (al estar en serie un conjunto de resistencias y

bobinas) y un único nodo (donde la corriente se bifurca) que al aplicar las leyes de Kirchhoff vemos que el sistema puede definirse como:

$$\sum_{x=1}^3 L_x \ddot{q}_{3i} + \sum_{x=1}^3 R_x \dot{q}_{3i} + \left( \frac{1}{C_{CB}} + \frac{1}{C_{CAP}} \right) q_{3i} + \left( \frac{1}{C_{CB}} \right) q_{4i} = \left( \frac{1}{C_{CB}} \right) q_{0i} \quad 3.227$$

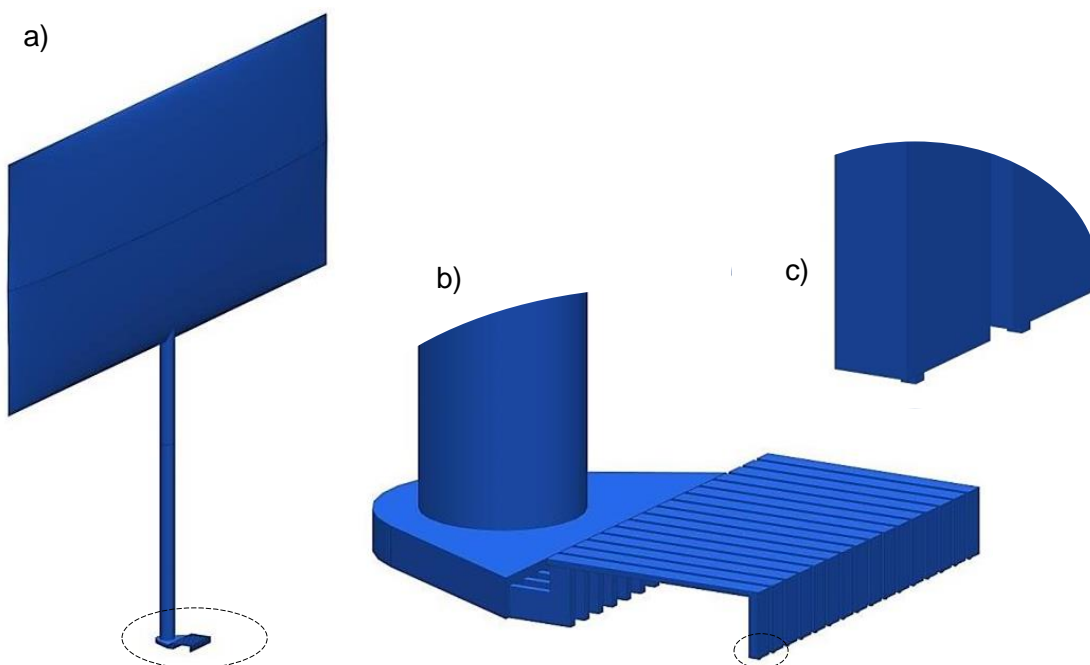
$$\sum_{y=1}^7 L_y \ddot{q}_{4i} + \sum_{y=1}^7 R_y \dot{q}_{4i} + \left( \frac{1}{C_{CB}} \right) q_{4i} + \left( \frac{1}{C_{CB}} \right) q_{3i} = \left( \frac{1}{C_{CB}} \right) q_{0i}$$

De manera que, debido a que se ha considerado a cada uno de los tramos como rígidos y por tanto no se deforman tras un incremento de presión a excepción de las cámaras de bombeo y del canal de alimentación, la dinámica del fluido en el interior del cartucho puede ser modelizado haciendo uso de la acústica mediante un sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden de 33 grados de libertad, que interpretado como un circuito eléctrico puede ser representado como:



**Figura 167:** Representación completa del circuito eléctrico análogo al sistema dinámico que modeliza el comportamiento del fluido en el interior del cartucho Dimatix DMC-11610 bajo esta primera interpretación basada únicamente en la hidráulica y en la acústica a), y esquema simplificado mediante agrupación de elementos en serie b) [Fuente: Elaboración propia].

Por último, a continuación se muestra una representación esquemática completa del circuito hidráulico de los cartuchos analizados. Sin embargo, se ha de resaltar que en ella se han hecho algunas simplificaciones como son: la consideración de los nozzles como elementos de sección constante al igual que los canales de conexión que como se puede apreciar la Figura 159.b (vista frontal del sistema de bombeo y de dichos conductos de conexión en el SEM) éstos no lo son. Por otra parte, el canal de alimentación también se ha visto ligeramente modificado en cuanto a su geometría. El motivo de estas simplificaciones es el de disminuir en la complejidad de los cálculos. Por otra parte se ha de decir que, en la modelización anterior por ser monodimensional se analizan las condiciones existentes en el sistema desde el nozzle hasta el nodo 11 el cual se ubica a finales del tramo F y principios del tramo G o lo que es lo mismo a comienzos del conducto de conexión al depósito 1, es decir, en la base de la columna de mayor diámetro (ver Figura 168.b).



**Figura 168:** Vista tridimensional completa del circuito hidráulico de los cartuchos analizados bajo las adaptaciones pertinentes (a), vista ampliada del sistema de bombeo existente en el módulo de eyección (b) y detalle de los nozzles en forma de tobera de sección cuadrada (c)

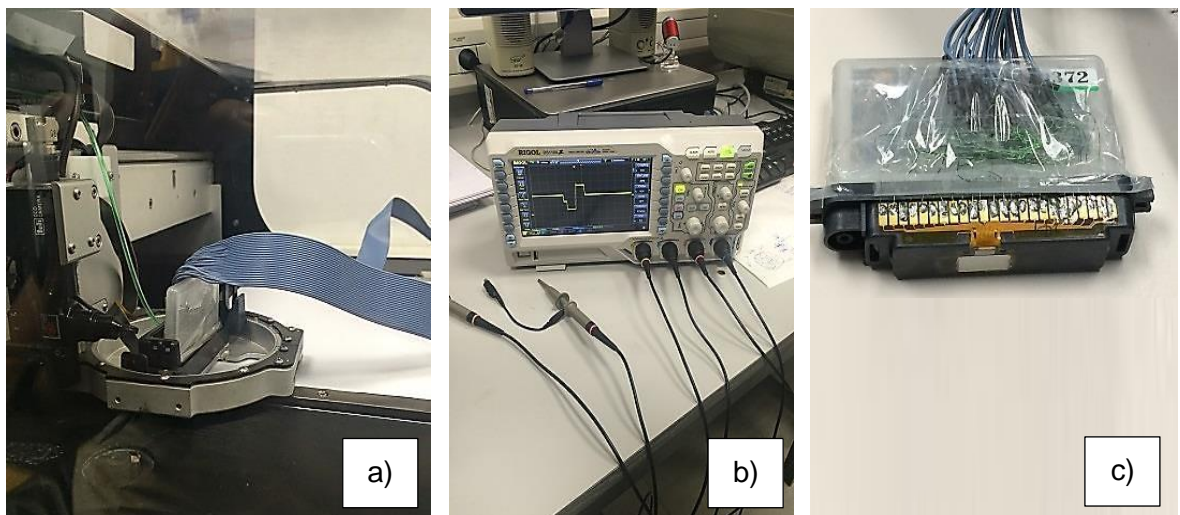
[Fuente: Elaboración propia].

Finalmente, y antes de proseguir con la modelización descrita y analizar la respuesta del sistema, hemos de abordar las características de las señales de excitación, así como las características reológicas de los fluidos o tintas empleadas.

### 2.4.3.3. Características de las señales de excitación y control, empleadas en la modelización

El diseño y construcción de un sistema de impresión bidimensional Inkjet, basado en el uso de cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610 y adaptado a las particularidades del equipo de impresión híbrido multimaterial Nhibrid32D requirió del conocimiento de su funcionamiento y sobre todo de la forma en la que los cartuchos son controlados. En este aspecto, en apartados anteriores hemos descrito a éstos, los cartuchos, basandonos en la hidráulica y acústica para la modelización del comportamiento dinámico del fluido en el interior de los mismos. Ahora en cambio, hemos de abordar como y cuales son las señales necesarias para su control.

Siguiendo con la modelización de los cartuchos descritos, como hemos podido apreciar, la forma en la que los piezoeléctricos son excitados en el interior de las cámaras de bombeo condicionan la forma en la que los fluidos (tinta ANP silverjet DGP HRA) son desplazado por las distintas conducciones en el interior del cartucho hasta ser eyectado fuera de éste. En este sentido, dichas señales de excitación capaces de eyectar gotas de la tinta utilizada de forma satisfactoria, y sin generar gotas satelites, fueron tomadas y medidas inicialmente del equipo de impresión Fujifilm Dimatix DMP-2800 el cual comparte con el equipo Nhibrid32D los mismos cartuchos (ver Figura 169). De esta forma, en principio: *replicando dichas señales, dichos cartucho debían ser capaces de comportarse del mismo modo pudiendo estos ser controlados a voluntad (lo cual no se cumpliría con otras tintas de reología diferente y por este motivo el desarrollo de la presente modelización).*



**Figura 169:** Obtención de las señales de control tomadas del equipo de impresión Fujifilm Dimatix DMP-2800 (a), señal de eyección vista a través del osciloscopio (b) y conexiones soldadas al cartucho DMC-11610 utilizado (c) [Fuente: Elaboración propia].



El conocimiento de las señales de excitación y de las consecuencias que los actuadores existentes en el interior de los cartuchos generan (volumen y velocidad de las gotas eyectadas), ofrece la posibilidad de corroborar los resultados de la modelización desarrollada mediante experimentación. Así como también, tras su validación la extrapolación del mismo a otros equipos, materiales y circunstancias.

De modo que, partiendo de la suposición inicial en la que la función de transferencia entre la señal eléctrica de excitación de los PZT's y las consecuencias que los actuadores desencadenan tras recibir dicha señal eléctrica es proporcional en magnitud y en el tiempo. Cabe destacar que si bien la señal mostrada a través del osciloscopio (Figura 169.b) se encuentra constituida por funciones rampa, ésta difiere de las anteriormente comentadas en múltiples aspectos, como por ejemplo nos encontramos ante una señal constituida por 9 funciones rampa con 4 niveles distintos de tensión.

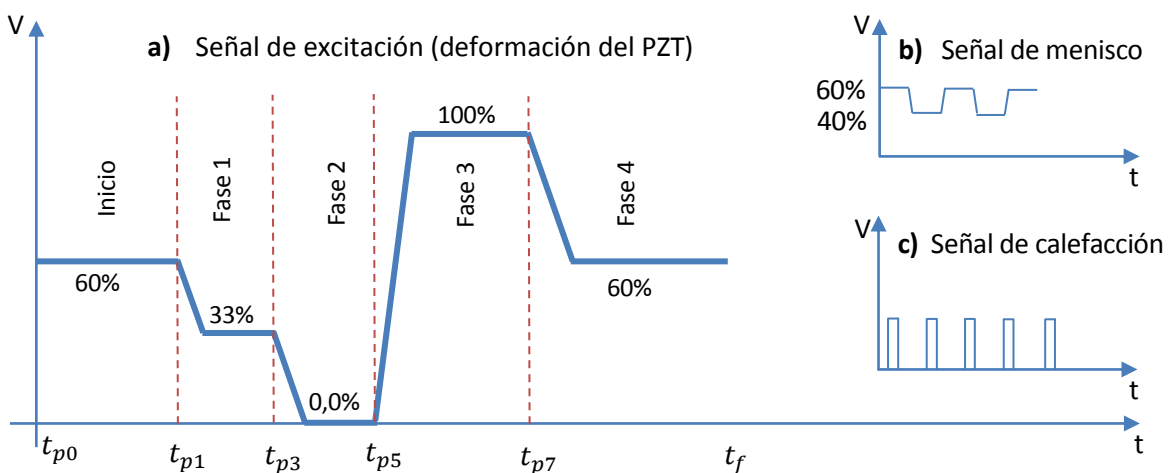
En primer lugar, se ha de resaltar que, bajo esta suposición inicial, un incremento del voltaje supone una deformación proporcional del piezoeléctrico y en consecuencia un incremento del volumen de la cámara de bombeo. De manera que, como se puede apreciar en la señal obtenida a través del osciloscopio (Figura 169.b) y mostrada en detalle en la Figura 170, dicho tren de impulsos parte de una tensión superior a cero, luego en un sistema donde la excitación no tiene polaridad y siendo éste de desplazamiento positivo supone que inicialmente el piezoeléctrico se encuentra deformado y la cámara de bombeo contraída a un volumen inferior al natural de reposo cuando el sistema se encuentra inactivo.

En segundo lugar, nótese que, si la magnitud de la tensión equivale a una deformación proporcional de los piezoeléctricos, la variación temporal de dicha magnitud (la pendiente de la señal entre dos niveles consecutivos o la inclinación de las funciones rampas) supone la velocidad de la variación del volumen de la cámara de bombeo. Lo que nos lleva a resaltar, que dicha señal de excitación constituida por 4 fases al estar inicialmente a una tensión positiva, comienza el ciclo de eyección incrementando el volumen de las cámaras de bombeo (Fase 1 y 2, ver Figura 170.a) y por tanto, creando un flujo negativo (succión) para posteriormente impulsar el fluido aguas abajo de ésta tras contraer dicho volumen (Fase 3). Posteriormente en esta tercera fase, al desacelerarse el fluido (cambio en la pendiente de la señal) se produce en el chorro libre el inicio de la reducción de la sección fomentando la ruptura del mismo al concluir ésta tercera fase. Finalmente, en la fase 4 se produce un cambio en el sentido del flujo tras la eyección de las gotas, en donde el flujo retrocede al interior de la cámara para posteriormente oscilar hasta atenuarse y volver a su estado inicial condicionando la frecuencia de la excitación (separación temporal entre trenes de impulso).

Es importante resaltar el hecho de que la succión al llevarse a cabo en dos fases, supone que el llenado de la cámara de bombeo se realiza de una forma más lenta o lo que es lo mismo, el flujo de succión es inferior, hecho que en principio aleja la posibilidad de cavitaciones en el conducto de conexión (Tramo 2 de la modelización). Por otra parte, el

hecho de que el estado inicial de la cámara de bombeo al inicio de cada ciclo de eyección sea contraída, además de favorecer la salida del fluido aumentado su inercia, hace que el volumen de succión de tinta se reduzca con respecto al volumen desplazado, fenómeno que aleja también la posibilidad de introducir burbujas de aire en el interior de las cámaras de bombeo.

Finalmente, en cuanto a la señal de excitación de los piezoeléctricos cabe destacar que como se puede apreciar en la Figura 170, la magnitud de las mesetas o niveles de las fases, han sido referenciados al voltaje máximo admisible por los piezoeléctricos o en nuestro caso por la fuente de alimentación disponible (35V).



**Figura 170:** Señales de control del cartucho Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia].

El control de los cartuchos por otra parte, a demás de la señal de excitación de los piezoeléctricos responsable de la eyección de las gotas de tinta descrita anteriormente, requiere de dos señales más, una de ellas es la señal de menisco cuya función como ya se ha comentado, es la de mantener vibrando al menisco en las inmediaciones del nozzle afín de que éste no se obstruya debido a la evaporación de los solventes o solidificación de la tinta (ver Figura 170.b). Dicha señal mantienen al menisco vibrando gracias a una pequeña excitación de los piezoeléctricos de las cámaras de bombeo deformandolos ligeramente de forma alterna.

Debido a que la señal del mesico se alterna con la señal de excitación cuando el nozzle en cuestión no va a ser utilizado en la impresión, es decir, no se encuentra activo. Afín de que estas dos señales no deformen el piezoeléctrico generando consecuencias indeseadas, la tensión máxima de la señal de menisco debe coincidir con la tensión de inicio o lo que es lo mismo, con el nivel de tensión de la fase 4 de la señal de excitación. En cuanto a la amplitud de la señal de menisco se ha considerado del 20% a partir de la medición realizada en el equipo DMP-2800.

Finalmente, como tercera señal de control tenemos la señal de calefacción. Dicha señal recurre a la modulación por ancho de pulsos también conocida como PWM para controlar la cantidad de energía que se envía a la resistencia responsable por efecto Joule de calentar el sistema. Esta señal es cuadrada y de tensión máxima 12V (ver Figura 170.c). El sistema de calefactor por otro lado, se completa con un termistor a través del cual el sistema se realimenta y mantienen controlada la temperatura.

### Señales eléctricas de control

Señal sistema Calefactor (Señal PWM)	Excitación del sistema de Bombeo (eyección):	Excitación del sistema de Bombeo (menisco)
$yy = 12V$	$t_{p0} = 0,2048 \cdot 10^{-12} s$	$t_{p0} = 0,2048 \cdot 10^{-12} s$
	$t_{p1} = 15,936 \cdot 10^{-12} s$	$t_{p1} = 0,4048 \cdot 10^{-12} s$
	$t_{p2} = 16,1408 \cdot 10^{-12} s$	$t_{p2} = 6,9248 \cdot 10^{-12} s$
	$t_{p3} = 17,984 \cdot 10^{-12} s$	$t_{p3} = 7,1248 \cdot 10^{-12} s$
	$t_{p4} = 18,314 \cdot 10^{-12} s$	$t_{p4} = 16,1408 \cdot 10^{-12} s$
	$t_{p5} = 23,168 \cdot 10^{-12} s$	$yy = 35 V$
	$t_{p6} = 23,89793 \cdot 10^{-12} s$	$y1 = 60\%$ ;
	$t_{p7} = 28,672 \cdot 10^{-12} s$	$y2 = 40\%$
	$tp = 29,03897 \cdot 10^{-12} s$	
	$tf = 31,872 \cdot 10^{-12} s$	
	$yy = 35 V$	
	$y1 = 33\%$ ;	
	$y2 = 0,01\%$	
	$y3 = 100\%$	
	$y4 = 60\%$	

**Tabla 7:** Resumen de las señales control del Cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610

[Fuente: Elaboración propia].

#### 2.4.3.4. Características de las tintas o fluidos empleados en la modelización

Debido a que en la presente tesis se plantea la modilización del sistema de impresión a partir del conocimiento de la forma en la que se exita al piezoeléctrico y cuyas consecuencias generan la eyección de volúmenes discretos de un fluido en particular. Afín de analizar su funcionamiento y puesto que éste depende de la reología de los mismos, es necesario a priori conocer cuales son las particularidades del fluido eyectado. En este aspecto, se resalta el uso de tintas cargadas de nanopartículas, en concreto de plata, que por sus características son de uso generalizado en aplicaciones electrónicas de la impresión funcional. A continuación se resume algunas de las características generales de las tintas de plata ofrecidas por la empresa ANP (Advanced Nano Products).

Propiedades	Categorías de las tintas				
	DGP 40LT-15C	DGP 40TE-20C	DGP 45HTG	DGH 55LT-25C	DGH 55-HTG
Contenido en sólidos (wt%)		30-35			50-60
Viscosidad (cPs)		10-17 (Ajustable)			7-16
Tensión superficial (mN/m)		35-38 (Ajustable)			27-30
Solventes		TGME(Triethylene glycol monoethyl ether)			Tetradecane
Solventes de Lavado		Solventes Polares: Alcohol Etílico, IPA, etc.			Disolventes no polares: xileno, hexano, octano, etc.
Temperatura de Curado (°C)	120-150	180-200	400-550	250	400-550
Resistividad específica ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )	11-12	5-9	2-3	2,4-3,0	2,0-2,5
Sustrato	Películas de plástico	Vidrio ITO Vidrio Bar	Vidrio ITO Vidrio Bar	Películas de poliimida (Kapton)	Vidrio ITO Vidrio Bar

\* Alcohol y agua puede ser utilizables como solventes de la dispersión a petición del cliente.

\* La viscosidad y la tensión superficial se pueden modificar a petición del cliente.

**Figura 171:** Características reológicas generales de las tintas de plata ANP

[Fuente: Advanced Nano Products].

Entre otras de las características éstas tintas de plata es que ofrecen una excelente conductividad debido a un elevado contenido en sólidos y una buena adhesión en sustratos plásticos y vidrios, permitiendo una amplia gama de temperaturas de curado y sinterización de entre 120°C a 600°C. Por otro lado, su uso es común en la fabricación por impresión Inkjet de electrodos flexible, pantallas táctiles, OLED, dispositivos RFID, etc.

Es importante resaltar que los parámetros reológicos de estas tintas de plata pueden variar ligeramente entre lote y lote, y a su vez pueden ser éstos adaptadas a petición del cliente mediante la adición de otros componentes, es por ello que a continuación y afín reducir dicha variabilidad se establece las condiciones de la tinta ANP silverjet DGP HRA utilizada en la modelización del comportamiento dinámico del cartuchos dimatix.

Tinta:		ANP silverjet DGP HRA	
Cantidad:		100 g	
Densidad:		1.450 kg/m <sup>3</sup>	
Resultados del Análisis		Resultados	Observación
Contenido de Metal (wt%)		34,86	
Viscosidad (cPs)	@100rpm	17,28	Brookfield
	@60rpm	17,4	
	@30rpm	17,5	
Tensión superficial (mN/m)		36	KRUSS
Condiciones de Almacenamiento (5-25°C)			
Observaciones	En la limpieza de los elementos en contacto con la tinta utilizar solventes polares como: Etanol, IPA, Metanol, etc.		

**Figura 172:** Características reológicas de la tinta de plata utilizada en la modelización del comportamiento dinámico de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610

[Fuente: Elaboración propia].

Nótese que la temperatura de curado de las tintas se encuentra por debajo de la temperatura de sinterización de las barbotinas cerámicas utilizadas en el proyecto Nhibrid32D, pese a utilizar cerámicas LTCC cuyo punto de sinterización ronda los 870°C. La

temperatura de fusión de la plata, sin embargo, ronda los 960°C y puesto que se las tintas utilizan nanopartículas inmersas en un medio fluido, éstas sinterizan a una temperatura muy inferior a este límite. Situación que lleva a preguntarse si es posible reproducir un composite impreso en verde constituido por capas de barbotina fotosensible de LTCC alternada con capas (circuitos) de tinta de plata y tras un tratamiento térmico, sinterizar ambos conformando una estructura monolítica con circuitería embebida en su interior y con una geometría tridimensional compleja además de personalizable.

Al margen de este hecho, por otra parte, y como se ha podido apreciar en imágenes anteriores los cartuchos analizados poseen un sistema calefactor con el cual se incrementa la temperatura de los fluidos o tintas afín mejorar su eyectabilidad.

### **Propiedades de la tinta bajo la influencia de la temperatura (Evolución de la densidad, viscosidad y tensión superficial)**

El control del sistema calefactor de cartucho Inkjet se realiza mediante un sistema realimentado donde una señal PWM proporciona a la resistencia la energía suficiente para que ésta por efecto Joule caliente de forma localizada al fluido (tinta). A través del termistor existente en las inmediaciones del conjunto columna y mediante un microcontrolador auxiliar es posible mantener la temperatura de trabajo del cartucho controlada y de manera constante durante la impresión.

La introducción de esta nueva variable en la modelización de la respuesta hidrodinámica de los cartuchos cargados de una tinta concreta la incrementa en gran medida la complejidad de ésta. La modificación de las propiedades reológicas de las tintas se verán afectadas y modificadas dentro de unos márgenes a voluntad, apareciendo los fenómenos de conducción y convección, la evaporación de los solventes también cobra protagonismo y con ello posibles obstrucciones en el caso de eyectar suspensiones y pérdidas de masa. Los posibles efectos térmicos en el envejecimiento y despolarización de los piezoeléctricos surgen también como un nuevo elemento a tener en cuenta con la introducción de la temperatura en el sistema.

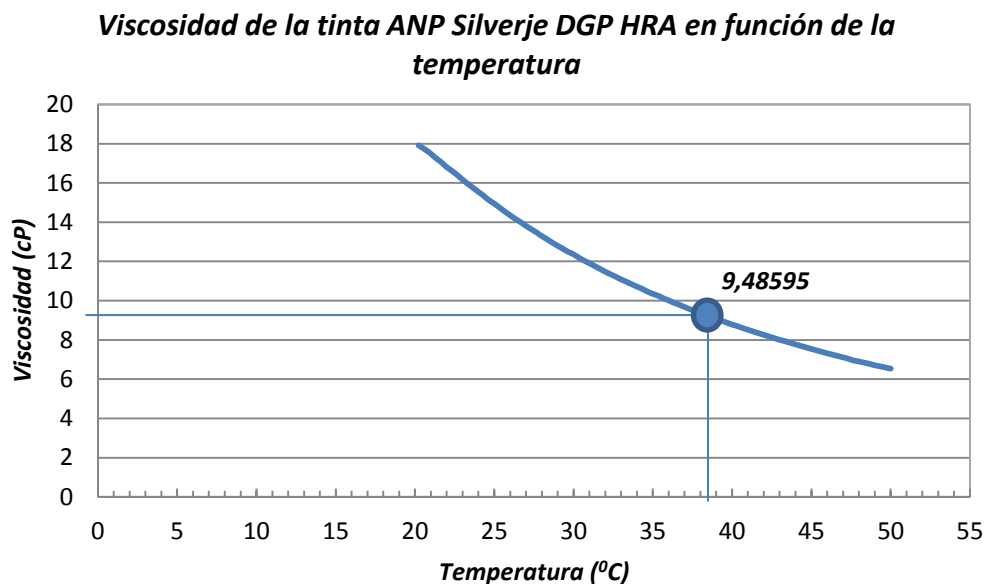
En este aspecto, abordar la modelización de la respuesta hidrodinámica de los cartuchos Inkjet DOD empleados en su totalidad, requiere del análisis de mismo como un sistema electro-mecánico-térmico-acústico-hidráulico, el cual debido a su extensión complejidad y amplitud disciplinar, será interpretado como un sistema donde la temperatura no influye al mismo de forma local (a las conducciones adyacentes al sistema de bombeo), sino de una forma global, es decir, considerando que todo el fluido contenido tanto en el módulo de almacenamiento como en el de eyección se encuentra a una misma temperatura constante y despreciando el efecto térmico de las resistencias sobre los piezoeléctricos.

**Densidad:** la densidad en este caso es uno de los parámetros que en la modelización del cartucho se ha considerado como inamovible, pese a que en principio la evaporación de los

solventes en las inmediaciones de los nozzles podría modificar la proporción de sólidos en la suspensión y en consecuencia la densidad de las misma localmente.

**Viscosidad:** la viscosidad como medida de la resistencia de un fluido a una deformación gradual, aparte de depender de la velocidad de cizalla y del tiempo de aplicación de la misma, es una manifestación del movimiento molecular en el interior de un fluido, luego cuando éstas (moléculas) están más separadas menor será la oposición al movimiento del mismo, es decir, ante un fenómeno de dilatación térmica (más temperatura) menor será la viscosidad lo que se traduce en una menor oposición al movimiento del fluido, en definitiva para un mismo impulso una mayor velocidad.

De modo que, la viscosidad es fuertemente dependiente de la temperatura al igual que el comportamiento del fluido dentro del cartucho. En la mayoría de los materiales ésta dependencia es exponencial y decrece con el aumento de la temperatura. En el agua, por ejemplo, la sensibilidad de la viscosidad a la temperatura es del 3% por grado centígrado. Existen múltiples expresiones capaces de cuantificar la variación de la viscosidad en función de la temperatura, una de ellas es la ecuación de Arrhenius, donde con el aumento de la temperatura, las fuerzas viscosas son superadas por la energía cinética provocando la disminución de la viscosidad. En este aspecto puesto que el fluido a eyectar es una suspensión constituida por nanopartículas de plata, la variación de su viscosidad en función de la temperatura no ha sido modelizada, sino que se ha recurrido a la experimentación afín de determinar dicha evolución. Los datos obtenidos mediante un viscosímetro TA Instruments Discovery HR1 han sido graficados y expuestos en la Figura 173.



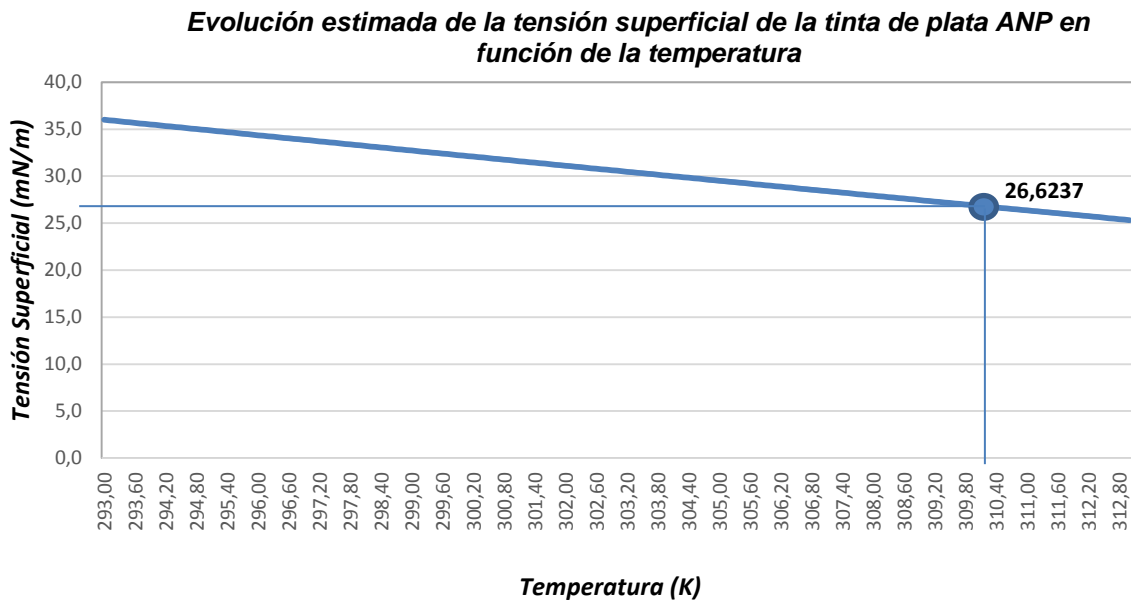
**Figura 173:** Evolución de la viscosidad de la tinta de plata ANP silverjet DGP HRA en función de la temperatura y resaltado el valor bajo las condiciones de impresión [Fuente: Elaboración propia].

Por último, la viscosidad por otro lado también se ve afectada por la presión, sin embargo, en este caso puesto que la modelización es monodimensional y la altura piezométrica es totalmente despreciable su influencia en la viscosidad del fluido ha sido obviada.

**Tensión superficial:** Una de las características de la tensión superficial es que su valor disminuye cuando se incrementa la temperatura a diferencia de la viscosidad, esto es consecuencia del aumento de la agitación térmica de las moléculas que conforman el líquido, disminuyendo así su cohesión. Fenómeno que se pone en evidencia cuando el líquido tiende a su temperatura de ebullición punto en donde no hay distinción entre clara entre estado líquido y vapor de una sustancia, es decir, no se puede apreciar una interface definida. De modo que,  $\gamma = f(T)$  y en este aspecto al igual que antes existen múltiples ecuación empíricas con las que modelizar este fenómeno, la ley de Eötvös por ejemplo plantea una dependencia lineal, a continuación se muestra la ecuación de Van der Waals la cual ha sido tenida en cuenta en la presente modelización:

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^n \quad 3. 228$$

Donde  $\gamma_0$  representa la tensión superficial a temperatura ambiente  $T_c$  su temperatura crítica y  $n$  es un factor empírico (11/9 en líquidos orgánicos, 1 para metales líquido y 0,8 para el agua).



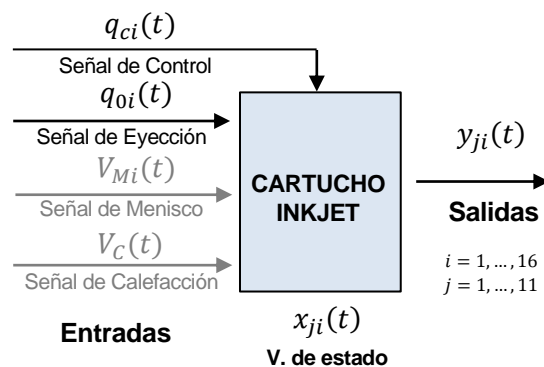
**Figura 174:** Evolución estimada de la tensión superficial de la tinta de plata ANP silverjet DGP HRA en función de la temperatura bajo la aplicación de la ley de Eötvös y resaltado el valor bajo las condiciones de impresión [Fuente: Elaboración propia].

De manera que, conocida la reología de las tintas empleadas bajo la condiciones de impresión y considerando éstas como constantes, teniendo en cuenta de la geometría de las distintos conductos que constituyen al sistema hidráulico de los cartuchos analizados y planteadas las ecuaciones que describen el dinamismo del fluido a eyectar y existe en el interior de los mismos a través de la acústica, podemos hacer una primera modelización acoplándola en la hidráulica y estimar la respuesta de los cartucho a una excitación cualquiera.

### 2.4.3.5. Fenomenología asociada al control de la eyección de los volúmenes discretos de tinta, como consecuencia de la dinámica del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610

Como ya se ha comentado nos encontramos ante un sistema que pierde masa tras recibir un estímulo eléctrico, de hecho en realidad nos encontramos ante un sistema dinámico al que lo excitamos de un forma particular, para que en su respuesta, los piezoeléctricos al deformar las cámaras de bombeo y proporcionarle al fluido un impulso, genere las condiciones necesarias para que se produzca la ruptura de los chorros libres y den origen a la formación de gotas (volúmenes discretos en régimen de eyección) a voluntad.

De modo que, haciendo uso de la dinámica de sistemas y bajo una interpretación análoga de los fenómenos analizados desde un punto de vista Hidráulico-eléctrico podemos analizar la respuesta del mismo en el dominio temporal, estableciendo una función de transferencia de lazo abierto que en diagramas de bloques en el espacio de estados podríamos representar como:



**Figura 175:** Control del cartucho DMC-11610 como un sistema dinámico con tres entradas por nozzle, en particular 49 señales de control de 16 nozzles [Fuente: Elaboración propia].

Viendo al cartucho descrito como un elemento constitutivo de un sistema mayor llamémosle sistema Inkjet, puede ser visto como un elemento que recibe 3 señales principales como ya se ha descrito anteriormente (ver Figura 170) de las cuales para  $\forall t$  estarán presente 17 de



ellas, una para cada piezoeléctrico de cada cámara de bombeo  $i$  (alternándose entre la de excitación y la de menisco) y una última señal de calefacción. Dichas señales generan 16 salidas que  $y_i(t)$  en un sistema en el que podemos analizar 161 puntos de control.

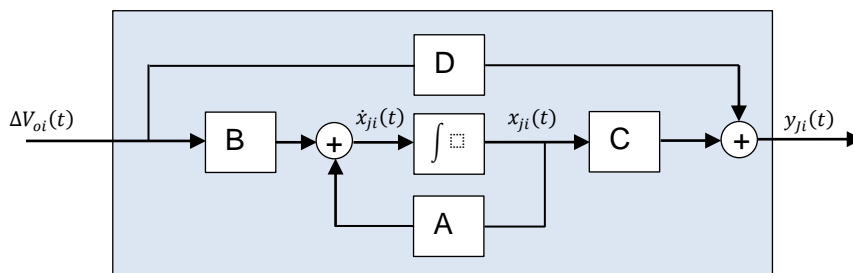
De modo que, haciendo uso de la modelización de la dinámica del fluido descrita anteriormente, basada únicamente en la hidro-acústica e interpretada a través de un sistema análogo eléctrico en donde analizamos los transitorios generados por una única entrada (señal de eyección) la cual a través del modelo interpretamos como un caudal de entrada ( $\Delta V_0(t)$ ) o análogamente como una carga ( $q_0(t)$ ), podemos decir que dicho sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden puede redefinirse como un sistema de primer orden que en forma matricial se describe como:

$$[\dot{x}_{ji}(t)] = [A][x_{ji}(t)] + [B][\Delta V_{oi}(t)] \quad (\text{Ec. Dinámica del cartucho})$$

$$[y_{ji}(t)] = [C][x_{ji}(t)] + [D][\Delta V_{oi}(t)] \quad (\text{Ec. Lectura de estados})$$

3. 229

Donde A, B, C y D representan la matriz dinámica del sistema, la de control, la lectura y la de paso. Dichas ecuaciones matriciales a su vez representadas como bloques en el espacio de estados en tiempo continuo tomando la siguiente forma:



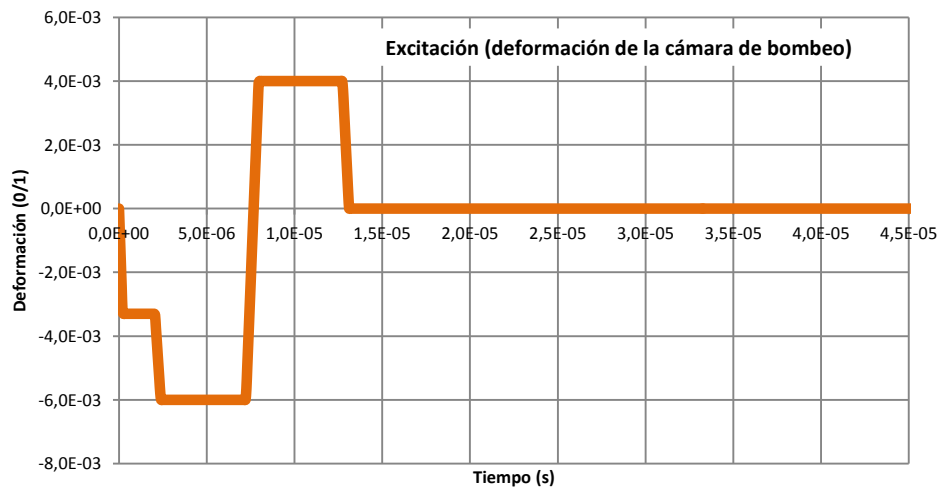
**Figura 176:** Representación en forma de diagrama de bloques de estados en el dominio temporal, del sistema ecuaciones anteriores que describen el comportamiento del dinámico del fluido en el interior del cartucho analizado [Fuente: Elaboración propia].

De manera que, conocidas las ecuaciones dinámicas del sistema ahora siendo de primer orden y de dimensión  $322 \times 322$  al resolver éstas y tras utilizar la ecuación de lecturas de estados podemos conocer la respuesta del sistema, en este caso del cartucho, y tras analizar el estado del mismo para  $\forall t$  podemos ahora controlar el mismo mediante la modificación de las señales de entrada ( $\Delta V_{oi}(t)$ ), y en este aspecto no referimos a: la forma de la onda (señal de excitación) en función de la reología de la tinta y la frecuencia de la misma en función de la velocidad del carro de impresión afín de ajustar el drop spacing (separación de las gotas en dirección al desplazamiento del carro).

De manera que, conocidas las ecuaciones dinámicas del sistema ahora siendo de primer orden y de dimensión  $322 \times 322$  al resolver éstas y tras utilizar la ecuación de lecturas de estados podemos conocer la respuesta del sistema, en este caso del cartucho, y tras analizar el estado del mismo para  $\forall t$  podemos ahora controlar el mismo mediante la modificación de las señales de entrada ( $\Delta V_{oi}(t)$ ), y en este aspecto no referimos a: la forma de la onda (señal de excitación) en función de la reología de la tinta y la frecuencia de la misma en función de la velocidad del carro de impresión afín de ajustar el drop spacing (separación de las gotas en dirección al desplazamiento del carro).

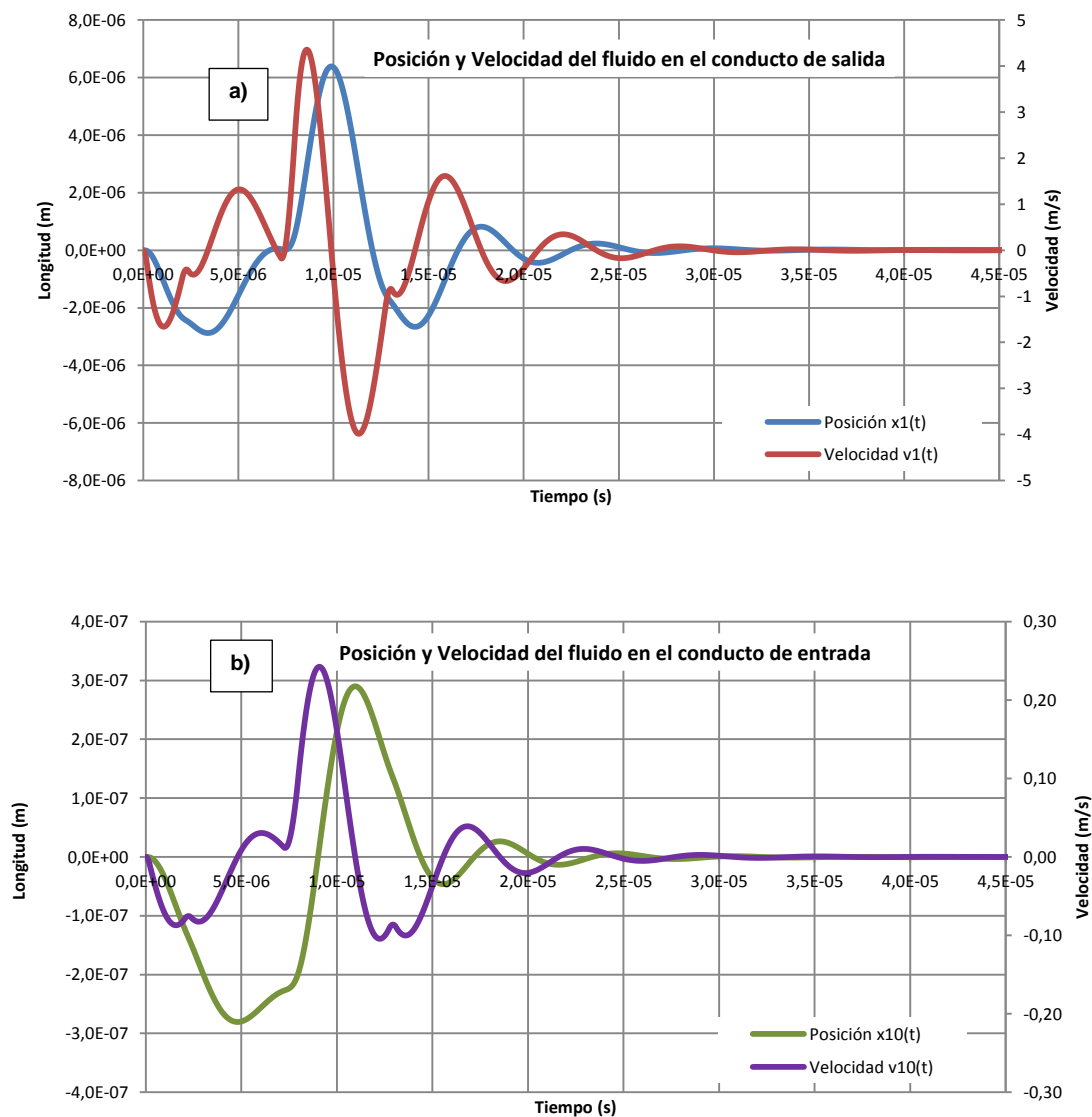
#### 2.4.3.6. Respuesta hidrodinámica de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610 mediante la modelización del mismo como un sistema monodimensional hidro-acústico

Como resultado del modelo planteado en donde se recurre a la acústica y a la mecánica de fluidos a continuación se expone la respuesta del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 considerando a este como mono-nozzle y posteriormente como multi-nozzle.

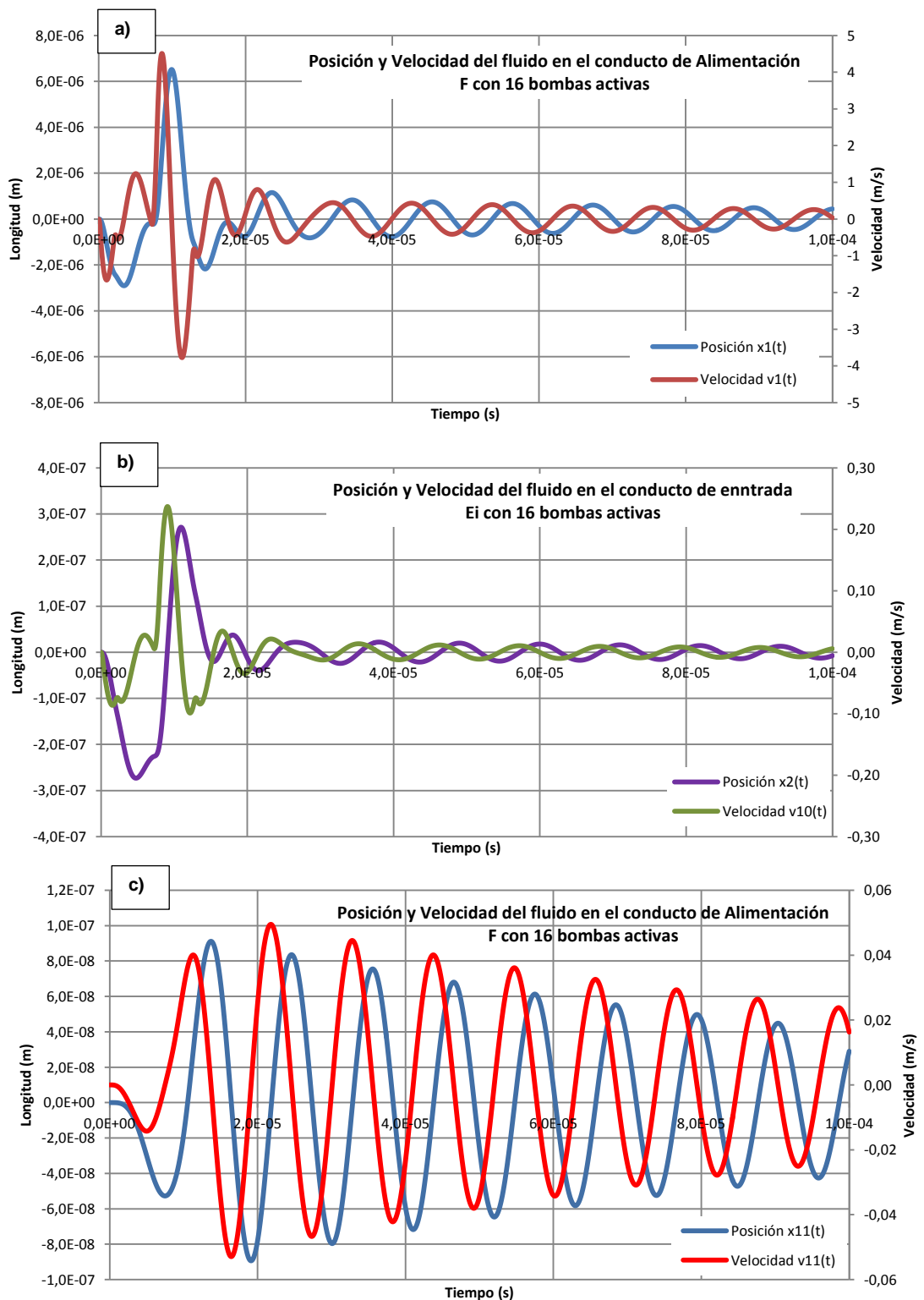


**Figura 177:** Representación de la señal de excitación empleada, interpretada como una variación volumétrica de las cámaras de bombeo en tanto por uno

[Fuente: Elaboración propia].



**Figura 178:** Respuesta hidrodinámica del cartucho analizado interpretado como mono-nozzle visto como un sistema hidro-acústico: posición y velocidad del fluido en el tramo N respecto al nozzle (a) y en el tramo E respecto al nodo 10 (b) [Fuente: Elaboración propia].



**Figura 179:** Respuesta hidrodinámica del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610, analizado como un sistema hidro-acústico: posición y velocidad del fluido en el tramo N respecto al nozzle (a), en el tramo E respecto al nodo 10 (b) y en el canal de alimentación tramo F respecto al nodo 11 (c) [Fuente: Elaboración propia].

Como se ha podido apreciar los resultados arrojados por esta primera modelización basada en una interpretación hidro-acústica del sistema, aunque coherentes muestran ligeras distorsiones en cuanto a la magnitud de; tanto de los desplazamientos, como de las velocidades del flujo en el interior de las distintas conducciones. El motivo de dicha imprecisión se fundamenta en la limitada visión del modelo, puesto que recurre solo a la hidráulica y a la acústica, interpretando la variación del volumen de la cámara de bombeo como proporcional a la magnitud de la señal de excitación siendo en su máxima deformación, correspondiente a una variación del volumen del mismo en un 0.05%.

En las gráficas de la Figura 178 se muestra la respuesta hidrodinámica del sistema como mono-nozzle (a), considerando a la presión del interior de la cámara de bombeo como la causante del desplazamiento de la tinta en el interior del cartucho careciendo éste de sentido. Posteriormente en la segunda modelización en donde se interpreta al cartucho de forma completa, es decir como un sistema multi-nozzle (Figura 178b), se tiene en cuenta el sentido del desplazamiento, representándose en consecuencia como positivo los desplazamientos hacia la derecha, es decir hacia el nozzle, y negativo como los desplazamientos aguas arriba de la cámara de bombeo (hacia el conducto de conexión al depósito 1).

Utilizando las mismas condiciones de eyección y con ello nos referimos a la misma tinta y los mismos parámetros de funcionamiento (forma de onda y frecuencia de la señal de excitación, y temperatura de eyección) se pudo comprobar que la velocidad de salida de las gotas en el equipo de impresión Fujifilm Dimatix DMP-2800 mediante el uso de cámaras estroboscópicas es de 4,4 m/s (ver capítulo 4 apartado 4.2) lo cual dista de ligeramente de los valores obtenidos, estableciéndose así la necesidad de afinar el modelo y haciéndose necesario introducir la deformación de las cámaras de bombeo desde un punto de vista mecánico recurriendo a la resistencia de los materiales.

De modo que, ahora la modelización de la respuesta hidrodinámica del cartucho evoluciona a una modelización monodimensional del mismo, pero ahora desde un punto de vista mecánico-hidráulico-acústico.

#### **2.4.3.7. Respuesta hidrodinámica de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610 mediante la modelización del mismo como un sistema monodimensional mecánico-hidro-acústico**

Como paso previo a la introducción de los piezoeléctricos (elementos actuadores causantes de la deformación de la cámara de bombeo) a continuación se modeliza el comportamiento del cartucho considerando que cada una de sus 16 cámaras de bombeo se ven afectadas por una presión exterior variable en el tiempo a voluntad, siendo ésta la causante de dicha variación de volumen en las mismas, debido a la flexión de la membrana que las cubre (ver imágenes de: Figura 180, Figura 198, Figura 199 y Figura 200).

Como se ha venido comentando, las cámaras de bombeo como bombas de desplazamiento positivo inducen al fluido un impulso al contraerse o expandirse. Al estar constituidas por un recinto de sección cuadrada donde tres de sus paredes son rígidas, mientras que la cuarta es flexible, y ésta la superior, al deformarse consecuencia de una presión exterior, modifica el volumen contenido en dicho recinto ( $\Delta V_0$ ). Debido a que geoméricamente cumple con la relación  $(L/b) > 10$ , recurriendo a la resistencia de materiales podemos al considerarla como una barra bimaterial biempotrada, calcular el perfil de desplazamiento de la misma  $z(y)$  en función de una presión exterior  $P_{in}$ , es decir:

$$z(y) = -\frac{P_{in} b y^2 (y - L)^2}{24EI} \quad 3. 230$$

Donde E, I, L, b representan; el módulo de Young de la membrana vibratoria la cual está constituida por la membrana misma de  $SiO_2$  en contacto con la tinta y el actuador piezoeléctrico, el segundo momento del área de la sección transversal, el ancho de la cámara de bombeo y el largo de la misma, respectivamente. De forma que, el cambio de volumen de la cámara de bombeo ( $\Delta V_0$ ) como consecuencia de una presión de entrada ( $P_{in}$ ) se puede definir como:

$$\Delta V_0 = V_f - V_0 = b \int_0^L z(y) dy \quad \rightarrow \quad \Delta V_0 = -\frac{P_{in} b^2 L^5}{720EI} \quad 3. 231$$

Por otro lado, al ser la membrana considerada como una viga bimaterial y cuyos materiales poseen distinta rigidez, afín de aplicar la teoría convencional de la deformación de las vigas, hemos de considerar ésta como monomaterial, adaptando su geometría. Es decir, en éste caso modificando la longitud del material piezoeléctrico como se muestra en la siguiente ecuación:

$$b_{SiO_2}^* = b_{PZT} \left( \frac{E_{PZT}}{E_{SiO_2}} \right) \quad 3. 232$$

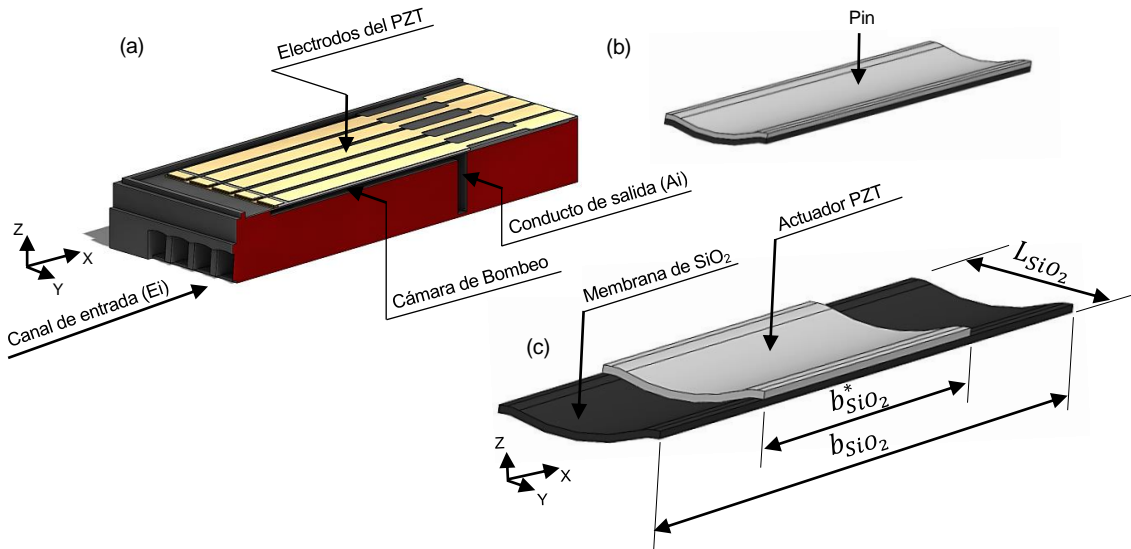
Así mediante esta modificación geométrica recurriendo al teorema de Steiner tras encontrar la ubicación del nuevo centro de masas y la línea neutra, podemos ahora establecer que la flexibilidad de la membrana puede expresarse como:

$$K = -\frac{P_{in}}{\Delta V_0} \quad \rightarrow \quad K = \frac{720EI}{b^2 L^5} \quad 3. 233$$

De forma que, la obtención del valor que define la rigidez de la membrana superior de la cámara de bombeo ( $K$ ) nos lleva al siguiente razonamiento: *para una misma presión exterior  $P_{in}(t)$  mientras mayor sea la rigidez de la membrana menor será la deformación de la cámara y por tanto menor el desplazamiento del fluido.*

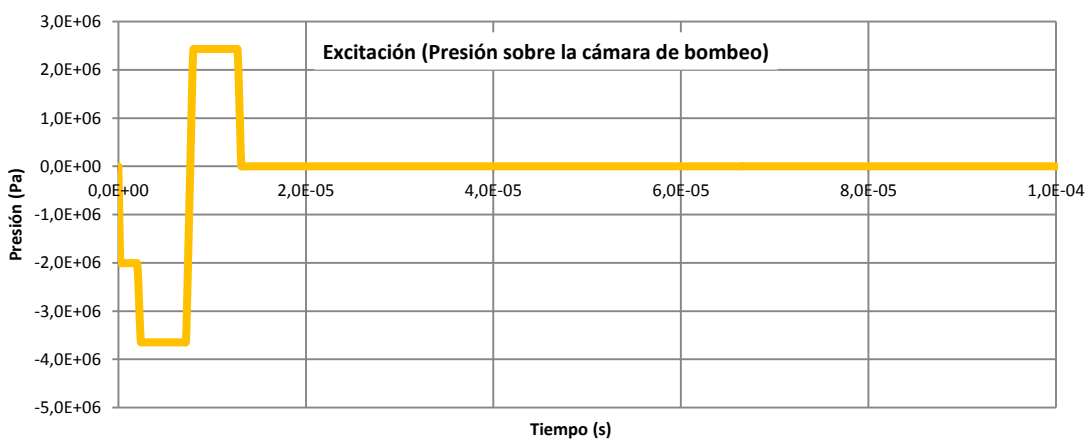
A continuación de forma esquemática y recurriendo a imágenes renderizadas generadas tras la observación al SEM del conjunto sistema de bombeo del cartucho analizado, se

muestra seccionado el mismo, y magnificado la membrana considerada como una viga biempotrada.

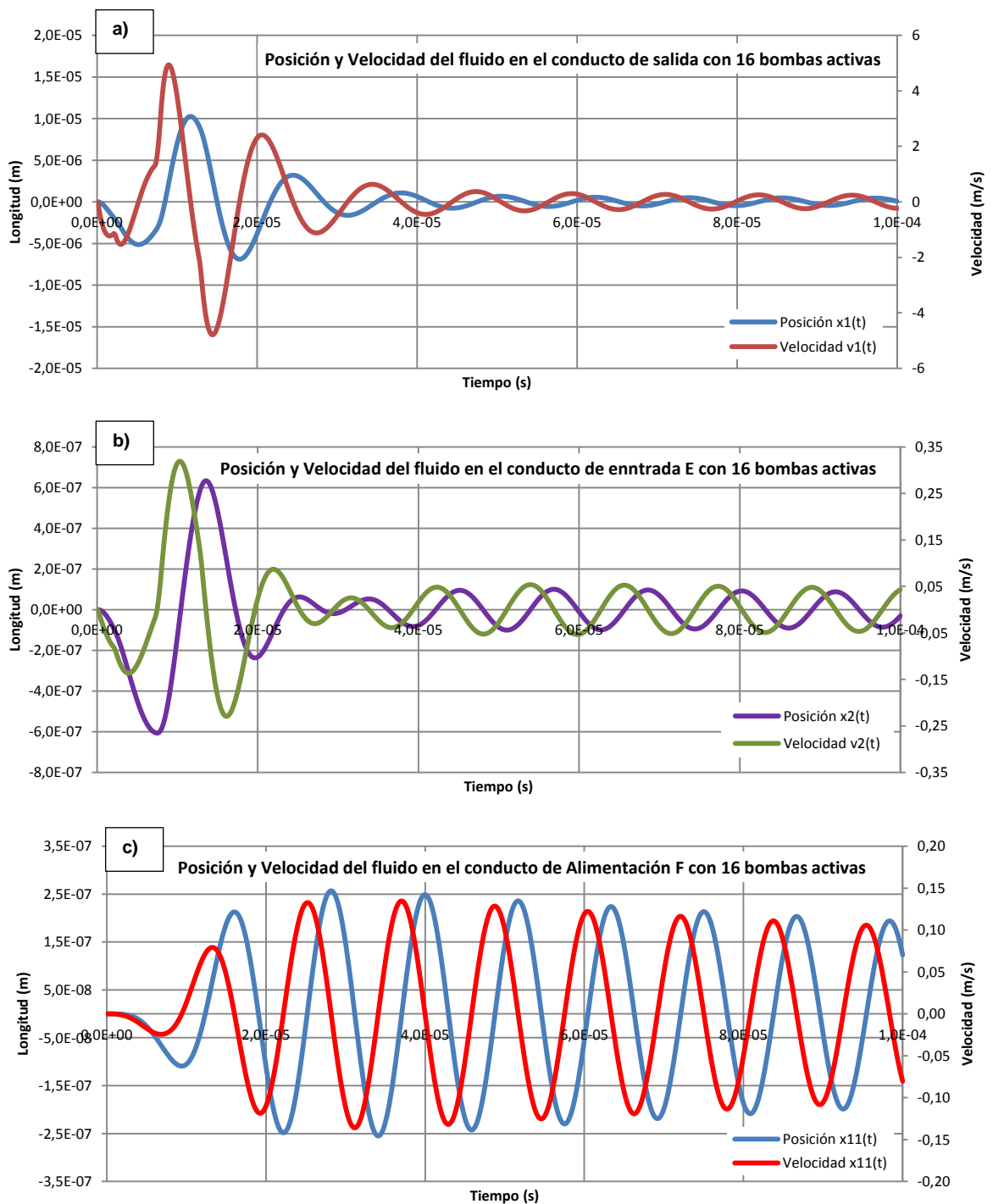


**Figura 180:** Representación del sistema de eyección (a). Membrana bimetálica biempotrada (b), y vista detallada de la sección de la membrana tras considerarla monomaterial (c) [Fuente: Elaboración propia].

De forma que, tras introducir en la modelización de la respuesta hidrodinámica del cartucho la rigidez de la membrana y considerar la señal de eyección ahora como una presión variable en el tiempo cuyo máximo admisible se ha establecido a 13 atm, la respuesta del mismo recurriendo ahora a la acústica, la mecánica de fluidos y la resistencia de los materiales pueden ser apreciada a continuación:



**Figura 181:** Representación de la señal de excitación empleada, interpretada como una presión dependiente del tiempo [Fuente: Elaboración propia].



**Figura 182:** Respuesta hidrodinámica del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610, analizado como un sistema mecánico-hidráulico-acústico multi-nozzle: posición y velocidad del fluido en el tramo N respecto al nozzle (a), en el tramo E respecto al nodo 10 (b) y en el canal de alimentación tramo F respecto al nodo 11 (c) [Fuente: Elaboración propia].

La introducción de una nueva disciplina en el modelo lumped mono-dimensional del sistema dinámico analizado, como es la resistencia de los materiales y a través de ésta, la influencia de la rigidez de la membrana de las cámaras de bombeo en su respuesta hidrodinámica,



amplía la profundidad de dicho modelo, introduciendo nuevas consideraciones a tener en cuenta, es decir; la excitación del mismo ya no es interpretada como una variación temporal del volumen de la cámara de bombeo (Figura 177) sino, como una presión dependiente del tiempo (Figura 181) que al ser aplicada sobre dicha membrana flexible, la deforma. Dicha flexión considerando a la membrana como una viga bi-empotrada, contrae o expande el volumen del recinto al cual hemos denominado cámara de bombeo.

Así pues, siendo el sistema de respuesta positiva, en el caso de verse sometido a una función rampa creciente de presión, ésta generará una contracción proporcional de dicha cámara de bombeo desplazando el fluido por sus correspondientes conductos. En definitiva, cuyas consecuencias podemos apreciar en las gráficas expuestas en la Figura 182.

Sin embargo, cabe resaltar que esta modelización vuelve a ser limitada puesto que no establece la relación Presión/Voltaje y en la cual se ha elegido como presión máxima, es decir, la presión a la cual la cámara de bombeo alcanza su mayor contracción (17 atm), para que sus consecuencias (conocidas) se acerque a los valores obtenidos experimentalmente.

## 2.5. ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS

Continuado con la metodología planteada en la presente tesis, si bien hasta ahora se ha podido realizar una modelización basada en la mecánica de fluido en la resistencia de los materiales y en la acústica con la cual controlar los sistemas de impresión multi-nozzle DOD del tipo Bend basados en el resonador de Helmholtz, dicha capacidad de control no se materializa hasta que no seamos capaces de establecer una función de transferencia que nos permita vincular la deformación de las membranas a consecuencia de los actuadores piezoeléctricos existentes sobre las cámaras de bombeo con una señal eléctrica externa, ya que hasta ahora hemos visto la excitación del sistema desde un punto de vista mecánico cuando en realidad es eléctrico.

Así pues, en este apartado se discute la fuerza motriz de los cabezales de impresión, es decir, las causas que producen la deformación de las cámaras de bombeo debido a la contracción o expansión de los piezoeléctricos generando ondas de presión en el fluido que al propagarse producen la eyección del mismo.

### 2.5.1. Efecto piezoeléctrico

Como hemos podido apreciar con anterioridad, la fuerza impulsora capaz de eyectar las gotas de tinta aguas abajo del nozzle en el cabezal o cartucho de impresión según sea el caso, viene determinada por el actuador existente encima de la cámara de bombeo (Sistemas del tipo Bend) el cual deforma su estructura a través del efecto piezoeléctrico inverso.

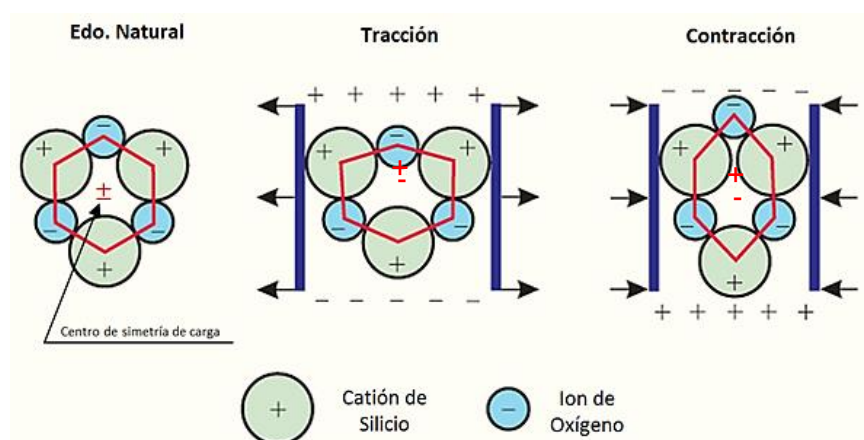
El efecto piezoeléctrico fue descubierto por primera vez por Pierre y Jacques Curie en 1880 estudiando la compresión del cuarzo y en 1881 Lippmann dedujo matemáticamente el efecto piezoeléctrico inverso, siendo ésta propiedad confirmada por los hermanos Curie inmediatamente después. En los años siguientes, se definieron las veinte clases naturales de cristal en la que se producen los efectos piezoeléctricos y todos los posibles coeficientes piezoeléctricos macroscópicos [91].

La primera aplicación práctica de la piezoelectricidad se realiza en el año de 1917, cuando Paul Langevin utiliza un cristal de cuarzo en el perfeccionamiento de un detector ultrasónico para submarinos. En ese mismo año en los laboratorios telefónicos A.M. Bell y Nicolson experimentan con la sal de rochelle y construyen fonógrafos y micrófonos utilizando estos cristales.

Durante la Segunda Guerra Mundial, grupos de investigación en los Estados Unidos, Rusia y Japón, descubrieron una nueva clase de materiales sintéticos, los llamados ferroeléctricos, que exhibían unas constantes piezoeléctricas muchas veces superiores a los materiales naturales. Esto condujo a una intensa investigación y con ella se desarrolló el titanato de bario ( $\text{BaTiO}_3$ ) en 1943 la primera cerámica con una estructura perovskita (sistema cristalino de estructura ortorrómbica, ver Figura 184). En 1954 se desarrollan las cerámicas de titanato zirconato de plomo  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  (patente: US 2708244 A). En los años siguientes los PZT se han convertido en el principal producto industrial en materia de cerámicas piezoeléctricas con propiedades específicas para aplicaciones particulares.

La piezoelectricidad por otro lado, es un fenómeno que ocurre en determinados cristales que, al ser sometidos a esfuerzos mecánicos, éstos adquieren una polarización eléctrica, apareciendo también una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este fenómeno también ocurre a la inversa, deformándose bajo la acción de fuerza internas al ser sometidos a un campo eléctrico. El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible: al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico, recuperan su forma.

Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos. El cuarzo es un ejemplo de un cristal piezoeléctrico natural. Los cristales de cuarzo están hechos de átomos de silicio y oxígeno en un patrón repetitivo. En el cuarzo, los átomos de silicio tienen una carga positiva y los átomos de oxígeno tienen una carga negativa. Normalmente, cuando el cristal no está bajo ningún tipo de estrés externo, las cargas se dispersan uniformemente en las moléculas a través del cristal. Pero cuando el cuarzo se estira o se contrae, el orden de los átomos cambia ligeramente, así las moléculas no polares (cuyo centro de cargas tanto positivas como negativas coinciden en un mismo punto) se vuelven polares, es decir dejan de coincidir formándose un dipolo. De modo que al acumularse, en uno de los lados un gran número de electrones en un hipotético cubo se produce una diferencia de potencial, efecto que se puede comprobar conectando ambos extremos del mismo a un *voltímetro* (ver Figura 183).

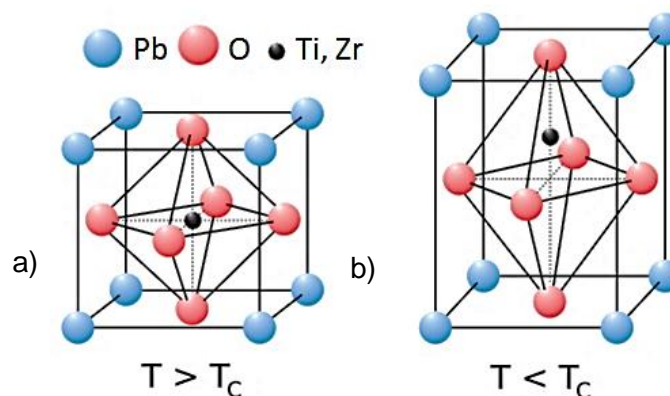


**Figura 183:** Representación esquemática del efecto piezoeléctrico en un cristal de cuarzo  
[Fuente: Elaboración propia].

De igual forma, al aplicarle un voltaje en su superficie o al verse sometido a un campo eléctrico el cristal de cuarzo representado anteriormente se deforma, desplazándose los centros de simetría de cargas (el centro positivo se desplaza hacia las cargas negativas o viceversa) de esta forma se produce el efecto piezoeléctrico inverso (deformación en respuesta a una excitación eléctrica).

Las cerámicas piezoeléctricas más comunes por otra parte, suelen ser el titanato de bario, titanato de plomo y zirconato de plomo que a menudo se identifica como PZT. Estos materiales presentan ciertas ventajas sobre el cuarzo monocristalino incluyendo mayores coeficientes piezoeléctricos, facilidad de fabricación de componentes de cualquier tamaño y forma (fabricación por pulvimetalurgia con sinterización a temperaturas de alrededor de los  $1.300^{\circ}\text{C}$ ), mecánicamente son duros y sólidos, así como químicamente inertes. Desde el punto de vista constructivo los PZT se fabrican a partir de sus respectivos óxidos y carbonatos de Pb, Zr, Ti, tierras raras, y metales alcalinos.

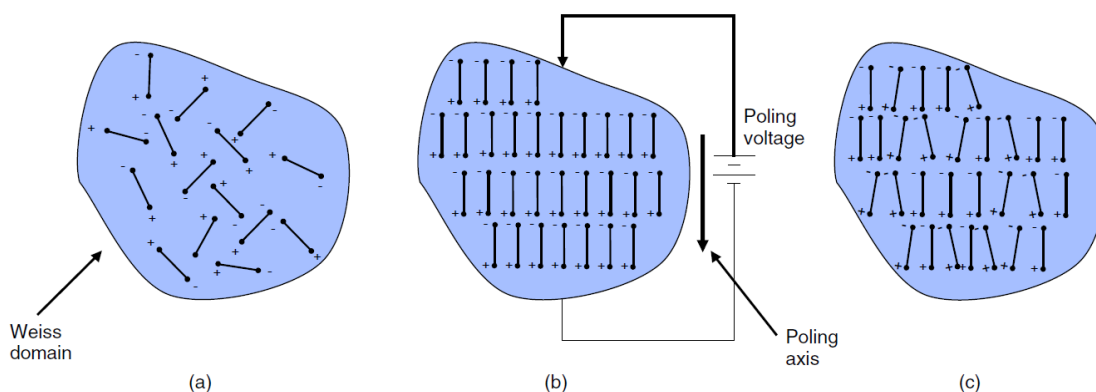
Estas cerámicas perovskitas como se puede apreciar en la imagen de a continuación (Figura 184) a temperaturas por encima del punto de Curie (donde la magnetización de un elemento se vuelve cero) tienen una estructura donde los átomos de oxígeno forma un octaedro regular. Los cationes de la especie Ti, Zr se encuentran en el centro de los octaedros y los de la especie Pb inscriben al octaedro. Cuando la temperatura disminuye y cae por debajo de la temperatura de Curie, los cambios en la estructura y en el caso de los PZT los iones de oxígeno y los cationes de plomo se mueven de sus posiciones cúbicas y los iones de titanio y zirconio se desplazan de su centro (al igual que pasa con el cristal de cuarzo, Figura 183) a estos materiales se les conoce como ferroeléctricos porque su comportamiento es análogo al comportamiento de los materiales ferromagnéticos. De modo que, las cargas positivas y negativas ya no coinciden lo que produce un dipolo y una estructura que deja de ser cúbica para convertirse en tetragonal. Es por ello que ante un campo eléctrico estos elementos se deforman (efecto piezoeléctrico inverso).



**Figura 184:** Representación de la estructura elemental de los PZT por encima (a) y por debajo de su temperatura de Curie (b) [Fuente: Elaboración propia].

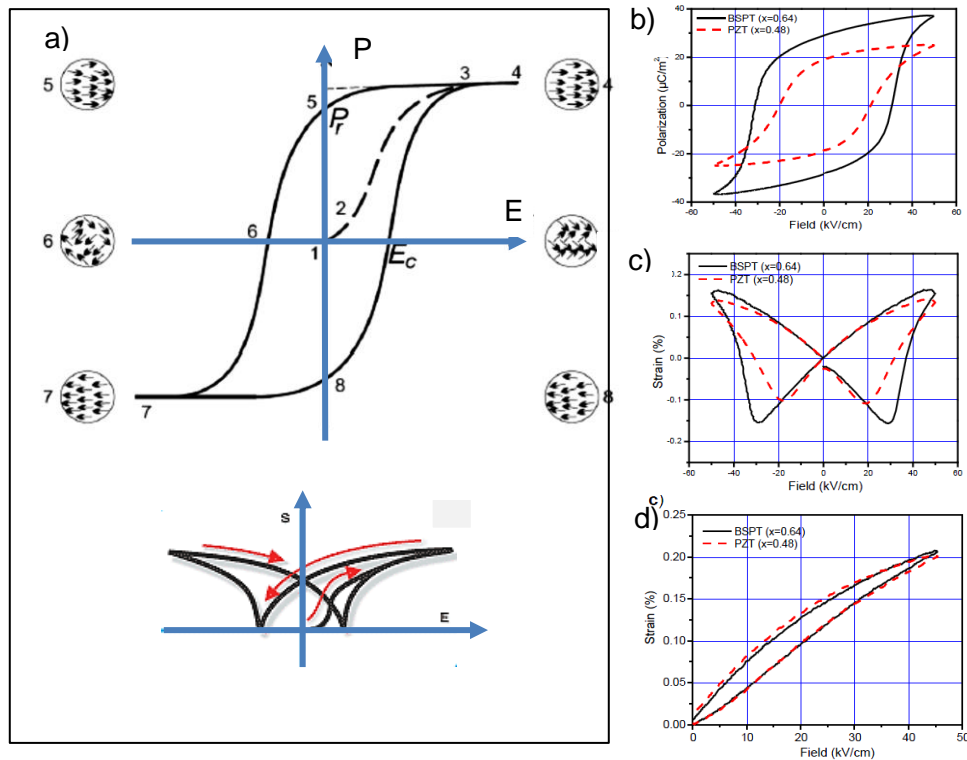
En general, una alineación uniforme de los dipolos eléctricos sólo se produce en ciertas regiones de un cristal, mientras que en otras regiones la polarización puede ser en la dirección inversa. Estas regiones se denominan dominios de Weiss (Figura 185a). Cuando se fabrica una cerámica ferroeléctrica, ésta inicialmente no muestra la piezoelectricidad debido a la orientación aleatoria de los diferentes dominios y por tanto no hay polarización neta. Para que el material se convierta en piezoeléctrico tiene que ser polarizado. Este proceso se le conoce como Poling y consiste en exponer las cerámicas a un fuerte campo eléctrico a una temperatura ligeramente inferior a su temperatura de Curie como se muestra en la Figura 185b. Como resultado gran parte de los dominios ferroeléctricos se alinean con el campo y el material aumenta de forma permanente en la dimensión o en el sentido entre los electrodos de polarización.

Así cuando se elimina el campo, y se enfría la pieza los dipolos permanecen bloqueados en una alineación aproximada, como se muestra en la Figura 185c. Es esta alineación de los momentos dipolares dentro de los diversos dominios Weiss son los que permite que el cristal se comporte como un material piezoeléctrico. Por otro lado, los materiales también pueden ser despolarizados mediante la inversión de la tensión de polarización, el aumento de la temperatura más allá de la temperatura de Curie o mediante la inducción de un gran esfuerzo mecánico.



**Figura 185:** Proceso de alineación de los dipolos en los distintos dominios de Weiss, antes (a) durante (b) y después del proceso de polarización o Poling (c) [230].

Si se analiza la polarización de una cerámica piezoeléctrica como respuesta a un campo eléctrico vemos que esta se comporta generando un ciclo de histéresis, la figura de a continuación tomada de la bibliografía da buena cuenta de ello.



**Figura 186:** Bucles de histéresis de los materiales ferroeléctricos a), representación de la curva de polarización (P) b), de la deformación bipolar c) y de la deformación unipolar d), en función del campo eléctrico aplicado (E) para una cerámica piezoeléctrica PZT y para BSPT [91] y [231] respectivamente.

En las gráficas anterior podemos apreciar distintos ciclos de histéresis típicos de los materiales ferroeléctrico a temperatura inferiores al punto de Curie, cuando éstos se encuentran sometido a un pequeño campo eléctrico a una frecuencia dada. Entre los puntos 1 y 2 de la gráfica de la Figura 186a.1, se aprecia una relación lineal entre la polarización de los mismos y la magnitud del campo  $E$ , el cual no es lo suficientemente grande para alinear cualquiera de los dominios. Por lo tanto, las muestras se comportan como un material dieléctrico normal. A medida que aumenta el campo eléctrico de fuerza, de 2 a 3, los dominios cuya polarización es opuesta a la dirección del campo conmutan en la dirección positiva y la polarización aumenta rápidamente hasta que todos los dominios están alineados en la dirección positiva (4). Posteriormente como la intensidad del campo disminuye la polarización disminuirá en general, pero no vuelve a cero, cuando el campo se reduce a cero (5), algunos de los dominios permanecen alineados en dirección positiva, y la muestra ferroeléctrica exhibirá una cierta polarización remanente  $P_r$ .

La polarización remanente  $P_r$  en una muestra ferroeléctrica no puede ser eliminada hasta que no se aplique un campo en la dirección opuesta (negativo) y este alcance un cierto valor. La fuerza del campo necesaria para reducir la polarización  $P$  a cero (6) se conoce como la intensidad de campo coercitivo  $E_C$ . Además, el aumento del campo en la dirección

negativa provocará una alineación completa de los dipolos en esta dirección (7). La inversión de la dirección del campo una vez más puede completar el ciclo de histéresis.

En cuanto a las gráficas de deformación en función del campo aplicado, en la imagen anterior se aprecian que éstas se han expuesto de dos formas; una bipolar "curva de mariposa" y otra unipolar (Figura 186 c y d), y de forma comparativa para dos materiales distintos. Sin embargo, ambos comienzan en cero antes de alcanzar su punto de saturación. Al reducir el campo hasta cero (nivel de remanencia), los materiales mantienen una deformación residual permanente  $S_r$ , definiendo el punto de funcionamiento del componente piezoeléctrico, el cual responderá proporcionalmente a la magnitud del campo eléctrico aplicado posteriormente, campo que a su vez, si se disminuye al cambiar el sentido la deformación se reduce hasta desaparecer a  $E_c$ , antes de aumentar de nuevo. Por otro parte, en el caso unipolar podemos apreciar un comportamiento unidireccional tanto para la cerámica PZT  $((1-x)\text{PbZrO}_3-x\text{PbTiO}_3)$  con una temperatura de Curie  $T_C \sim 390^\circ\text{C}$  expuesto a un campo unidireccional en comparación a una cerámica BSPT  $((1-x)\text{BiScO}_3-x\text{PbTiO}_3)$  de temperatura crítica o de Curie mayor  $T_C \sim 460^\circ\text{C}$  [231].

Se ha de resaltar que, por encima de la temperatura de Curie, la polarización es una función lineal del campo eléctrico externo, por lo que al reducir éste más no la temperatura, no produce una polarización remanente. Por tanto, a estas temperaturas el material no experimenta ciclos de histéresis como los mostrados anteriormente.

## 2.5.2. Clasificación, características y aplicaciones de los PZT

En la actualidad las cerámicas sinterizadas de Titanato Zirconato de Plomo (los PZT's) son los elementos piezoeléctricos más utilizados, principalmente por sus altos coeficientes piezoeléctricos, por su elevada temperatura crítica y por su bajo coste, además de ser químicamente inertes y fuertes mecánicamente. Sin embargo, existen de muchos tipos y por ello han sido clasificados en grupos los cuales a continuación se enumeran resaltando de forma muy superficial algunas de sus aplicaciones:

- a. Navy Type I ("Hard"): Conocidos comercialmente como PZT-4, son utilizados en aplicaciones ultrasónicas, sonares, sistemas de limpieza y aplicaciones fisioterapéuticas, ya que son capaces de generar elevadas amplitudes de vibraciones manteniendo bajas las pérdidas mecánicas y dieléctricas.
- b. Navy Type II ("Soft"): Conocidos comercialmente como PZT-5A, se caracterizan por tener una alta sensibilidad es por ello que se utilizan en sensores del tipo transductores de presión, hidrófono, acelerómetros etc. También presenta pérdidas dieléctricas y mecánicas que impiden la excitación continua con alta intensidad.
- c. Navy Type III ("Hard"): Conocidos comercialmente como PZT-8, poseen características similares a los del tipo I aunque son menos sensibles pero ofrecen la capacidad de soportar altos niveles de excitación eléctrica y estrés mecánico es

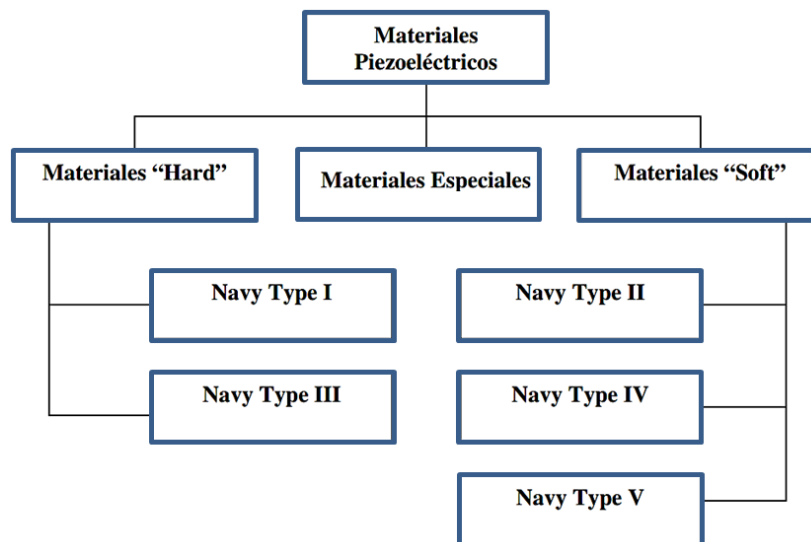
por ello que se utilizan en aplicaciones que requieran alta potencia. Entre sus aplicaciones destacan sistema de soldadura por ultrasonidos y procesamiento de materiales.

- d. Navy Type IV ("Soft"): Adecuado para aplicaciones de potencia media. Se tornó obsoleto con la llegada de los PZT, siendo substituidos principalmente por los de tipo I. Los piezoeléctricos de este tipo están constituidos por titanato de bario. Se utiliza en aplicaciones que requieren de un control de movimiento fino o para receptores sensible generalmente en equipos antiguos, debido a su baja temperatura de Curie su rango de aplicaciones se ve restringido en gran medida.
- e. Navy Type V ("Soft"): Comercialmente conocidos como PZT-5J. Son utilizados en aplicaciones que requieran alta energía y diferencia potencial, como los detonadores de impacto de los encendedores.
- f. Navy Type VI ("Soft"): Comercialmente conocidos como PZT-5H. Adecuado para aplicaciones que requieren constantes dieléctricas extremadamente altas y grandes deformaciones mecánicas. Principales aplicaciones: actuadores, posicionadores y sistemas de microbombeo como los sistemas Inkjet.

De modo que, en general se puede decir que las características de las cerámicas piezoeléctricas se ven modificadas al añadirles distintos elementos a su composición, condicionando su comportamiento y haciéndolos más eficientes según la aplicación, en general algunos de ellas son más propicias para sensores y elementos pasivos mientras que otras son más adecuadas como actuadores. Hoy en día sin embargo, los piezoeléctricos se encuentran en el interior de un sinnúmero de dispositivos cuyas aplicaciones van desde encendedores eléctricos al almacenamiento de datos, aplicaciones en nano y microlitografía, sistemas de inspección, así como también en la mecánica de precisión, perforaciones ultrasónicas etc., en dispositivos médicos y dentales, en óptica y fotónica y entre muchas otras aplicaciones, como en sistemas de microbombeo, como es el caso en el que nos encontramos.

La clasificación anterior por otro lado está basada en el área existente en la curva de histéresis mostrada en la Figura 186a, a través de ella se denominan como materiales Hard (duros) aquellos cuya curva de histéresis es cerrada con un área pequeña, mientras que los materiales soft (blandos) son aquellos que presentan una curva de histéresis más abierta con una mayor área. Los materiales Hard (Navy Type I y III) son también denominados de alta potencia mientras que los Soft son denominados materiales de alta sensibilidad. A continuación, se expone un esquema donde se muestra la clasificación de los materiales piezoeléctricos de acuerdo con la norma americana DOD-STD-1376A (SH).





**Figura 187:** Subdivisiones de los materiales piezoeléctricos “Hard” y “Soft” [Norma DOD-STD-1376A (SH)].

PZT Material Supplier	Navy Type I (PZT-4)	Navy Type II (PZT-5A)	Navy Type III (PZT-8)	Navy Type VI (PZT-5H)
Morgan Matroc	PZT-4	PZT-5A	PZT-8	PZT-5H
Channel Ind.	C5400	C5500	C5800	C5700
EDO Corp.	EC-64	EC-65	EC-69	EC-76
Keramos	K-270	K-350	K-278	
Transducer Products	LTZ-1	LTZ-2		LTZ-2H
Staveley Sensors	EBL1	EBL2	EBL4	EBL3

**Figura 188:** Tabla de equivalencias para algunos de los tipos de piezoeléctricos. [Fuente: Boston piezo optics inc.]

A modo de resumen, los motivos que llevan a estos materiales a ser usados en tan diversas aplicaciones pueden ser resumidas de la siguiente forma:

- Debido a que no poseen elementos móviles permite movimientos a escala subnanométrica por tanto no ofrecen límites en cuanto a resolución.
- Son de respuesta rápida, los actuadores piezoeléctricos responden en cuestión de microsegundos cuyas aceleraciones pueden alcanzar los 10.000 g.
- Son capaces de generar fuerzas elevadas capaces de mover cargas de varias toneladas, con desplazamientos de más de 100  $\mu\text{m}$  y con resoluciones como ya se ha comentado con precisión subnanométrica.
- Debido a que el efecto piezoeléctrico se lleva a cabo por medio de campos eléctricos éstos actuadores no producen campos magnéticos ni están afectados por ellos, es por ellos que estos dispositivos son especialmente adecuados en aplicaciones donde los campos magnéticos no son tolerados.
- Bajos consumos energéticos, debido a que el comportamiento de los piezoeléctricos son muy similares a los condensadores eléctricos, cuando están en reposo no generan calor y en funcionamiento estático incluso bajo cargas pesadas durante largos periodos de tiempo prácticamente no consumen energía.
- Al no tener elementos móviles y siendo el movimiento consecuencia de la dinámica del sólido no existe desgaste, ofreciendo ningún cambio en su rendimiento tras varios millones de ciclos. Por otro lado, tampoco requieren de lubricación.

- g. Permiten su uso en un elevado rango de temperatura por debajo de su temperatura de Curie incluso a temperaturas criogénicas cercanas a cero grados Kelvin.

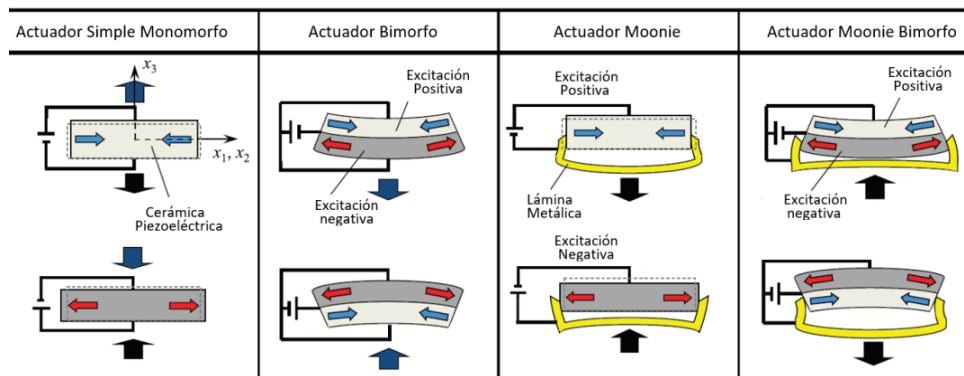
### **2.5.3. Sistemas de microbombeo basados en actuadores piezoeléctricos**

En el uso de sistemas de microbombeo los actuadores piezoeléctricos comienzan a utilizarse en la década de los años ochenta, desde entonces han jugado un importante rol en el desarrollo de sistemas de microfluídica extendiéndose ampliamente en impresoras de chorro de tinta (Inkjet) la patente americana 3,946,398 de 1976 da buena cuenta de ello [232]. Por otro lado, también han sido utilizados en dispositivos químicos, médicos y aplicados al campo de la biología donde la microdosificación toma un papel fundamental.

Como se ha podido apreciar anteriormente éstos sistemas de microbombeo basados en piezoeléctricos ofrecen precisión, fuerza, velocidad de respuesta, elevado rendimiento y fiabilidad, así como la capacidad de miniaturización. La primera bomba piezoeléctrica sin válvulas se desarrolló en 1993 [233]. Desde entonces, muchas bombas sin válvulas accionadas por actuadores piezoeléctricos han sido desarrolladas.

El rendimiento de estas bombas depende de su diseño, de la topología de los canales y del actuador. En cuanto a los canales, la mayoría de las bombas sin válvulas pueden clasificarse en dos tipos. Las primeras son aquellas donde los canales o las conducciones son verticales respecto al actuador ya sea éste en forma de placa o cámara (en sistemas de impresión los sistemas Squeeze son un buen ejemplo de ello). El segundo tipo de bomba sin válvulas tiene canales de flujo horizontales conectados a una cámara donde se encuentra el actuador piezoeléctrico en forma de placa o lámina (sistemas Push, Shear y Bend, en sistemas de impresión). Por otro lado, los actuadores también pueden clasificarse de dos tipos: los primeros son llamados actuadores monomorfos constituidos por una única estructura cerámica piezoeléctrica solidaria aun sustrato, y el segundo tipo de actuadores son aquellos constituidos por múltiples capas de material piezoeléctricos solapados entre si y separados por los correspondientes electrodos. En aquellos casos donde se busca una mayor flexión de los actuadores más no un desplazamiento axial del mismo en la misma proporción, y con el fin de magnificar su deformación las capas son excitadas en sentido inverso, es decir, sometidas a un campo eléctrico opuesto (ver Figura 189). Existen otros tipos de actuadores basados en la flexión, en los cuales los piezoeléctricos no se encuentran unidos una placa delgada que los soporta de la misma forma. Estos sistemas fueron diseñados con el fin de magnificar las consecuencias del desplazamiento de los piezoeléctricos los cuales producen la flexión del mismo, estos sistemas utilizados en aplicaciones de microbombeo se les conoce como actuadores Moonie, los cuales se basan en la utilización de una lámina metálica cuya disposición magnifica la deformación inducida por el piezoeléctrico. Los actuadores Moonie se han utilizado en múltiples sistemas de microbombeo seguidos de mejoras en su geometría y alojados en canales con topologías

avanzadas. Hasta ahora, sólo se han empleado estructuras piezoeléctricas simples, aunque como expone Y. Uetsuji et al. [234], una estructura bimorfa de los piezoeléctricos permitiría la generación de desplazamientos mayores en sistemas de microbombeo basados en actuadores del tipo Moonie.



**Figura 189:** Comparación entre distintos mecanismos diseñados para magnificar la deformación de los actuadores piezoeléctricos utilizados en sistemas de microbombeo [234].

En los sistema de impresión DOD por piezoeléctricos del tipo Bend basados en el resonador de Helmholtz y más concretamente en el sistema utilizado en el cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 como se podrá apreciar en apartados siguientes, utiliza actuadores del tipo Monomorfo en forma de láminas los cuales se apoyan sobre la cámara de bombeo en un sustrato flexible. En cuanto los canales éstos se encuentran dispuestos de forma horizontal en las inmediaciones del piezoeléctrico y de forma paralela constituyen los 16 sistema de bombeo de los cuales está formado. La excitación de los piezoeléctricos se realiza a través del electrodo superior y del electrodo existente en el sustrato flexible, de modo que el eje de polarización es vertical.

### 2.5.3.1. Piezoeléctricos utilizados en sistemas de impresión Inkjet DOD

Los actuadores utilizados en los sistemas de impresión DOD Inkjet, y en concreto en los del tipo Bend suelen estar constituidos dentro de una estructura cerámica en nuestro caso a base de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) comúnmente utilizado en MEMS en cuyo interior se mecanizan los canales, y las distintas cámaras de bombeo con sus correspondientes orificios de salida (nozzles), éstos actuadores piezoeléctricos por otro lado, constructivamente suelen ser del tipo Monomorfo simple y en concreto pertenecientes al tipo comercialmente conocido como PZT-5H, es decir, del tipo Navy Type VI. En la patente US 5371527-A perteneciente a la compañía Hewlett-Packard se da buena cuenta de ello. En el caso que nos ocupa utilizaremos las características de los piezoeléctricos de esta clase afín de modelizar y controlar el proceso de eyección en los cartuchos Fujifilm Dimatix del tipo DMC-11610.

Se ha considerado oportuno resaltar algunas de las principales características tomadas de [235] que se ha de tener en cuenta desde el punto de vista del diseño de dispositivos con elementos piezoeléctricos, para finalmente hacer uso de algunos de ellos tomando como referencia los valores medios de piezoeléctricos del tipo PZT-5H anteriormente comentado, así entre sus principales características tenemos:

**Constante de carga piezoeléctrica ( $d_{ij}$ ):** sus unidades son m/V o C/N. Relaciona la deformación o variación dimensional que sufre el material piezoeléctrico en función de la diferencia de potencial aplicada, o también relaciona la generación de carga eléctrica producida en Coulombs por una fuerza aplicada sobre el mismo. Es un valor indispensable en aplicaciones de posicionamiento o sensores fuerza-deformación, siendo valores típicos de 0,2 a 8 Angstroms por Volt aplicado, y de 20 a 800 pico Coulomb por Newton aplicado, para cerámicas piezoeléctricas de PZT.

**Constante de tensión piezoeléctrica ( $g_{ij}$ ):** esta constante nos proporciona una relación entre la diferencia de potencial generada en una cerámica de una longitud dada en función de una fuerza aplicada o el cuadrado de la deformación producida en función de la carga aplicada (unidades: V·m/N o m<sup>2</sup>/C). Estos valores son indispensables por ejemplo en el diseño de detonadores de impacto en encendedores de cocina. Entre los valores típicos tenemos de -1 a 60 V/N en una cerámica de un metro de longitud en su eje de polarización.

**Coefficiente de acoplamiento ( $K_{ij}$ ):** también es conocido como el factor de enganche mecánico, este valor es adimensional y relaciona la eficiencia del material en la transducción o conversión entre la energía eléctrica y la mecánica, y viceversa. Entre los valores típicos tenemos de 0.02 (2% de eficiencia) a 0.75 (75% de eficiencia), para cerámicas piezoeléctricas de PZT. La importancia de este valor radica en el diseño de dispositivos sometidos a esfuerzos, cargas o vibraciones en ejes distintos a de polarización que puedan generar interferencias, en este caso se busca que el factor de acoplamiento sea lo menor posible en esos ejes.

**Factor de calidad mecánica ( $Q$ ):** este valor al igual que el anterior no posee unidades y es una medida del amortiguamiento del material, es decir, como éste atenúa las oscilaciones mecánicas del material hasta alcanzar el reposo. Los valores típicos de los PZT's varían desde los 50 a 1500.

**Factor de disipación dieléctrica ( $Tan \delta$ ):** este valor también es adimensional e indica las pérdidas o la disminución dieléctrica del material. En este caso las cerámicas piezoeléctricas poseen unos valores típicos de  $2 \times 10^{-3}$  a  $25 \times 10^{-3}$  siendo un valor importante en el diseño de dispositivos dinámicos de alta potencia y/o sometidos a altos campos eléctricos.

**Temperatura de Curie ( $T_C$ ):** como ya se ha comentado representa un dato fundamental en el uso de materiales piezoeléctricos estableciendo el punto en el que el material pierde su

polarización remanente, perdiendo propiedades piezoeléctricas tornándose inservible. Los valores típicos varían entre los 150 a 390°C para cerámicas piezoeléctricas de PZT, siendo éstas el límite máximo de su funcionamiento.

**Constantes de frecuencia ( $N_k$ ):** este factor permite la estimación de la frecuencia de resonancia de los dispositivos piezoeléctricos sus unidades son Hercios metro y las cerámicas piezoeléctricas ofrecen unos valores típicos de 800 a 3000 H<sub>2</sub>m. Son valores importantes a tener en cuenta en dispositivos de alta frecuencia próxima a la de resonancia del elemento piezoeléctrico. Este dato suele exponerse de dos formas desde un punto de vista radial ( $N_L$ ) y desde un punto de vista longitudinal ( $N_h$ ) de modo que, en un piezoeléctrico en forma de rectángulo tenemos:

$$N_L = f_s L \quad , \quad N_h = f_s h \quad 3. 234$$

Donde  $f_s$ ,  $L$ ,  $h$  representan frecuencia de resonancia y las dimensiones del PZT en sentido longitudinal o transversal y altura respectivamente.

**Impedancia acústica ( $Z$ ):** este valor utiliza como unidades MRayls ( $k_g/m^2s$ ) y representa la forma en que la energía mecánica se propaga por un medio, es una propiedad análoga a la del índice de refracción. La diferencia entre las impedancias acústicas de dos medios adyacentes es determinante de la fracción de la energía reflejada y transmitida de una onda que incide en la interfaz. Los valores típicos de las cerámicas piezoeléctricas van desde los 25 a los 40 MRayls ( $Z$  de agua: 2 MRayls y del aire aproximadamente  $1 \times 10^{-3}$  MRayls). Este valor es de importancia en dispositivos capaces de emitir o captar ultrasonidos o vibraciones mecánicas.

**Ratio de envejecimiento ( $AR$ ):** este valor hace referencia a la evolución temporal de algunas de las propiedades anteriores las cuales cambian hasta alcanzar una cierta estabilidad, entre ellas tenemos; las constantes dieléctricas, los acoplamiento y las constantes piezoeléctricas. Estas constantes se miden de forma exacta después del Poling y posteriormente son estimadas en función de este envejecimiento, que por otro lado puede verse acelerado mediante la exposición de la cerámica a una o más combinaciones de las siguientes condiciones:

- a. Alta tensión mecánica.
- b. Fuerte campo eléctrico.
- c. Temperaturas cercanas al punto de Curie.

Por otra parte, estos valores son aportados únicamente por cada fabricante. En el caso de Morgan Advanced Material [236] afín de predecir la evolución sus cerámicas en el tiempo propone estimarlas mediante la siguiente expresión:

$$X_T = X_t + AR(\log T - \log t) \quad 3. 235$$

Donde  $X_T$  representa la magnitud de la propiedad de interés después de  $T$  días respecto al momento del Poling ( $t$ ), siendo  $X_t$  el valor de dicha propiedad y  $AR$  el ratio de envejecimiento.

**Constante dieléctrica ( $K_{ij}^T$ ):** algunos proveedores proporcionan este dato expresado en función a la permitividad del vacío ( $\epsilon_0$ ) donde el exponente  $T$  denota que el piezo eléctrico se ve expuesto a una tensión mecánica constante o inexistente:

$$K_{33}^T = \frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} \quad , \quad K_{11}^T = \frac{\epsilon_{11}^T}{\epsilon_0} \quad 3. 236$$

A partir de este valor es posible obtener la permitividad eléctrica del material, esencial para modelizar el efecto piezoeléctrico inverso en los actuadores, en materiales isotrópicos este valor es un escalar mientras que, en un material de cualquier otro tipo, es un tensor de segundo orden.

**Módulo de Young ( $Y_{ij}^E, Y_{ij}^D$ ) y Flexibilidad elástica ( $s^E, s^D$ ):** Además de los parámetros anteriores los fabricantes de piezoeléctricos proveen los valores del comportamiento elástico-resistente de sus cerámicas, éstas a su vez suelen ser dadas de dos formas: en primer lugar cortocircuitando los electrodos del piezoeléctrico, de modo que sus valores son medidos bajo un campo eléctrico constante, es por ello que se representan por el superíndice  $E$ . En segundo lugar también son presentados éstos (los valores) bajo un flujo electrostático constante, es decir en un circuito abierto, en este caso son identificados con el superíndice  $D$ . Por otro parte, los materiales piezoeléctricos se comportan como un material transversalmente isótropo (caso particular de los materiales ortótropo en donde existe una dirección preferente o longitudinal y todas las secciones perpendiculares a la misma son mecánicamente equivalentes), es por ello que en estos materiales proporcionan un valor axial en sentido de la polarización digamos en sentido  $Z$  y otro radial, siendo el mismo en dirección  $X$  que en  $Y$ . Por otro lado, respectivamente estos valores hace alusión a su resistencia a la deformación en  $N/m^2$  y su inversa a la deformación en función de un esfuerzo ( $m^2/N$ ).

De manera que algunas de las características anteriormente expuestas son esenciales a la hora de utilizar estos materiales en el diseño y control, como es nuestro caso de actuadores basados en el efecto piezoeléctrico inverso aplicados en sistemas Inkjet. Así pues, a continuación en la Figura 190 se muestran algunas de éstas propiedades de las cerámicas piezoeléctricas en concreto las del tipo Navy Type VI ("Soft") PZT-5H comercializados por Morgan advanced materials, las cuales serán tenidas en cuenta como referencia en el desarrollo de la modelización del cartucho de impresión Inkjet.

Material		Unidades	PZT-5H1	PZT-5H2
Designación			Soft PZT	Soft PZT
Navy Type			VI	VI
En 50324-1			600	600
<b>Propiedades Térmicas</b>				
Temperatura de Curie	$T_C$	$^{\circ}\text{C}$	195	195
Temperatura máxima de trabajo	$T_{MAX}$	$^{\circ}\text{C}$	95	95
<b>Propiedades Mecánicas</b>				
Densidad	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	7700	7600
Coef. Poisson	$\sigma$	-		0,31
Flexibilidad Elástica	$S_{33}^E$	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	20,80	18,42
	$S_{11}^E$	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	16,40	16,93
	$S_{33}^D$	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	9,00	8,06
	$S_{11}^D$	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	14,10	14,24
Módulos de Young	$Y_{33}^E$	$\times 10^{10} \text{ N/m}^2$	7,00	5,43
	$Y_{11}^E$	$\times 10^{10} \text{ N/m}^2$	7,00	5,91
	$Y_{33}^D$	$\times 10^{10} \text{ N/m}^2$	12,41	12,41
	$Y_{11}^D$	$\times 10^{10} \text{ N/m}^2$	7,03	7,03
<b>Propiedades Eléctricas</b>				
Constante dieléctrica	$K_{33}^T$		3400	3311,00
	$K_{11}^T$			2872,00
Perdidas dieléctrica	$\tan \delta$			1,70%
Campo coercitivo	$E_C$	$\text{kV/m}$		0,80
<b>Propiedades Piezoeléctricas</b>				
Coeficientes de acoplamiento	$K_p$	-	0,60	0,68
	$K_{31}$	-	0,35	0,40
	$K_{33}$	-	0,72	0,75
	$K_T$	-	0,50	0,32
	$K_{15}$	-		0,68
Constante de carga piezoeléctrica	$d_{33}$	$\text{pC/N o pm/V}$	650,00	685,00
	$d_{31}$	$\text{pC/N o pm/V}$	320,00	240,00
	$d_{15}$	$\text{pC/N o pm/V}$		741,00
Constante de tensión piezoeléctrica	$g_{33}$	$\times 10^{-3} \text{ Vm/N}$	21,90	23,40
	$g_{31}$	$\times 10^{-3} \text{ Vm/N}$	8,70	9,60
	$g_{15}$	$\times 10^{-3} \text{ Vm/N}$		25,80
Constantes de frecuencia	$N_p$	$\text{Hz-m}$	1975,00	1920,00
	$N_l$	$\text{Hz-m}$	1375,00	1420,00
	$N_{3t}$	$\text{Hz-m}$	1895,00	2000,00
	$N_s$	$\text{Hz-m}$	1430,00	1670,00
Factor de calidad mecánica	$Q_m$	-	65,00	69,00
<b>Estabilidad temporal</b>				
Envejecimiento dieléctrico	$\alpha$	por década	-1,50%	-1,70%
Envejecimiento de los coef. D	$\alpha$	por década		-1,60%
Envejecimiento de los coef. K	$\alpha$	por década	-0,20%	-0,20%
Envejecimiento frecuencia	$\alpha$	por década	0,30%	0,40%

Se proporciona valores de diseño, medidos a  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , cuyas tolerancias estándar son aproximadamente  $\pm 20\%$

**Figura 190:** Datos ofrecidos por Morgan advanced materials de las propiedades de los materiales de los piezoeléctricos del tipo Navy Type VI ("Soft") PZT-5H [237].

## 2.5.4. Modelización del efecto piezoeléctrico inverso en actuadores de sistemas Inkjet

Los materiales piezoeléctricos poseen un comportamiento electromecánico, su modelización se realiza mediante ecuaciones constitutivas donde se superpone principalmente dos puntos de vista; uno mecánico y uno eléctrico. Por otro lado, el comportamiento de estos materiales se ve modificados en función de la frecuencia a la que trabaje ya sea por efecto piezoeléctrico directo (transductor, elementos pasivos) o efecto piezoeléctrico inverso

(actuador, elementos activos), es por ello que a continuación se hace una pequeña distinción al respecto, por otra parte, la temperatura también es un factor importante a tener en cuenta en el diseño y control de sistemas accionados por cerámicas piezoeléctricas.

### 2.5.4.1. Comportamiento a baja frecuencia

Afín de comprender y modelizar el comportamiento de los materiales piezoeléctricos hemos de recurrir en primera instancia a la resistencia de materiales y en concreto a la ley de Hooke o de proporcionalidad para establecer las ecuaciones constitutivas con las cuales definir el efecto piezoeléctrico. A través de ésta ley se establece una relación lineal entre la deformación (zona elástica de los materiales) que experimenta un sólido sometido a esfuerzos. De modo que, haciendo uso del cálculo tensorial tenemos que los esfuerzos definidos como:  $T = [\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}]^T$  mediante la ley de Hooke generalizada se puede definir desde un punto de vista mecánico y resistente como:

$$[T] = [C] \cdot [S] \quad 3.237$$

Nótese que se utiliza una notación diferente afín de no confundir los términos mecánicos con los eléctricos, donde  $T$  representa el estado tensional (fuerza por unidad de superficie) y  $S$  la deformación relativa que experimenta el sólido, generalmente representado por  $(\epsilon)$ , estando estos relacionados de forma lineal por los coeficientes de rigidez cuyo tensor ( $C$ ) se encuentra constituido por el módulo de Young ( $E$ ) y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) los cuales son propios del sólido y por tanto de su naturaleza. Así pues, reescribiendo la relación anterior afín de conocer las deformaciones de dicho material desde un punto de vista mecánico y elástico tenemos que:

$$[S] = [s] \cdot [T] \quad 3.238$$

Donde  $s$  ahora es el tensor de coeficientes de elasticidad o la flexibilidad elástica del elemento como ya se ha comentado anteriormente  $[s] = [C]^{-1}$  siendo este un material otrótopo, escrito en forma matricial la ecuación anterior puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{yx}/E_y & -\nu_{zx}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xy}/E_x & 1/E_y & -\nu_{zy}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xz}/E_x & -\nu_{yz}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G_{xz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2G_{yz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} \quad 3.239$$

Siendo  $E, \nu, G$ , sus correspondientes módulos de Young, coeficientes de Poisson y módulos de rigidez respectivamente. Por otra parte, desde un punto de vista eléctrico, el comportamiento dieléctrico de un sólido lineal está descrito por su tensor de permitividad eléctrica  $[\epsilon]$  el cual relaciona el campo eléctrico  $[E]$  con el vector desplazamiento o de densidad de flujo eléctrico  $[D]$ , que da cuenta de cómo se polariza el sólido:

$$[D] = [\epsilon] \cdot [E] \quad 3.240$$



De modo que, como hemos visto anteriormente los materiales piezoeléctricos presentan una relación causa-efecto entre los fenómenos mecánicos y los fenómenos eléctricos. La polarización que presenta el sólido en cuestión es función del campo eléctrico aplicado y también de los esfuerzos mecánicos. Así pues, el fenómeno piezoeléctrico puede ser explicado mediante la combinación de las ecuaciones anteriores, con ellas es posible establecer la relación entre carga y deformación única en estos materiales.

Así el vector desplazamiento eléctrico también llamado densidad de flujo eléctrico o excitación eléctrica viene dado por:

$$[D] = [d] \cdot [T] + [\varepsilon] \cdot [E] \quad 3.241$$

Donde  $[d]$  es el tensor de coeficientes piezoeléctricos. Por otra parte, en el fenómeno inverso: la deformación como función tanto de los esfuerzos mecánicos como del campo eléctrico aplicado. Puede ser definido como:

$$[S] = [s^E] \cdot [T] + [d]^T \cdot [E] \quad 3.242$$

Donde los superíndices  $T$  y  $E$  representan que la matriz es transpuesta y que las constantes piezoeléctricas del material han sido medidas bajo campo eléctrico constante (corto circuitando los electrodos de las caras exteriores), por otra parte se ha de aclarar que en este caso,  $d$  representa el tensor del efecto piezoeléctrico inverso de unidades  $(m/V)$  no el inverso del tensor  $d$  de unidades  $(C/N)$ . En el caso de que los electrodos no se encuentren corto circuitados, por tanto en un circuito abierto la densidad del flujo electrostático se mantiene constante y en este caso se utiliza el superíndice  $D$  de modo que se tienen que:

$$[E] = [g] \cdot [T] + \frac{[D]}{[\varepsilon]^T} \quad 3.243$$

$$[S] = [s^D] \cdot [T] + [g] \cdot [D]$$

Es decir, de las ecuaciones anteriores se aprecia que existen dos formas de definir las constantes piezoeléctricas de un material ( $d$  y  $g$ , ver Figura 191).

Constantes	Definición	Unidades
$d$	$\frac{\text{Desplazamiento - Dieléctrico - Desarrollado}}{\text{Esfuerzo - Mecánico - Aplicado}}$	$\frac{C}{N}$
	$\frac{\text{Tensión - Desarrollado}}{\text{Campo - Aplicado}}$	$\frac{m}{V}$
$g$	$\frac{\text{Campo - Desarrollado}}{\text{Esfuerzo - Mecánico - Aplicado}}$	$\frac{V \cdot m}{N}$
	$\frac{\text{Tensión - Desarrollado}}{\text{Desplazamiento - Dieléctrico - Aplicado}}$	$\frac{m^2}{C}$

**Figura 191:** Definición de constantes  $d$  y  $g$  bajo distintas interpretaciones [Fuente: Elaboración propia].

De modo que, tomando como referencia las cerámicas PZT-5H mostradas en la Figura 190, el efecto piezoeléctrico de estas cerámicas puede modelizarse utilizando el primer par de

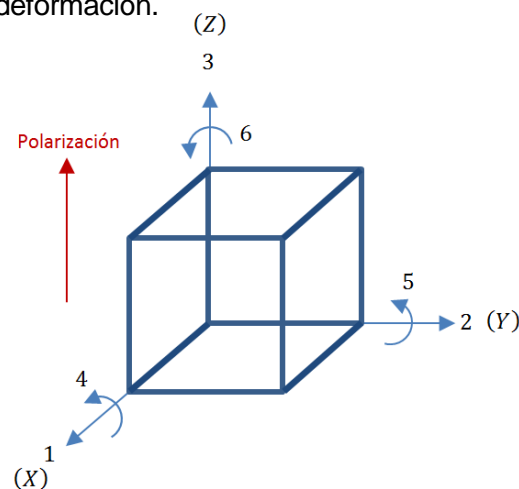
ecuaciones 3. 241 y 3. 242, por otra parte, tomando como referencia el sentido de los ejes de la Figura 192 desde un punto de vista matricial éstas se pueden describir como:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

3. 244

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

Podemos observar que el conjunto de subíndices están relacionados con un sistema ortogonal de tres ejes (XYZ) en el que se ha considerado al eje Z paralelo al sentido de la polarización que va desde el polo positivo al polo negativo del material piezoeléctrico. El subíndice 1 indica en dirección al eje "X", el subíndice 2 al eje "Y" y el subíndice 3 al eje "Z". De modo que, los subíndices 4, 5 y 6 representan la deformación cortante asociada a dichos ejes iniciales. El subíndice 4 indica deformación en torno al eje "X", el subíndice 5 deformación en torno al eje "Y" y el subíndice 6 deformación en torno al eje "Z". Por otro lado, en el caso de las constantes dieléctricas  $\varepsilon$  el primer subíndice hace referencia a la dirección del desplazamiento eléctrico, y el segundo indica la dirección del campo eléctrico bajo las condiciones de tensión  $T$  constante. En las constantes de flexibilidad elásticas  $s$  el primer subíndice hace alusión a la dirección de la deformación relativa y el segundo a la dirección de la tensión bajo las condiciones de un campo eléctrico  $E$  constante. En el caso de las constantes piezoeléctricas  $d$  el primer subíndice se refiere a la dirección del campo eléctrico y el segundo a la deformación.



**Figura 192:** Sistema utilizado en la modelización de las propiedades piezoeléctricas

[Fuente: Elaboración propia].

La deformación de un piezoeléctrico libre no sometido a un esfuerzo mecánico en la dirección  $Z$  puede definirse como:

$$[S] = [d]^T \cdot [E] \rightarrow \frac{\Delta Z}{h_{PZT}} = d_{33}E_3 = d_{33} \frac{V}{h_{PZT}} \quad 3.245$$

Donde  $V$  representa la diferencia de potencial entre las caras superior e inferior, tal y como se muestra en la figura anterior, con un  $d_{33}$  de alrededor de los  $650 \text{ pm/V}$ . Una excitación del mismo con una voltaje de  $10 \text{ V}$  produciría un desplazamiento en dirección  $Z$  de  $6.5 \text{ nm/V}$ . Por otra parte, debido a que los materiales piezoeléctricos se comportan de forma transversalmente isotrópica ante una diferencia de potencial en sus electrodos, éstos se deforman de diferente forma en sentido perpendicular al eje de polarización, es por ello que sus coeficientes de piezoelectricidad son distintos respecto al de eje  $Z$  aunque iguales tanto en sentido  $X$  como  $Y$ , luego:

$$\frac{\Delta x}{x_0} = d_{31} \frac{V}{h_{PZT}} \quad , \quad \frac{\Delta y}{y_0} = d_{31} \frac{V}{h_{PZT}} \quad 3.246$$

Por otro lado, con el objetivo de incrementar la relación voltaje-deformación y teniendo en cuenta que desde un punto de vista electrónico es preferible que la magnitud de las excitaciones sean bajas, generalmente los actuadores adoptan una estructura de múltiples capas superpuestas (actuadores bimorfos o superiores) como se aprecia en la Figura 193, de modo que:

$$d_{\text{capa}} = \frac{h_{PZT}}{n} \rightarrow \Delta Z = nd_{33}V \quad 3.247$$

Donde  $n$  representa el número de capas. De modo que bajo esta configuración la magnitud de la excitación puede ser  $n$  veces más pequeña para una misma deformación. Aunque por otro lado, se ha de tener en cuenta la corriente máxima producida durante la carga y descarga de los piezoeléctricos, es decir, teniendo en cuenta que la carga total del mismo es dependiente de su masa y las características del mismo pero donde la corriente es asuvez una función del tiempo y por tanto se genera durante el transcurso de un transcurso de tiempo llamémosle  $t_{p1}$  como se puede apreciar en la Figura 134. Ya sea por efecto directo o inverso mientras menor sea  $t_{p1}$  mayor será la magnitud de la corriente, por tanto éste es un valor condicionante en la electrónica que permite la gestión de los actuadores, es decir:

$$I_{\text{max}} = \frac{Q}{t_{p1}} \quad 3.248$$

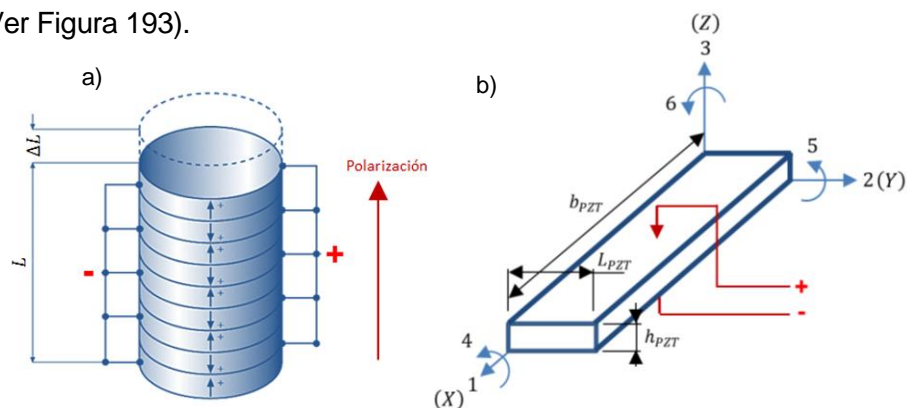
Donde la carga total de dicho piezoeléctrico puede definirse como:

$$Q = (L_{PZT} \cdot b_{PZT})D = \varepsilon_{33}S_{PZT}E_3 = \left( \frac{\varepsilon_{33}S_{PZT}}{h_{PZT}} \right) V = CV \quad 3.249$$

Y en el caso de tener un actuador constituido por  $n$  capas de material piezoeléctrico, el área total se convierte en  $n S_{PZT}$  y el campo eléctrico  $E_3$  en  $nV/h_{PZT}$ , de modo que su capacitancia se describe como:

$$C = \frac{n^2 \varepsilon_{33} S_{PZT}}{h_{PZT}} \quad 3.250$$

Con las ecuaciones 3. 248, 3. 249, 3. 250 y el hecho de que el voltaje de activación requerido se ha escalado en  $1/n$ , podemos apreciar la corriente máxima producida aumenta con el número de capas  $n$ , con lo cual independientemente del número de capa que posea el actuador la relación deformación-potencia eléctrica se mantiene constante, aunque la limitación impuesta por la corriente condiciona el número máximo aplicable de capas dentro de un elemento piezoeléctrico. A pesar de ello en el caso que nos ocupa se ha considerado a los actuadores existente en el interior de nuestro sistema tipo Bend como monomorfo, es decir, constituido por una única cerámica piezoeléctrica debido a las reducidas dimensiones de estas (Ver Figura 193).



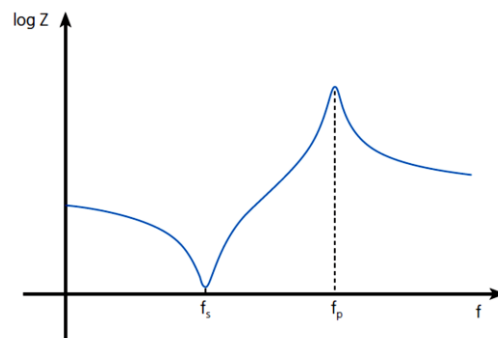
**Figura 193:** Diseño de un actuador piezoeléctrico del tipo pila a). Representación esquemática del actuador piezoeléctrico del sistema Inkjet donde el eje  $z$  es su eje de polarización b [Fuente: Elaboración propia].

#### 2.5.4.2. Comportamiento a alta frecuencia

Como se ha podido apreciar cuando un elemento cerámico piezoeléctrico es expuesto a un campo eléctrico este se deforma en lo que se conoce como efecto piezoeléctrico inverso. De modo que, cuando el campo es de polaridad alterna (AC) éste cambiará sus dimensiones cíclicamente según la frecuencia de dicha señal. Cada elemento por otro lado, tiene una frecuencia de resonancia propia dependiente de la composición, forma y volumen del material, las constantes de frecuencia ( $N_k$ ) dan buena cuenta de ello. Por otro lado, mediante el coeficiente de acoplamiento o factor de enganche mecánico ( $K_{ij}$ ) se puede apreciar que a medida que la frecuencia de excitación se encuentra más próxima a la de resonancia éstos materiales vibran con más facilidad y por tanto ofrecen conversiones electro-mecánicas o mecánico-eléctricas más eficientes.

La impedancia de un elemento cerámico piezoeléctrico ( $Z$ ) es función de la frecuencia de excitación. En el caso de un sistema pasivo (sensor) a medida que se aumenta la frecuencia de excitación mecánica la impedancia del mismo decrece hasta alcanzar un mínimo en la que se conoce como a la frecuencia de resonancia en serie ( $f_s$ ), si se continúa aumentando

la frecuencia de excitación la impedancia de la cerámica cambia su tendencia y crece hasta alcanzar un máximo en la que se conoce como frecuencia en paralelo ( $f_p$ ) para después decrecer a partir de este punto. De modo que, en un primer tramo  $f < f_s$  las cerámicas tienen un comportamiento capacitivo mientras que en el siguiente tramo  $f > f_s$  estas se comportan de manera inductiva (Ver Figura 194).



**Figura 194:** Evolución de la impedancia de los elementos piezoeléctricos en función de la frecuencia de excitación [238].

En los sistemas Inkjet donde los elementos piezoeléctricos funcionan como actuadores, en muchos casos son alimentados mediante una tensión unipolar, aunque constituida como se ha podido ver (Figura 139) de trenes de pulsos con cierta periodicidad. Periodicidad a su vez que se encuentra alejada de la frecuencia de resonancia del elemento piezoeléctrico, por lo que el comportamiento del mismo es del tipo capacitivo, es decir:

$$Z = R + jX_C \quad ; \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad 3. 251$$

Donde  $f$  representa la frecuencia de excitación eléctrica (frecuencia de los trenes de pulso) y  $C$  la capacitancia del actuador descrita en la ecuación 3. 250. De modo que, mediante la figura y ecuación anteriores, es posible apreciar que si la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia de resonancia en serie de la cerámica ( $f = f_s$ ) el consumo eléctrico sufrirá un pico y la amplitud de oscilación aumentará en ausencia de amortiguación externa. En cuanto a dicho consumo eléctrico este puede definirse como:

$$P = V \cdot I = \frac{V^2}{Z} \quad 3. 252$$

Donde la tensión se retrasará respecto la corriente, y las pérdidas energéticas producidas por la resistividad equivalente del circuito son disipadas por efecto Joule.

#### 2.5.4.3. Influencia de la temperatura en los efectos ferroeléctricos y piezoeléctricos

Como puede apreciarse en la Figura 197, en algunos sistemas de impresión Inkjet DOD como es el caso del sistema Fujifilm Dimatix, el sistemas de microbombeo accionado por

piezoeléctricos existentes en el interior del cartucho DMC-11610 viene acompañado por un sistema calefactor, constituido de resistencia y termistor, con el cual se busca, calentando el sistema, modificar las condiciones reológicas de las tintas facilitando el proceso de eyección. De modo que, en estos sistemas ideados con el propósito de ofrecer un equipo de impresión más abierto y flexible, capaz de eyectar un rango mayor de fluidos, tintas, suspensiones, etc., recurren al uso de la termodinámica.

Desde el punto de vista de los actuadores su comportamiento se ve ligeramente modificado a consecuencia del incremento de la temperatura, de modo que haciendo uso de la Ec. 3. 242 la cual describe el efecto piezoeléctrico inverso de los mismos, ésta se ve modificada a:

$$[S] = [s^E] \cdot [T] + [d]^T \cdot [E] + [\alpha] \cdot [\Delta T] \quad 3. 253$$

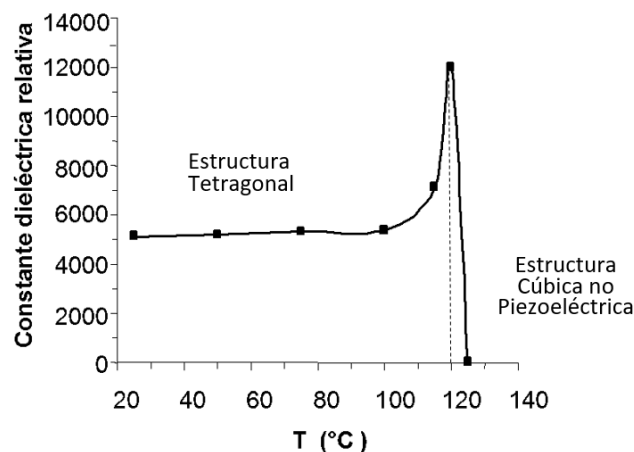
Donde  $\alpha$  de unidades  $1/^\circ C$  representa el vector de coeficientes de dilatación térmica lineal y  $\Delta T$  la diferencia de temperatura entre las caras distintas caras del elemento piezoeléctrico el cual considerándolo isotrópico podríamos decir que:  $\alpha = [\alpha_1, \alpha_1, \alpha_1, 0, 0, 0]^T$  donde a su vez  $\alpha_1 = 1/L_0 \Delta L/\Delta T$  [239].

Por otro lado, como ya se ha comentado anteriormente la polarización de las cerámicas ferroeléctricas se lleva a cabo bajo un fuerte campo eléctrico y a temperaturas próximas aunque ligeramente por debajo de su temperatura de Curie, de esta forma se logra que las cerámicas ofrezcan un comportamiento piezoeléctrico posterior, comportamiento que también puede ser anulado en un proceso inverso, en donde ya sea mediante la inversión de la tensión eléctrica o por la inducción de un elevado esfuerzo mecánico o simplemente por el aumento de la temperatura más allá del límite establecido por Curie (donde un cambio en la estructura cristalina de las cerámicas marca la transición de la fase ferroeléctrica a la no-ferroeléctrica). De modo que, el sistema calefactor se encuentra limitado a una temperatura máxima inferior a dicho punto.

Cabe resaltar por otra parte, que la temperatura es uno de los factores más influyentes de la degradación de las cerámicas piezoeléctricas, degradación que difiere del envejecimiento que anteriormente se ha definido a través del ratio de envejecimiento (AR) en la Ec. 3. 235, ya que en ella no se ha tenido en cuenta la temperatura. De modo que, en el caso que nos ocupa, donde los actuadores piezoeléctricos existentes en el interior de las cámaras de bombeo del sistema Inkjet se encuentran sometidos a un estrés térmico, el envejecimiento de los materiales piezoeléctricos se ve magnificado por una degradación térmica siendo éste un valor importante a tener en cuenta afín de garantizar la fiabilidad de la respuesta de los cartuchos y en consecuencia del sistema Inkjet en el tiempo (aspecto RICOH ofrece en sus cabezales industriales una fiabilidad de al menos 1 trillon de gotas). Por lo general con el fin de minimizar dicha degradación, la cual implica un cambio perjudicial en las propiedades de

la cerámica de actuador, se restringe la influencia del sistema calefactor sobre dicho material generalmente a  $\sim \frac{1}{2} T_c$  [240].

A continuación en la Figura 195 se manifiesta la influencia de la temperatura en el comportamiento dieléctrico del titanato de bario ( $\text{BaTiO}_3$ ) piezoeléctrico del tipo: Navy Type IV ("Soft") según la clasificación presentada en apartados anteriores.



**Figura 195:** Comportamiento ferroeléctrico del titanato de bario con la temperatura [241].

Como se puede apreciar en la figura anterior por debajo de la temperatura crítica a  $T < T_c$  las cerámicas perovskitas de estructura tetragonal, si han sido polarizadas previamente presenta una polarización remanente ofreciendo un comportamiento piezoeléctrico, pero a medida que se eleva la temperatura del elemento, al pasar de la temperatura crítica se entra en una fase de transición donde cada ligero aumento en la temperatura disminuye el valor adimensional de la permitividad eléctrica relativa ( $K_{33}^T$ ) perdiéndose la capacidad de respuesta como ferroeléctrico y piezoeléctrico del actuador.

Así pues, tras el Poling y a bajas temperaturas como ya se ha comentado las propiedades de las cerámicas piezoeléctricas tienden a estabilizarse alcanzando un valor fijo situación que se contempla con el ratio de envejecimiento, pero al verse éstas sometidas a un estrés térmico continuo como es en nuestro caso, dicha estabilización se ve modificada produciéndose un degradación de ésta propiedades, siendo éstas más significativas mientras mayor sea la temperatura del entorno y mientras más próxima sea ésta al punto de Curie del material piezoeléctrico.

En este aspecto recientemente se ha hecho público una nueva tecnología desarrollada por Isralitas en asociación con un grupo de investigadores chinos llamada XJET (mostrada por primera vez en Europa en la exposición de Frankfurt Formnext el 15 de noviembre del 2016), donde mediante un sistema Inkjet son capaces de reproducir piezas tridimensionales mediante la deposición controlada de suspensiones metálicas calentadas a elevadas temperaturas. Durante el proceso de eyección las nano partículas metálicas inmersas dentro de un medio fluido son calentadas a temperaturas próximas a los  $300^{\circ}\text{C}$  de modo que la

fase líquida se evapora al salir del nozzle durante la trayectoria que realiza hasta impactar en el sustrato y las partículas de la fase sólida establecen una unión entre las mismas a modo de sinterización (las diminutas dimensiones de las mismas permiten dicha unión a temperaturas sensiblemente más bajas a su punto de fusión debido a su gran ratio superficial). Como resultado las piezas obtenidas poseen una densidad y características metalúrgicas similares a los obtenidos mediante pulvimetalurgia pero sin etapas de compactación. Sin embargo, los sistemas Inkjet empleados en esta tecnología para la eyección de dichas suspensiones metálicas no han sido revelados.

De modo que, para poder ser capaces de eyectar dichas suspensiones metálicas sobre calentadas el equipo investigador de dicha tecnología han de haber utilizado cerámicas piezoeléctricas con una elevada temperatura de Curie cuyos límites térmicos de funcionamiento superan con creces los  $300^{\circ}\text{C}$  con el objetivo de presentar una degradación térmica suficientemente baja afín garantizar la fiabilidad del sistema a largo plazo, o emplear algún tipo de sistema Inkjet térmico evolucionado (TIJ).



**Figura 196:** Piezas de ejemplo reproducidas por el sistema de impresión XJET [242].

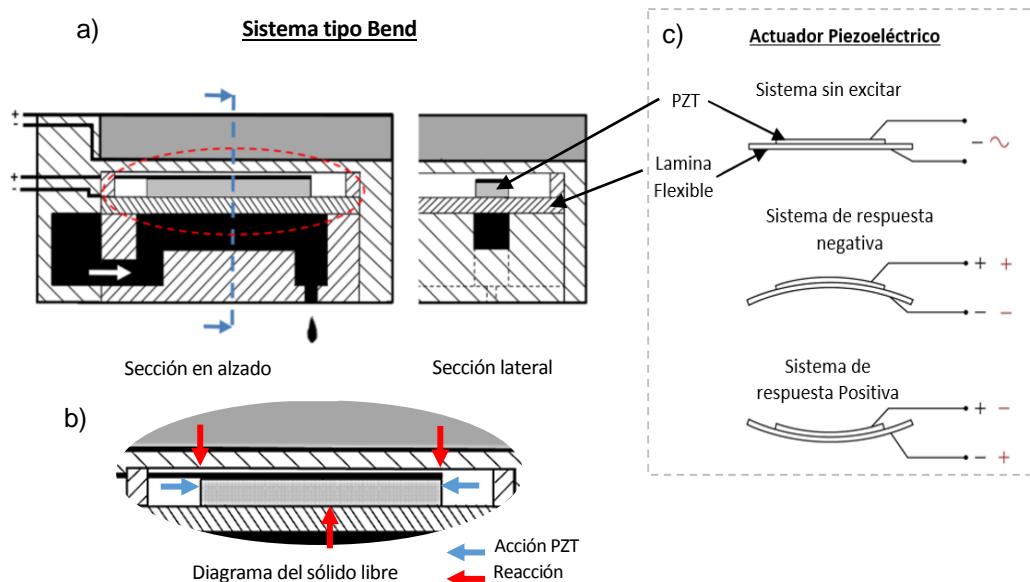
### 2.5.5. Modelización del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 como un sistema Electro-Mecánico-Hidráulico-Acústico

Como hemos podido apreciar, los sistemas de impresión PIJ se fundamentan en el efecto piezoeléctrico inverso de sus actuadores, los cuales deforman la cámara de bombeo tras una excitación eléctrica de frecuencia inferior a la de resonancia en serie de su piezoeléctrico y cuyas consecuencias han sido analizadas con anterioridad, siendo ésta excitación eléctrica culminada con la eyección de volúmenes discretos de tinta.

Para que dicho proceso se lleve a cabo, el sistema es ligeramente calentado y el actuador ubicado en la cara superior de la cámara de bombeo debe estar sustentado por una membrana flexible que lo aísla del fluido. La deformación de dicho sustrato genera la



contracción o la expansión del volumen contenido en dicha cámara, haciendo las labores de una bomba de desplazamiento positivo. En consecuencia, los piezoeléctricos enfrentan los esfuerzos inducidos por la deformación de dicha membrana y la oposición al desplazamiento del fluido en el interior del sistema. Por tanto, dichos esfuerzos condicionan la deformación y la eficiencia de los actuadores.



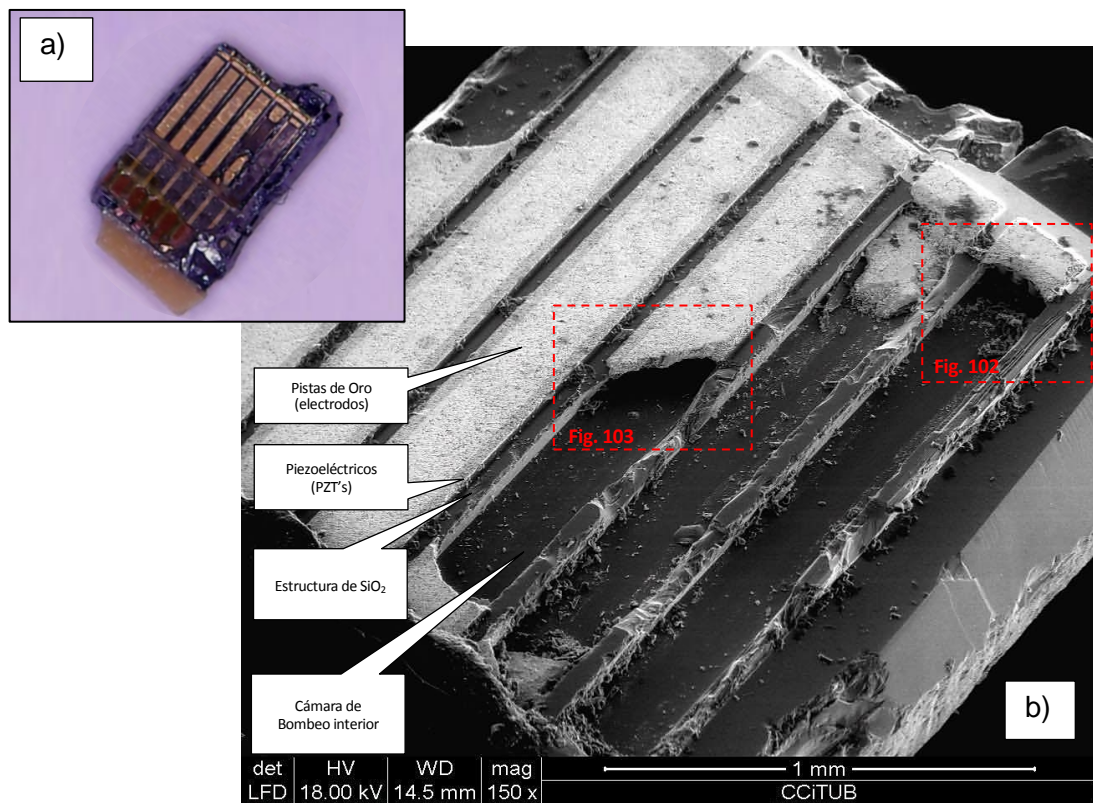
**Figura 197:** Representación esquemática del sistema DOD del tipo Bend empleado con su respectivo actuadores piezoeléctricos a) y diagrama del sólido libre del mismo b).

Interpretación de un sistema de respuesta positiva y negativa en función de la deformación del piezoeléctrico siendo estos excitados con una misma polarización y si se alterna la polarización bajo una corriente alterna (situación no contemplada) c)

[Fuente: Elaboración propia].

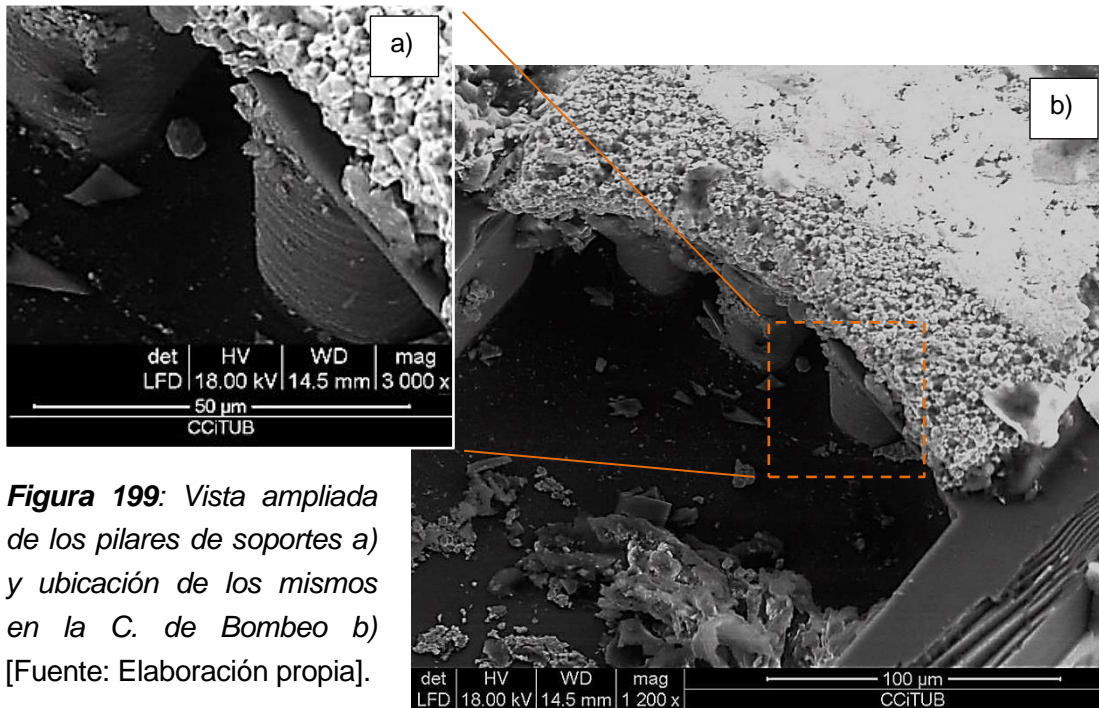
Como se puede apreciar a través de la imagen de la figura anterior, los sistemas de tipo Bend de respuesta positiva cuyos piezoeléctricos se encuentra ubicados y solidarios a la cara exterior de la membrana flexible de la cámara de bombeo, al recibir una señal eléctrica externa deforma a ésta, situación que interpretada como una viga compuesta biempotrada sometida a un axil y a un momento flector, generan la flexión de la misma. Sin embargo, desde un punto estático a dicha flexión se le opone la presión existente en el interior de la cámara de bombeo, y desde un punto de vista dinámico dicha presión a su vez varía en el tiempo siendo máxima al inicio del ciclo de eyección fruto de la incompresibilidad del fluido y de la oposición que éste experimenta por rozamiento pared-fluido a su desplazamiento. De modo que, la deformación de la cámara de bombeo en estos sistemas del tipo bend no se produce debido al alargamiento axial (sistemas Push) en sentido de la polarización del piezoeléctrico (eje Z, mostrado Figura 193b) sino debido a la flexión que el actuador induce a la membrana que lo sustenta.

Afín de corroborar la situación planteada en el esquema de la Figura 197, a continuación se muestra las imágenes tomadas a través de micorcopio SEM en bajo vacío del interior del conjunto sistema de bombeo de los cartucho analizados. En ellas se puede apreciar las dimensiones relativas de la cámara de bombeo, la ubicación de los piezoeléctricos sobre la lámina flexible y la ubicación de los electrodos de oro depositados sobre y debajo de éstos. Así como se puede apreciar las particulas cerámicas que constituyen a los actuadores piezoeléctricos. Por otro lado, también es posible observar los pilares que delimitan el final del canal de conexión y el inicio de la cámara de bombeo, cuya doble función es la aumentar la rigidez de la lámina flexible y la de: al reducir la sección de entrada a la cámara, forzar al fluido tras la contracción de la cámara de bombeo a ir aguas a bajo, es decir, en sentido del conducto de salida y no en sentido del canal de conexión.

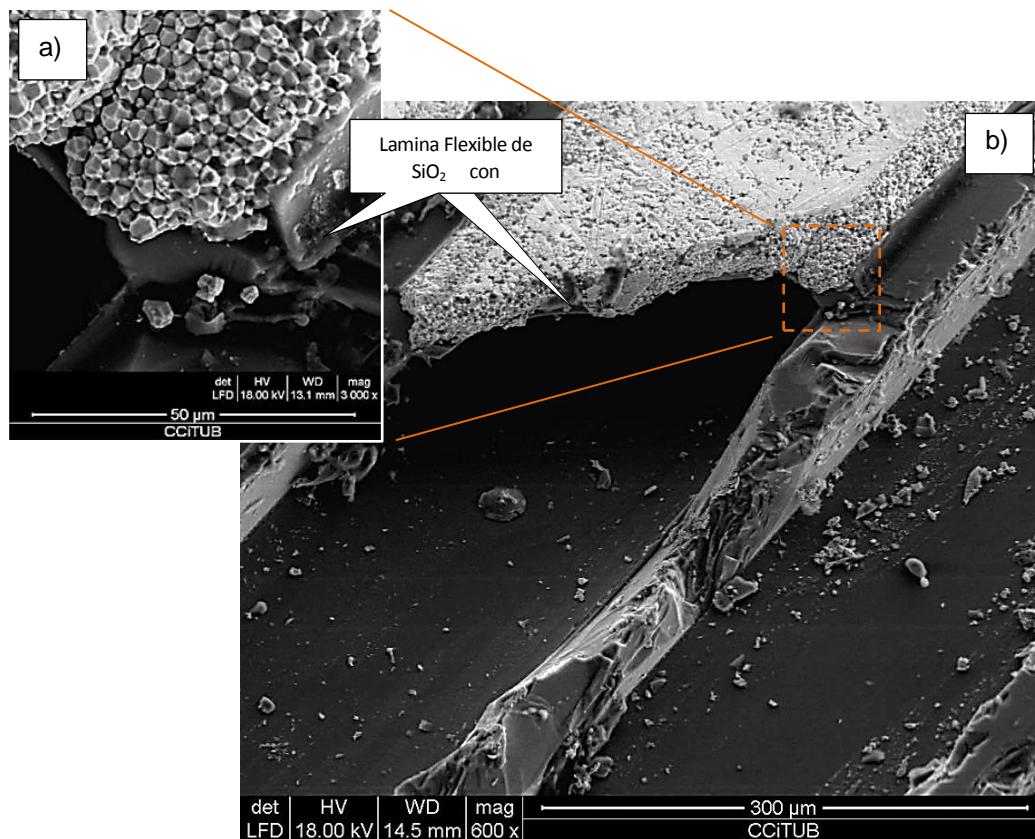


**Figura 198:** Imágenes de un fragmento del conjunto sistema de bombeo, fotografía a color de baja resolución e imagen ampliada al microscopio SEM, a y b respectivamente.

[Fuente: Elaboración propia].



**Figura 199:** Vista ampliada de los pilares de soportes a) y ubicación de los mismos en la C. de Bombeo b) [Fuente: Elaboración propia].



**Figura 200:** Vista en detalle de la cámara de bombeo a) y vista ampliada de las partículas cerámicas que constituyen a los actuadores piezoeléctricos del sistema Inkjet analizado b) [Fuente: Elaboración propia].

De modo que, como se ha podido observar en las imágenes anteriores el conjunto sistema de bombeo se encuentra fabricado mediante capas de distinto espesor cortadas y superpuestas de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) (ver Figura 199). Donde la unión entre las capas de silicio se lleva a cabo en un proceso de sinterizado de entre  $1050^\circ\text{C}$  a  $1100^\circ\text{C}$  [243], es por ello que en las imágenes transversales del conjunto sistema de bombeo (Figura 160 y Figura 161) no se aprecia separación alguna entre el cuerpo y la lámina flexible que sustenta a los PZT's.

Por otro lado, en la Figura 200 se puede apreciar en detalle la existencia de dicha lámina flexible o membrana de  $12,50\ \mu\text{m}$  de espesor, y sobre ésta se encuentra depositado mediante deposición catódica (sputtering) un segundo material, en éste caso conductor (oro), el cual hace las funciones de electrodo cuyo espesor puede alcanzar de 2 a  $0,5\ \mu\text{m}$  (pudiendo ser en otros cartuchos de cobre, tungsteno, titanio, platino o ITO (óxido de indio y estaño) debido a su alta conductividad y elevada adherencia a sustratos entre otras ventajas). Posteriormente, se encuentra el piezoeléctrico monomorfo del tipo soft (Navy Type VI), los cuales como puede verse en la patente US 7566118B2 son proporcionados por Sumitomo Piezoelectric Materials, que por otra parte dependiendo del modelo de cartucho éstas cerámicas pueden ser PZT-H5C o PZT-H5D. Donde las cerámicas PZT-H5C exhiben entre  $8\ \text{g/cm}^3$  de densidad y una constante de carga piezoeléctrica  $d_{31}$  entorno a los  $200\ \text{pm/V}$ , mientras que las cerámicas PZT-H5D exhiben una densidad aparente entorno a los  $8,15\ \text{g/cm}^3$  y una  $d_{31}$  mayor, entorno a los  $300\ \text{pm/V}$ , que como apreciarse son valores próximos a los ofrecidos por Morgan advanced materials considerados en la presente modelización a falta de encontrar los datos reales. En cuanto a su deposición éstas pueden realizarse con distintas técnicas como: serigrafía, doctor blading, green sheet, sol gel u otras, aunque con el objetivo de alcanzar propiedades elevadas éstas pueden ser moldeadas y sinterizadas a  $1200\text{-}1300^\circ\text{C}$  o moldeadas a presión isostática (HiPs) a entre  $1000\text{-}2000\ \text{atm}$  procesos que se llevan a cabo antes de ser unidas al sustrato flexible. Posteriormente y en algunos casos las cerámicas pasan por un proceso de rectificado afín de conferirles el espesor adecuado ( $20\ \mu\text{m}$  en nuestro caso) y tras el Poling (polarización de las cerámicas) éstas se unen al sustrato flexible y se elimina el material de sacrificio existente entre las cerámicas, finalmente se cierra el circuito mediante la deposición del material conductor utilizado anteriormente en el electrodo inferior.

El proceso de fabricación de estos sistemas de microbombeo puede observarse en detalle en la patentes US 7.566.118 B2, US 2007/0257580 A1 propiedad de Fujifilm Dimatix, Inc., [243] y [244] respectivamente.

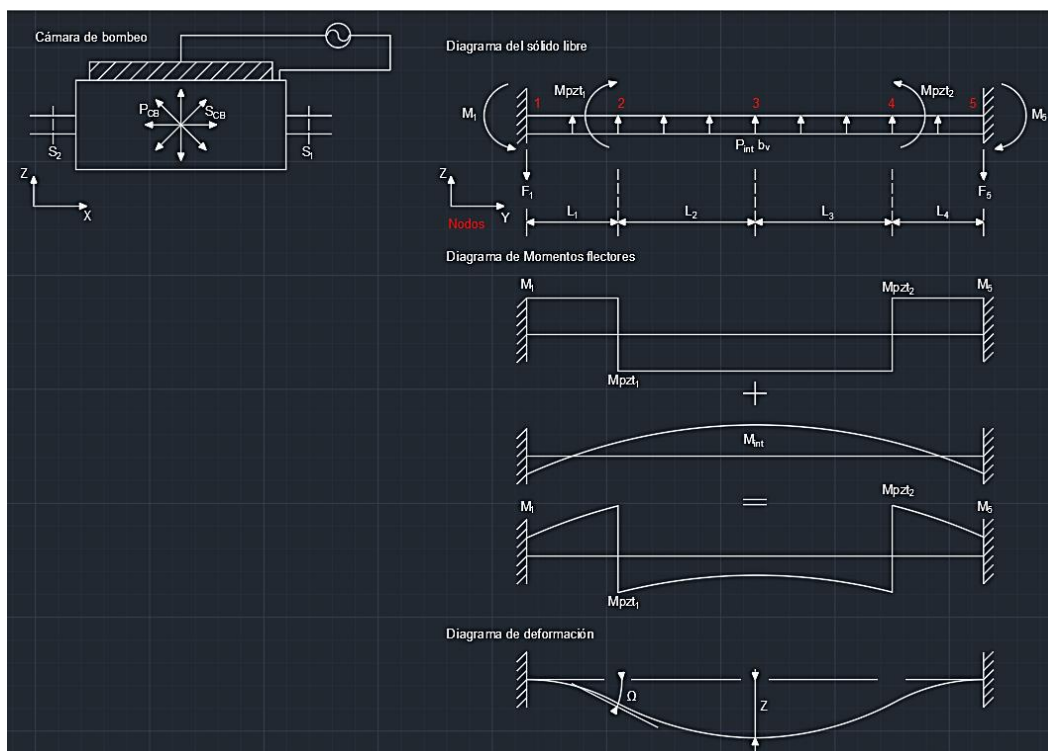
### **Análisis mecánico-eléctrico estático**

Siguiendo con la línea establecida, el análisis de la respuesta hidrodinámica de los cartuchos estudiados, ahora desde un punto de vista más amplio, es decir, como un sistema Electro-Mecánico-Hidráulico-Acústico-Térmico, aunque en nuestro caso hemos fijado la



temperatura como una constante, requiere ser abordados gradualmente de nuevo. Por otra parte y pese a que como dijo Gustave Flaubert: “*Dios está en los detalles*” a lo que Chesterton replicó después: “*que es el diablo quien los habita*”, nuevas simplificaciones se han vuelto llevar a cabo, haciéndolo más abordable.

Así pues, desde un punto de vista mecánico, hemos de recurrir a la resistencia de materiales en donde por ser la membrana considerada una viga biempotrada y por tanto, un elemento hiperestático necesitamos un mayor número de ecuaciones a pesar de las proporcionadas por la mecánica del sólido rígido para encontrar una solución a su comportamiento. De manera que, considerando a la membrana como una viga isótropa al igual que el piezoeléctrico que, a diferencia de la modelización anterior donde la deformación de la misma era producto de una presión exterior, ahora son los esfuerzos axiales que induce el actuador sobre ésta, los que produce la flexión de la viga, luego nos encontramos ante una caso de flexión compuesta (ver Figura 201), que por tener momentos puntuales debe ser abordado a través de los elementos finitos.



**Figura 201:** Representación esquemática de los diagramas del sólido libre, momentos flectores y deformación, de la membrana superior que cubre a la cámara de bombeo [Fuente: elaboración propia].

Haciendo uso de la ecuación de la elástica podemos decir que:

$$z(y, V(t)) = \begin{cases} \iint_{Tramo1} \frac{M_1(y, V(t))}{EI} dy & 0 < y \leq L_1 \\ \iint_{Tramo2} \frac{M_2(y, V(t))}{EI} dy & L_1 < y \leq L_1 + L_2 \\ \iint_{Tramo3} \frac{M_2(y, V(t))}{EI} dy & L_1 + L_2 < y \leq L_1 + L_2 + L_3 \\ \iint_{Tramo3} \frac{M_3(y, V(t))}{EI} dy & L_1 + L_2 + L_3 < y \leq L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \end{cases} \quad 3. 254$$

Donde  $z$  representa el desplazamiento vertical que experimenta la viga a lo largo del eje local  $y$  de cada uno de los cuatro subdominios, tramos u elementos existentes. Desplazamiento a su vez que, visto globalmente se producen debido al momento inducido por el piezoeléctrico consecuencia de una señal eléctrica. Cabe destacar por otro lado que  $E$  e  $I$  representan el módulo de Young y el momento de inercia de la viga compuesta interpretada como mono-material. Por tanto, obviando el detalle de que dicha señal eléctrica es variable en el tiempo  $V(t)$  luego sus consecuencias también lo son y por ende nos encontramos ante un problema solo resoluble a través de la dinámica estructural, el incremento instantáneo del volumen experimentado en la cámara de bombeo puede definirse como:

$$\Delta V_0(V(t)) = b_V \sum_i \int z^i(y, V(t)) dy \quad i = 1, \dots, 4 \quad 3. 255$$

Así desde un punto de vista estático, conocida la excitación eléctrica dependiente del tiempo podemos conocer el correspondiente incremento del volumen en el interior de la cámara de bombeo.

Los dos momentos puntuales de los nodos 2 y 4 (ver Figura 201) son consecuencia de la excitación del piezoeléctrico, su deformación (por efecto inverso: expresión 3. 242) es bloqueada por la viga generando esfuerzos axiales que hacen que ésta se deforme y considerando que ésta excitación, se realiza a una frecuencia muy inferior a la frecuencia propia de los piezoeléctricos en una primera modelización aproximada, es posible asumir que las tensiones internas producidas en el PZT pueden ser despreciadas y por tanto considerar el comportamiento electro-mecánico de la membrana como un sistema desacoplado al eliminar las matrices de acoplamiento en las expresiones 3. 241 y 3. 242 y de esta forma considerar que tanto la deformación ( $S$ ) como el desplazamiento de las cargas ( $D$ ) son función lineal del campo eléctrico existente entre los bornes del actuador, es decir centrándonos en la deformación libre del piezoeléctrico:

$$[S] = [d]^T \cdot [E] \rightarrow S_{22} = d_{23} \left( \frac{V}{t_c} \right) \Big|_3 \quad 3. 256$$

Siendo  $t_c$  el espesor del piezoeléctrico y por ser considerado transversalmente isótropo  $S_{11} = S_{22} \neq S_{33}$ . De forma que, imponiendo la condición de elasticidad donde:  $F_{22} - F_{bloq} = 0$ , siendo  $F_{22}$  la fuerza máxima producida por el piezoeléctrico es su efecto inverso si este estuviese libre, y atendiendo a ley de Hooke generalizada podemos decir que:

$$F_{22} = F_{Bloq} \rightarrow (bE_c d_{23})V = -(t_c b)E_c S_c \quad 3. 257$$

De manera que, siendo la fuerza bloqueada la que se opone al desplazamiento del piezoeléctrico  $\forall t$  y para que éste trabaje dentro del régimen elástico, es decir, que pueda volver a su estado inicial al eliminar la excitación, dicha fuerza debe ser asociada a su módulo de Young que en este caso, debido al carácter no lineal de los piezoeléctricos  $E_c$  representa el módulo de Young en corto circuito del mismo, lo que a su vez nos lleva a establecer la siguiente condición para que exista deformación en la viga, es decir:

$$F_{22} = F_{Bloq} ; F_{Bloq} \geq F_c \rightarrow \exists S_c$$

Siendo  $F_c$  la fuerza resistente que el conjunto viga opone a su deformación  $S_c$ , y siendo ésta el desplazamiento axial variable en función del eje vertical (del plano xz) que experimenta la viga. Así, podemos establecer que, para que la deformación axial real experimentada por la viga tenga lugar, la fuerza generada por el piezoeléctrico ( $F_{22}$ ) de ser igual o superior a la fuerza de bloqueo  $F_c$  (si es igual equivale a un equilibrio inestable), es decir:

$$S_c < S_{Max} ; S_c = \frac{\Delta L_c}{L_c} = S_{Max} - S_{Bloq}$$

de manera que, bajo la condición de equilibrio inestable:

$$S_c = \left( d_{23} \left( \frac{V}{t_c} \right) \right) \left[ 1 - \left( \frac{F_c}{F_{Bloq}} \right) \right] \quad 3. 258$$

Siendo la fuerza transmitida real a la viga por el piezoeléctrico definida como  $F_c$  y por tanto, el causante de su flexión compuesta expresable como:

$$F_c = (t_v b)E_v S_c \quad 3. 259$$

donde  $t_v$ ,  $E_v$  son la altura de la viga y su módulo de Young. Por otra parte, haciendo uso de las dos expresiones anteriores se puede establecer una expresión que relaciona la deformación esperada de la viga en función de la deformación máxima del piezoeléctrico, afirmándose que la deformación inducida por éste depende tanto de sí mismo como del elemento al que se encuentra unido, es decir:

$$S_c = S_{Max} \left[ \frac{1}{1 + \left( \frac{t_v E_v}{t_c E_c} \right)} \right]$$

Así pues, para un mismo espesor  $t_c = t_V$  mientras mayor sea el módulo de Young del sustrato respecto al del piezoeléctrico para una misma excitación eléctrica, menor será su flexión y en un sistema de respuesta positivo, menor será la contracción de la cámara de bombeo. Del mismo modo, ante un sistema con módulos de Young iguales  $E_c = E_V$  mientras mayor sea el espesor de la membrana (viga en este caso) menor será la deformación y por ende el incremento del volumen en el interior de la cámara de bombeo.

De manera que, volviendo a la expresión 3. 254 y teniendo en cuenta la interpretación de la viga compuesta realizada en la modelización previa, es decir, como una viga mono-material isótropa biempotrada, con una nueva sección transversal adaptada para que ofrezca las mismas propiedades mecánico-resistentes (modelo de Euler-Bernoulli [239]), podemos establecer que el momento flector inducido por el piezoeléctrico en los nodos 2 y 4 en función del voltaje aplicado variable en el tiempo ( $M_{pzt}(V(t))$ ) pueden definirse de una forma simple como:

$$M_{pzt}(V(t)) = (bE_c d_{23}) \left[ t_V + \frac{t_c}{2} - Z_T \right] V \quad 3. 260$$

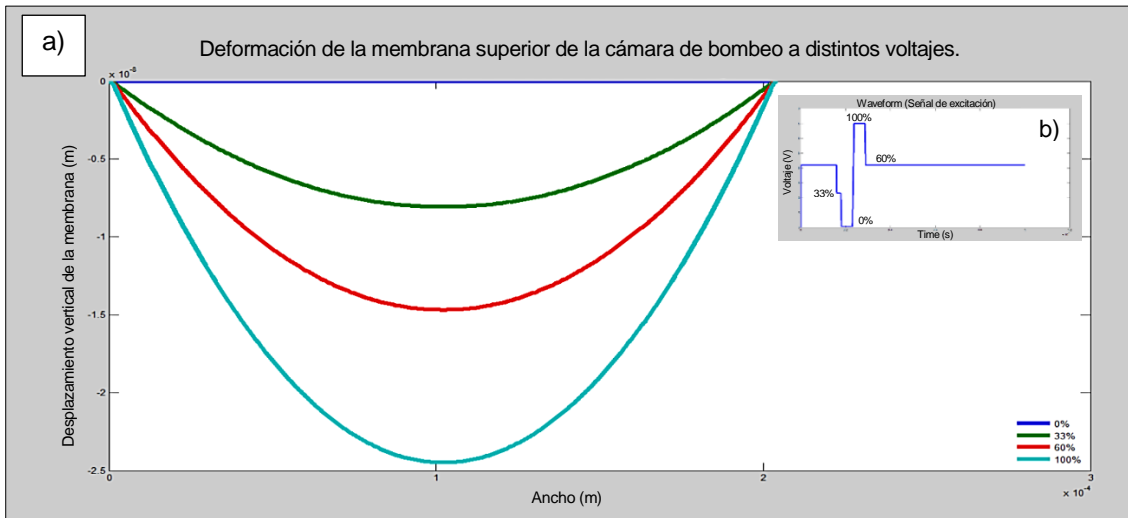
Así, volviendo a la modelización del sistema Inkjet, conocida la forma en la que se excita eléctricamente al piezoeléctrico es posible conocer las consecuencias que éste genera en la cámara de bombeo, es decir, recurriendo al uso de la matriz de forma constituida por los polinomios interpoladores cúbicos de Hermite, podemos encontrar las matrices elementales de rigidez  $[K^e]$  donde  $e=1, \dots, 4$  y tras su ensamblaje conocer la matriz de rigidez global con la cual calcular los desplazamientos nodales y las reacciones en los empotramientos. Y del mismo modo, los diagramas de momentos flectores y su deformada.

Finalmente, el incremento del volumen en el interior de la cámara de bombeo puede calcularse de una forma estática gracias a la expresión siguiente:

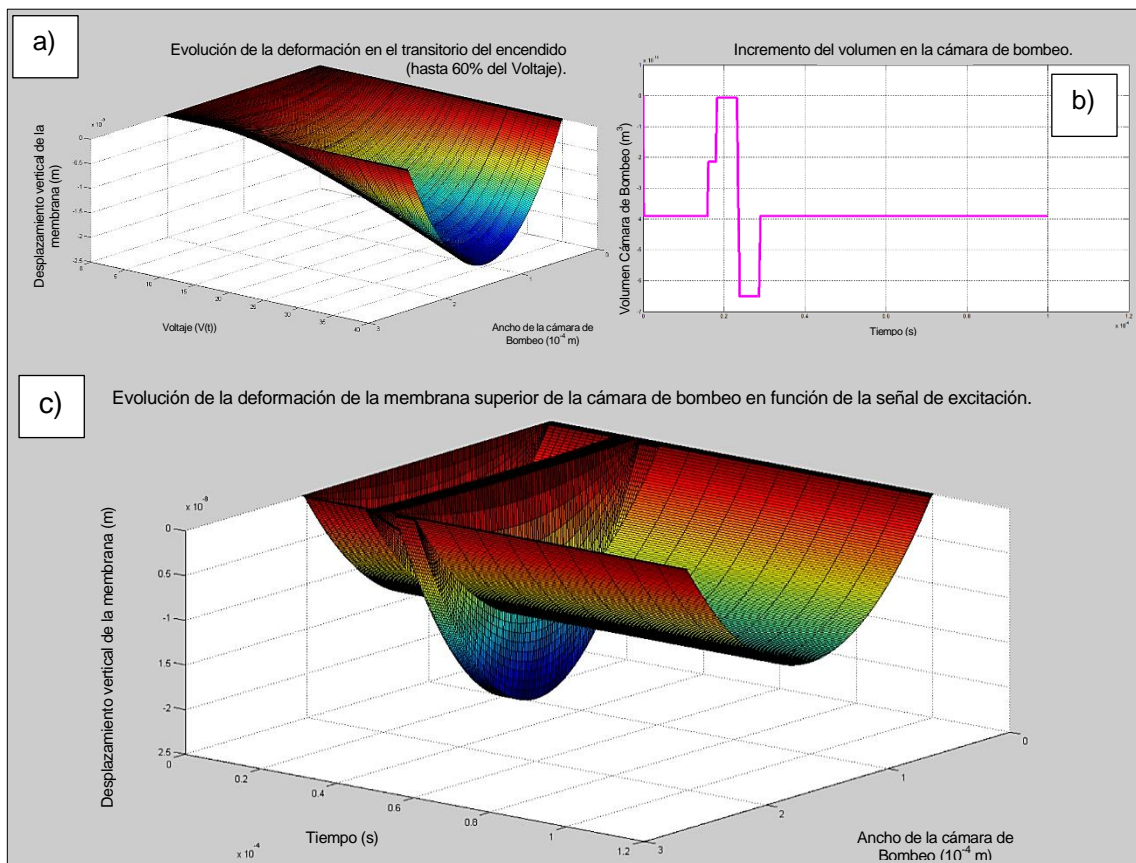
$$\Delta V_0(V) = b_V \sum_i^4 \int z^i(y, V) dy \quad i = 1, \dots, 4 \quad 3. 261$$

Donde  $b_V$  representa el largo de la cámara de bombeo y  $z^1, z^2, z^3, z^4$ , hace referencia a la función que define la deformación de la viga en sus cuatros intervalos, elementos o subdominios.





**Figura 202:** Deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo desde un punto de vista estático en función del voltaje, vista perpendicular al plano zy o en dirección a las conducciones de admisión y expulsión (a) y resaltado en la esquina superior derecha, la señal de excitación eléctrica con sus 4 niveles (b) [Fuente: elaboración propia].



**Figura 203:** Evolución temporal de la deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo desde un punto de vista estático en función del voltaje aplicado y de la anchura de la cámara (a), evolución del volumen en el interior de la cámara de bombeo en función de

*la duración total de la eyección (b) y deformación la membrana en función del voltaje aplicado desde el encendido hasta la estabilización después de la eyección (c) [Fuente: elaboración propia].*

### **Análisis mecánico-eléctrico dinámico**

Debido a que la excitación de los actuadores se produce de una forma particular en función de los parámetros de impresión y la reología de la tinta, lo que hace que la magnitud del voltaje varíe en el tiempo y, siguiendo con la línea de pensamientos establecida, la evolución de la membrana y por ende de la cámara de bombeo requiere ser abordada dinámicamente bajo una interpretación Lagrangiana de la misma. De manera que, recurriendo distintas fuentes bibliográficas en donde especifica que mediante la aplicación del principio de los trabajos virtuales (el trabajo producido por las fuerzas exteriores se ve compensados con la energía interna de deformación) y haciendo uso del principio de Hamilton (donde la integral de las energías conservativas en el tiempo ha de ser mínimo), es posible se alcanza una expresión que defina el comportamiento nodal de la viga de una forma dinámica, es decir:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = \{F(t)\} \quad 3. 262$$

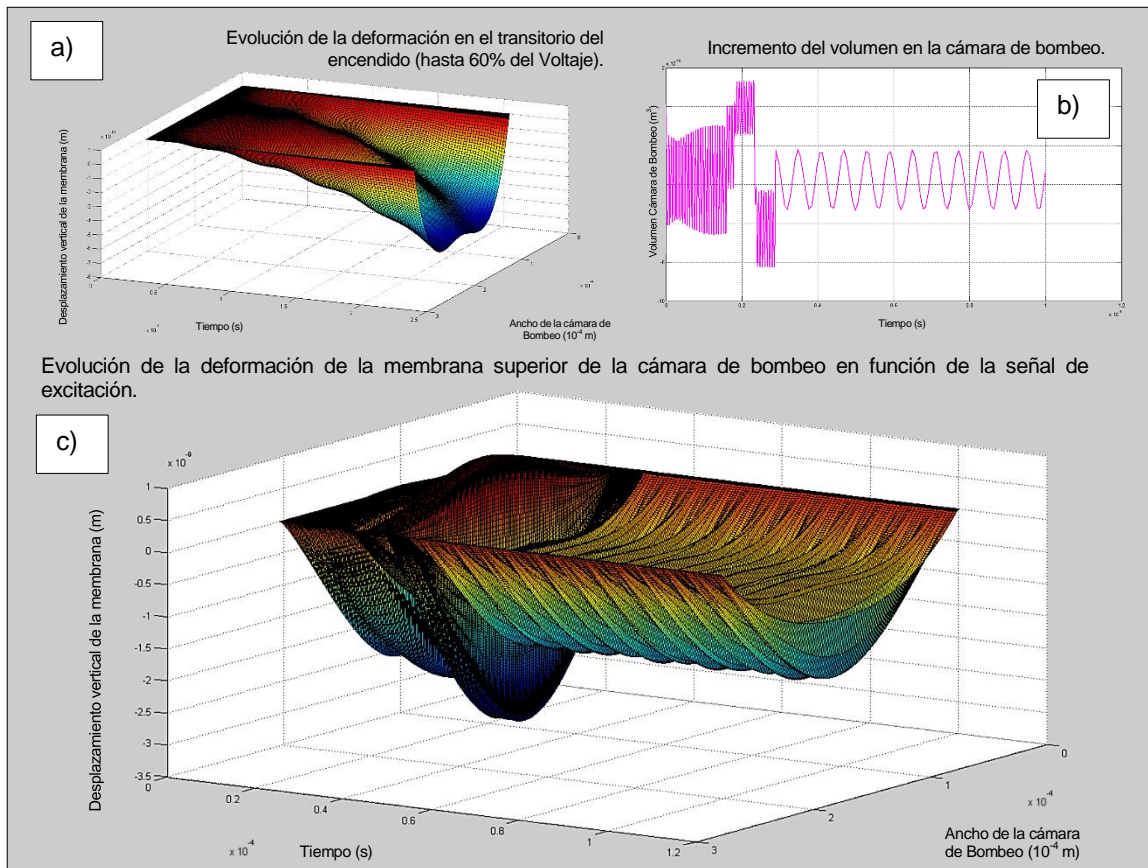
Donde  $M$  representa la matriz global de masa,  $K$  representa la matriz global de rigidez de la membrana (interpretada como viga) y donde  $q$  representa el vector de grados de libertad nodal (viga bidimensional, con 2 grados de libertad por nodo (desplazamiento vertical y giro)) y por otro lado, el vector  $F(t)$  representa las fuerzas exteriores y los momentos inducidos por el piezoeléctrico. El amortiguamiento, sin embargo, ausente en la expresión anterior, puede ser hallada mediante la matriz de amortiguamiento de Rayleigh cuyos coeficientes de proporcionalidad ( $\alpha, \beta$ ) a menudo desconocidos, deben ser obtenidos por experimentación.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad 3. 263$$

De manera que, bajo esta primera modelización simplificada del comportamiento mecánico-eléctrico de la membrana desde un punto de vista dinámico arroja un sistema decimensional de segundo orden no homogéneo sin término resistivo, que haciendo uso de la expresión anterior y tomando los valores  $\alpha, \beta = 0.001, 0.0001$  respectivamente de [245] dicho termino puede ser introducido obteniéndose una expresión del tipo  $[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F(t)\}$  con la cual calcular las resultantes en los empotramientos y evolución del volumen en el interior de la cámara de bombeo en función de una excitación variable, como consecuencia de la deformación de la membrana que recubre a ésta.

Cabe destacar sin embargo que, el empleo del término resistivo (tomado del cálculo de la dinámica estructural) convierte al sistema de ecuaciones del modelo en Stiff, lo cual complica enormemente la resolución del sistema diferencial no admitiendo los algoritmos de solución numéricos como el ODE45, ODE23, ODE15S. Por otra parte, distintas pruebas se han realizado tratando de resolver el sistema de forma analítica, sin embargo el elevadísimo

tiempo de cálculo y, debido a la diminutas dimensiones del cabezal junto con otras variables de orden magnitud mucho más elevadas inducen errores en los resultados obtenidos llegando a ser hasta del 30% bajo esta interpretación mediante el empleo del Matlab. De forma que, el problema debería ser replanteado considerando uno coeficientes de Rayleigh distintos con los cuales considerar que la atenuación del sistema no solo es únicamente consecuencia del rozamiento pared-fluido de las tintas en el interior del mismo.



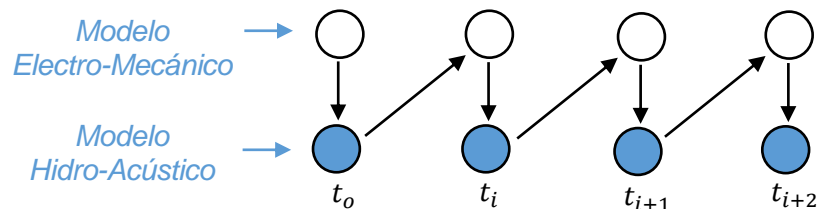
**Figura 204:** Evolución temporal de la deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo visto desde un punto de vista dinámico sin amortiguación mecánico-resistente en función del voltaje aplicado durante el transitorio del encendido ( $0 \leq t < t_{p0}$ ) (a), evolución del volumen en el interior de la cámara de bombeo en función de la duración total de la eyección (b) y deformación la membrana en función del tiempo desde el encendido hasta la estabilización después de la eyección (c) [Fuente: elaboración propia].

Tras alcanzar el 60% del voltaje en la excitación de los actuadores (rampa inicial) la señal se mantiene; período al que hemos definido como transitorio del encendido, y por lo tanto la deformación de la membrana debería permanecer en una posición constante tras amortiguar por completo su oscilación, punto en el cual el sistema Inkjet se encuentra listo para dar inicio a la eyección. Como puede apreciarse en la figura anterior, en la modelización dinámica electromecánica de la membrana superior de la cámara de bombeo

al no tener en cuenta el termino disipativo que produce la amortiguación mecánico-resistente de la misma, ésta se mantiene oscilando indefinidamente, situación que no corresponde con la realidad, distorsionando la respuesta hidrodinámica del sistema, la cual al no haber incluido la hidroacústica en la modelización no se tiene en cuenta su efecto en el flujo de tinta ni como ésta atenúa dicha oscilación.

De modo que, obviando el detalle de la atenuación mecánico-resistente de la membrana por ser el modelo Stiff y asumiendo que únicamente, es el rozamiento pared-fluido el causante de la atenuación de las oscilaciones de la misma tras su excitación eléctrica y considerando a ésta, como una viga biempotrada constituida por 4 elementos cuyos 5 nodos poseen 2 grados de libertad mecánicos y cuya deformación está a su vez, supeditada a la presión que existen en el interior de la cámara de bombeo (debajo de la misma), la cual es función de su desplazamiento y la compresibilidad del fluido contenido en ésta. Nos obliga a unir desacopladamente un segundo sistema dinámico y a través del cual, definir las condiciones en el interior de la cámara de bombeo. Es en este punto donde la modelización hidroacústica del sistema entra en juego.

En el 2004 Seitz, H. y Heinz, J. [246], expusieron una modelización de la respuesta hidrodinámica de un sistema Inkjet mediante el planteamiento del mismo en 2 etapas concatenadas es decir, a través de un primer modelo Electro-mecánico acoplado cuyas consecuencias son recogidas en un segundo modelo Hidro-acústico acoplado, siendo este último el que definirá las condiciones de contorno del primer modelo para el siguiente instante temporal (ver Figura 205).

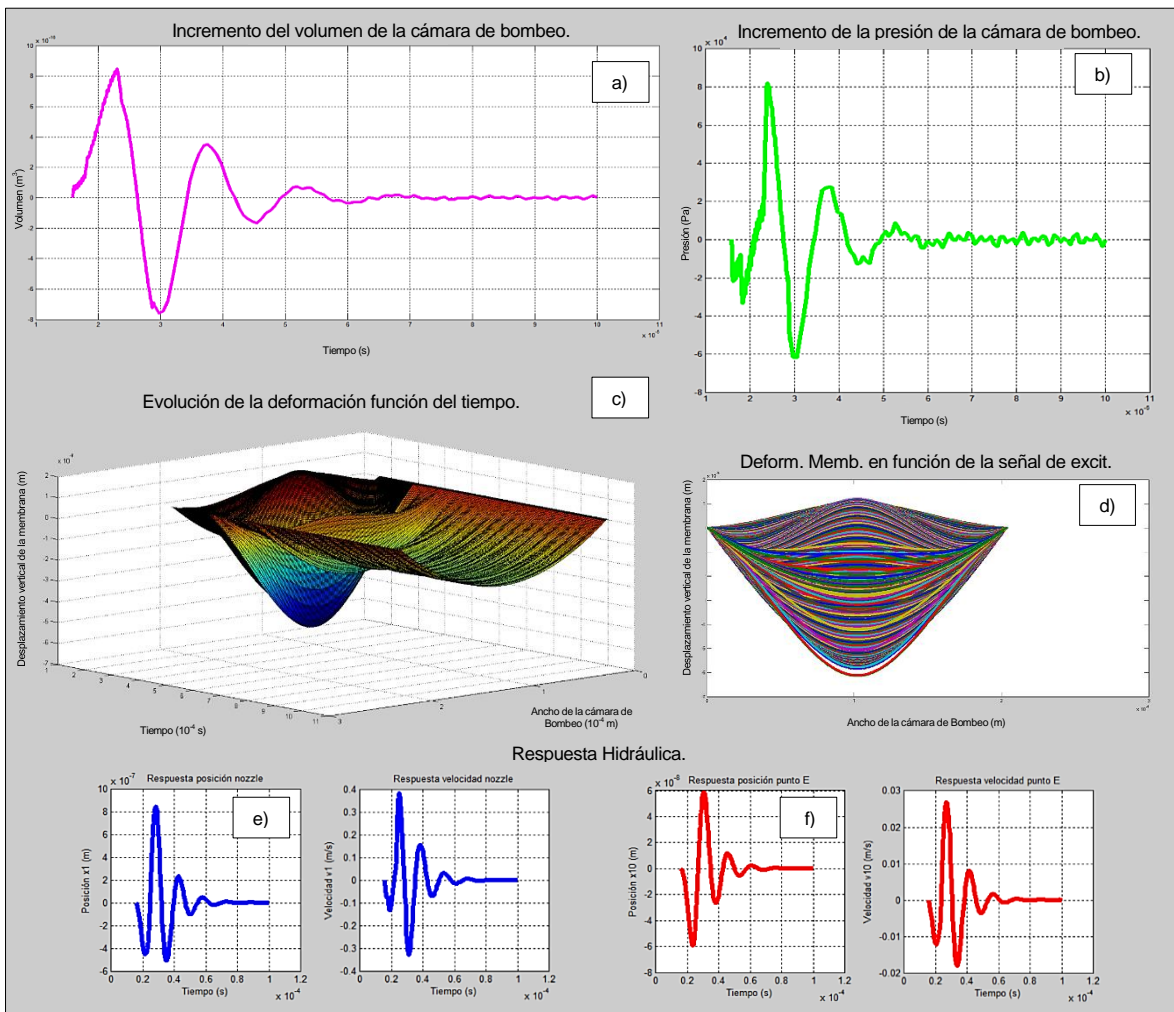


**Figura 205:** Representación esquemática del modelo de 2 etapas empleado en el análisis de la respuesta hidrodinámica del cartucho Inkjet empleado [Fuente: elaboración propia].

Así pues, siguiendo las aportaciones Seitz, H. y Heinz, J. la modelización 1D lumped por elementos finitos de los cartuchos Inkjet empleados en el equipo Nhibrid se vio modificada, introduciendo ahora la Hidráulica y la acústica en el mismo. Cabe destacar sin embargo, que en esta nueva modelización se analizan las consecuencias generadas en el sistema desde un punto de vista totalmente mecánico debido a una excitación eléctrica dejando al margen o mejor dicho, calculando desacopladamente las consecuencias de dicha excitación desde un punto de vista eléctrico.

Por otra parte, como se puede apreciar en la figura de a continuación un modelo lumped E-M-H-A (Electro-mecánico-hidráulico-acústico) mono-nozzle de estas características reporta

mucha más información que los modelos precedentes, de hecho, información que desde el punto de vista del acto de impresión en sí, carece de sentido debido a su extensión y profundidad siendo más propicia para el diseño y desarrollo de los mismos. A través de este modelo es posible conocer la presión, posición y velocidad del fluido en cada una de las conducciones que constituyen las cámaras de bombeo activas, así como también el comportamiento mecánico de las mismas tras su excitación (esfuerzos, deformación y variación del volumen del recinto que bajo la membrana existe), finalmente también reporta información acerca de la evolución de la intensidad eléctrica tras la descarga de los actuadores.

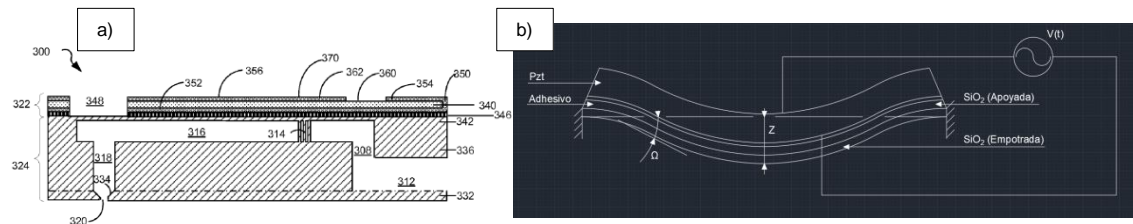


**Figura 206:** Resultados arrojados por el modelo E-M-H-A implementados en el Matlab. Desde un punto de vista mecánico: Incremento del volumen en la cámara de bombeo (a), incremento de la presión producto de la señal eléctrica de excitación sin el transitorio del encendido (b), evolución de la deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo en función del tiempo (c) y perfil de la misma en el plano yz para todo el intervalo temporal analizado (d). Desde un punto de vista Hidráulico: Respuesta hidrodinámica del cartucho analizado: posición y velocidad de la tinta de plata respecto al nozzle (e) y respecto al nodo 10 del tramo E (f) [Fuente: Elaboración propia].



Como se ha podido apreciar, a través del modelo E-M-H-A es posible simular el comportamiento de un nozzle del cartucho analizado. Cargado de un fluido con una características reológicas particulares y en función de una señal de excitación particularizada a los parámetros de impresión. Dichos parámetros de impresión desde el punto de vista del equipo reproductor principalmente se centra en: posición y velocidad del fluido respecto al nozzle, y a través de ellos volumen y velocidad de eyección de las chorros libres (gotas) y frecuencia de eyección, ya que a través de ésta establecemos el drop spacing.

Sin embargo, en la modelización anterior los resultados aunque coherente muestra una deformación de la membrana insuficiente y cuyas consecuencias (incremento del volumen de la cámara de bombeo) no generan las condiciones de impresión deseadas y medidas en la práctica (Desplazamiento y velocidad del fluido (Figura 206.e,f). Es por ello que, tras la revisión del modelo reiteradamente y ante la imposibilidad de aumentar el efecto piezoeléctrico inverso se tuvo que recurrir a las patentes nuevamente de Dimatix, afín analizar el funcionamiento del mismo y sus detalles, en busca de magnificar el momento flector sin variar los actuadores. Fue en este aspecto donde se pudo comprobar la sutileza de la unión sistema de bombeo (324, Figura 207) y actuador (322, Figura 207) mostrada en las imágenes de a continuación.

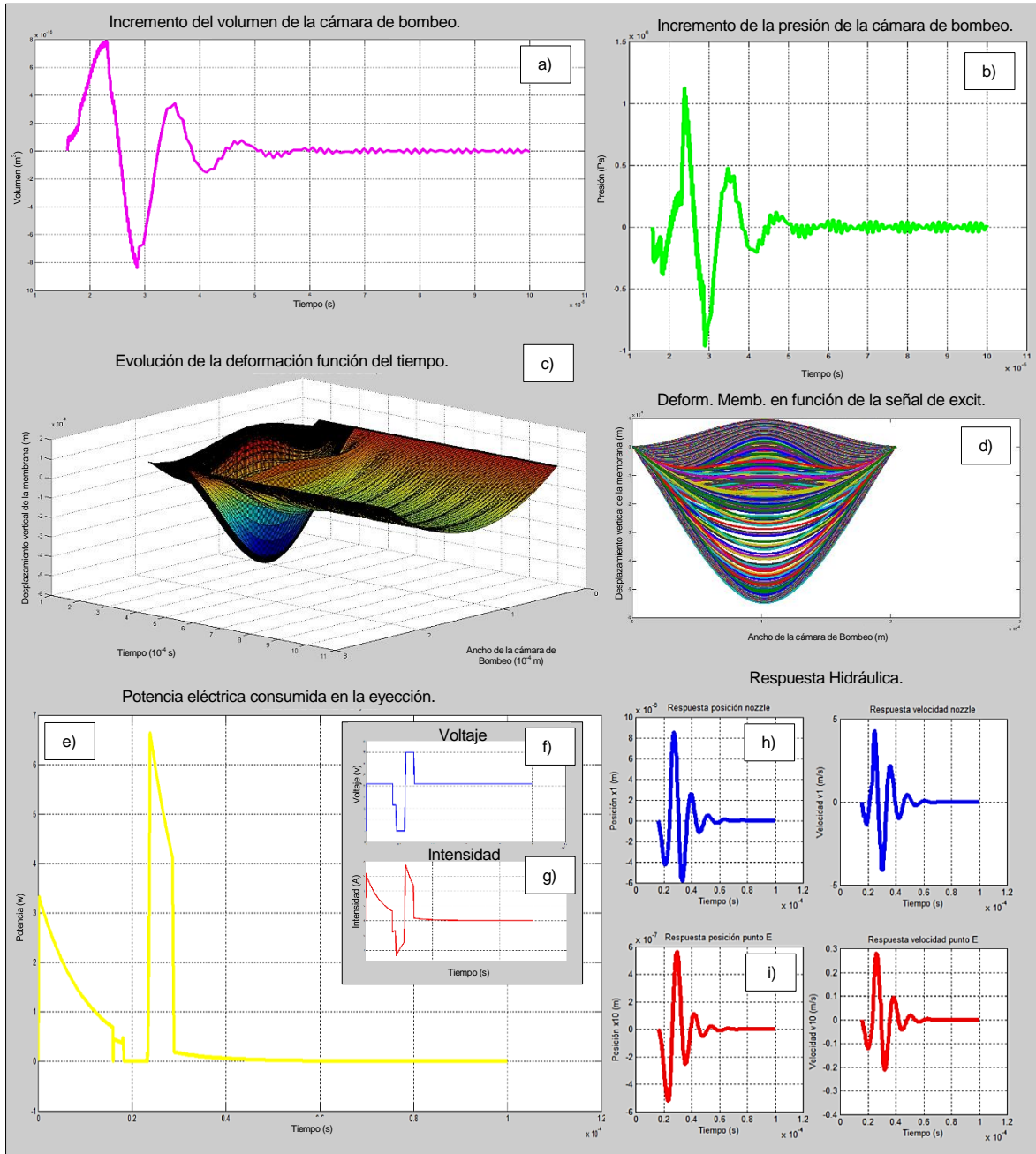


**Figura 207:** Vista lateral del sistema conjunto sistema de bombeo tomada de la patente US20070255780A1 propiedad de FUJIFILM Dimatix, Inc., a) y vista frontal de la deformación de la membrana bajo la interpretación actual b) [Fuente: Elaboración propia].

Como puede apreciarse la membrana de  $\text{SiO}_2$  posee una parte de su espesor empotrada y otra que no, superpuesta a ésta se encuentra una capa de adhesivo (346) y posteriormente se encuentra el piezoeléctrico con sus correspondientes electrodos encima debajo de éste (370). Si bien esta configuración de membrana tiene un peor comportamiento a fatiga debido a los concentradores de tensión de sus extremos, ofrece la capacidad de magnificar varios órdenes de magnitud la deformación de la misma tras alejar el actuador de la fibra neutra aumentando el par, así como también disminuyendo la rigidez del conjunto. En la Figura 200 se puede apreciar el sutil detalle expuesto.

Así pues, teniendo en cuenta esta nueva interpretación y tras magnificar los momentos puntuales inducidos por los piezoeléctricos, y tras modificar los coeficientes de Rayleigh dando protagonismo a la masa debido a la elevada frecuencia de excitación y por tanto a  $\alpha$ , y despreciando la influencia de la rigidez a consecuencia de su minúscula deformación,

pudiéndose resolverse el sistema de forma numérica teniendo en cuenta la amortiguación mecánica del conjunto membrana-piezoeléctrico, a continuación se exponen los resultados del mismo:

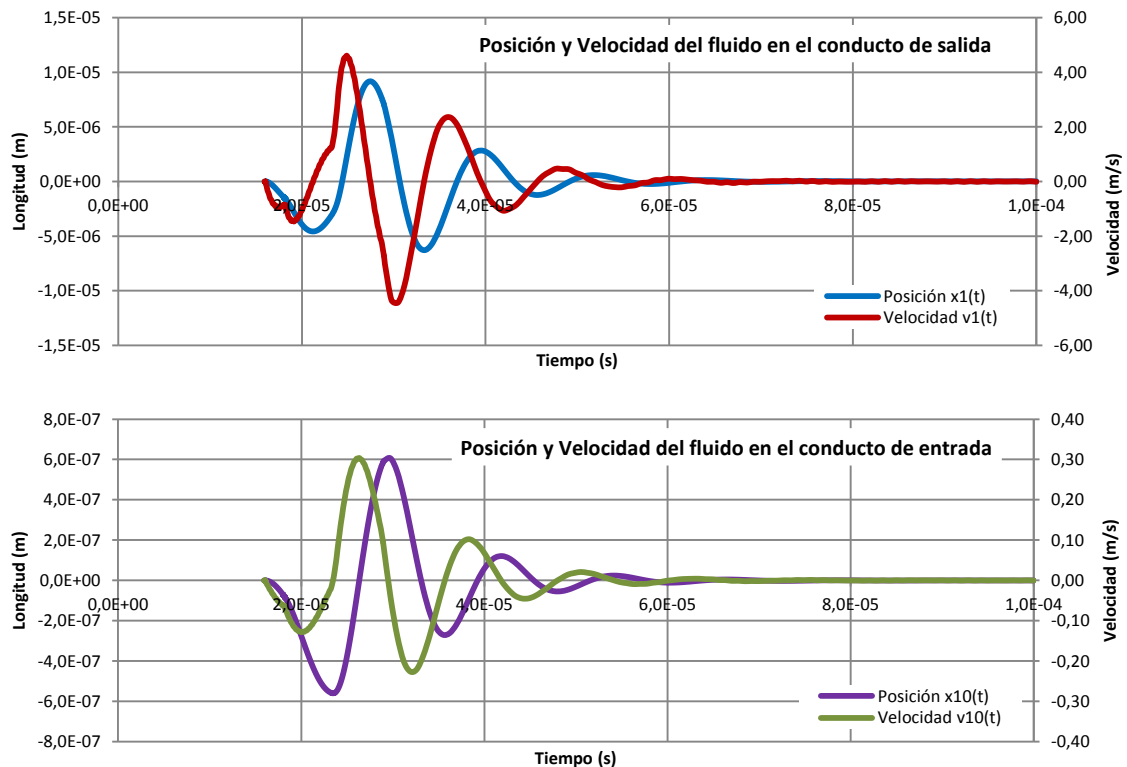


**Figura 208:** Resultados arrojados por el modelo E-M-H-A implementados en el Matlab bajo las nuevas consideraciones. Desde un punto de vista mecánico: Incremento del volumen en la cámara de bombeo (a), incremento de la presión producto de la señal eléctrica de excitación sin el transitorio del encendido (b), evolución de la deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo en función del tiempo (c) y perfil de la misma en el plano yz para todo el intervalo temporal analizado (d). Desde un punto de vista eléctrico: Potencia

*eléctrica instantánea consumida durante la eyección de una gota (e) voltaje aplicado (Waveform) (f) e intensidad producida a consecuencia de la descarga de los actuadores (g).*

*Desde un punto de vista Hidráulico: Respuesta hidrodinámica del cartucho analizado: posición y velocidad de la tinta de plata respecto al nozzle (h) y respecto al nodo 10 del tramo E (i) [Fuente: Elaboración propia].*

Ampliación de gráficas h e i de la figura anterior (Respuesta Hidrodinámica):



**Figura 209:** Respuesta hidrodinámica del cartucho analizado interpretado como mono-nozzle visto como un sistema electro-mecánico-hidro-acústico: posición y velocidad del fluido en el tramo N respecto al nozzle (a) y en el tramo E respecto al nodo 10 (b) [Fuente: Elaboración propia].

De modo que, ahora los resultados arrojados por el modelo muestran una mayor coherencia con los resultados obtenidos en los modelos precedentes, aunque en este caso son más próximos a los obtenidos en la práctica. Sin embargo cabe destacar que, desde una interpretación eléctrica, en el transitorio del encendido, el tiempo empleado en la simulación es insuficiente para la descarga completa del piezoeléctrico como puede apreciarse en la Figura 206 e, f, g, distorsionando la intensidad al comienzo de la señal de eyección y en consecuencia la potencia consumida durante la misma, es por ello que si bien desde el punto de vista hidráulico los efectos del transitorio del encendido no ha sido tenidos en cuenta, en futuras simulaciones el tiempo transcurrido hasta estar operativo el sistema debería aumentarse.



Por otra parte, a través de la cámara estroboscópica de la impresora Fujifilm Dimatix DMP-2800 se pudo comprobar que la velocidad de eyección de las gotas con la waveform utilizada (señal de excitación) es de 4,4 m/s y como se puede apreciar el modelo analítico muestra una velocidad máxima próxima y superior a ésta, lo cual como ya se ha comentado, es coherente puesto que durante la ruptura de los chorros libres en volúmenes discretos de tinta, éstos sufren una cierta desaceleración debido a la viscosidad de la tinta. Sin embargo, hasta ahora se ha modelizado el cartucho como un sistema mono-cámara mono-nozzle lo cual como se ha podido observar en las figuras precedentes debe evolucionar hacia un enfoque multi-nozzle. En los siguientes apartados se tiene en cuenta dicha reinterpretación.

### Análisis Electro-mecánico estático

Por otra parte, y desde un punto de vista eléctrico, la simplificación planteada en esta modelización desacoplada en donde despreciamos los esfuerzos internos del piezoeléctrico debido a la suposición en donde la excitación eléctrica de los mismos se lleva a cabo muy por debajo de su frecuencia natural, hace que éstos ofrezcan un comportamiento absolutamente capacitivo. Así pues, haciendo uso de la expresión 3. 245 de una forma simple podemos decir que:

$$[D] = [\varepsilon]^T \cdot [E] \rightarrow D_3 = \varepsilon_3 \left( \frac{V}{t_c} \right) \Big|_3 \quad 3. 264$$

Donde  $D_3$  representa el flujo de carga desplazada y por tanto siendo intensidad la derivada temporal de la evolución de la carga ésta puede conceptualmente en un sistema sin pérdidas internas ser definible como:

$$C = \left[ (L_c b_c) \frac{\varepsilon_3}{t_c} \right] ; q(t) = -C^* e^{-\frac{1}{RC}t} + VC \rightarrow I(t) = \frac{d}{dt} q(t) \quad 3. 265$$

Donde  $R$  puede considerarse como la resistencia que ofrecen los electrodos del actuador siendo  $V$  la magnitud de la tensión de la señal de excitación y  $C^*$  una constante dependiente de las condiciones iniciales o de contorno (ver Figura 210). Recurriendo a los elementos finitos, la expresión anterior puede reescribirse como:

$$\{q\} = [K_{ee}]\{V\}$$

Donde  $q$  representa el vector flujo de carga desplazada,  $K_{ee}$  la matriz general dieléctrica del actuador y  $V$  el vector del voltaje aplicado en la señal de excitación. Así la excitación del PZT consecuencia de una variación temporal del campo eléctrico existente en sus bornes, produce un desplazamiento de las cargas que deforma físicamente al mismo, generando el incremento de volumen en la cámara de bombeo desplazando al fluido aguas a fuera de ésta. La capacidad de los actuadores  $C$  es una propiedad de los mismos constate, en principio en esta modelización. Las cargas desplazadas durante la excitación generan una intensidad  $I(t)$  la cual corresponde al proceso de carga y descarga de dichos actuadores. De manera que, la potencia eléctrica instantánea requerida por estos sistemas durante el

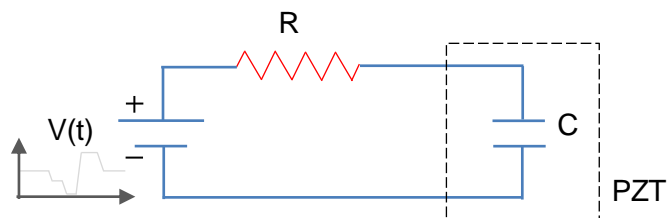
proceso de eyección en función de la reología de la tinta y los parámetros de impresión deseados puede definirse como:

$$P_{eyec.i} = I_i(t) \cdot V_i(t) \quad 3.266$$

Del mismo modo, la energía eléctrica consumida por gota eyectada por el nozzle  $i$  puede definirse como:

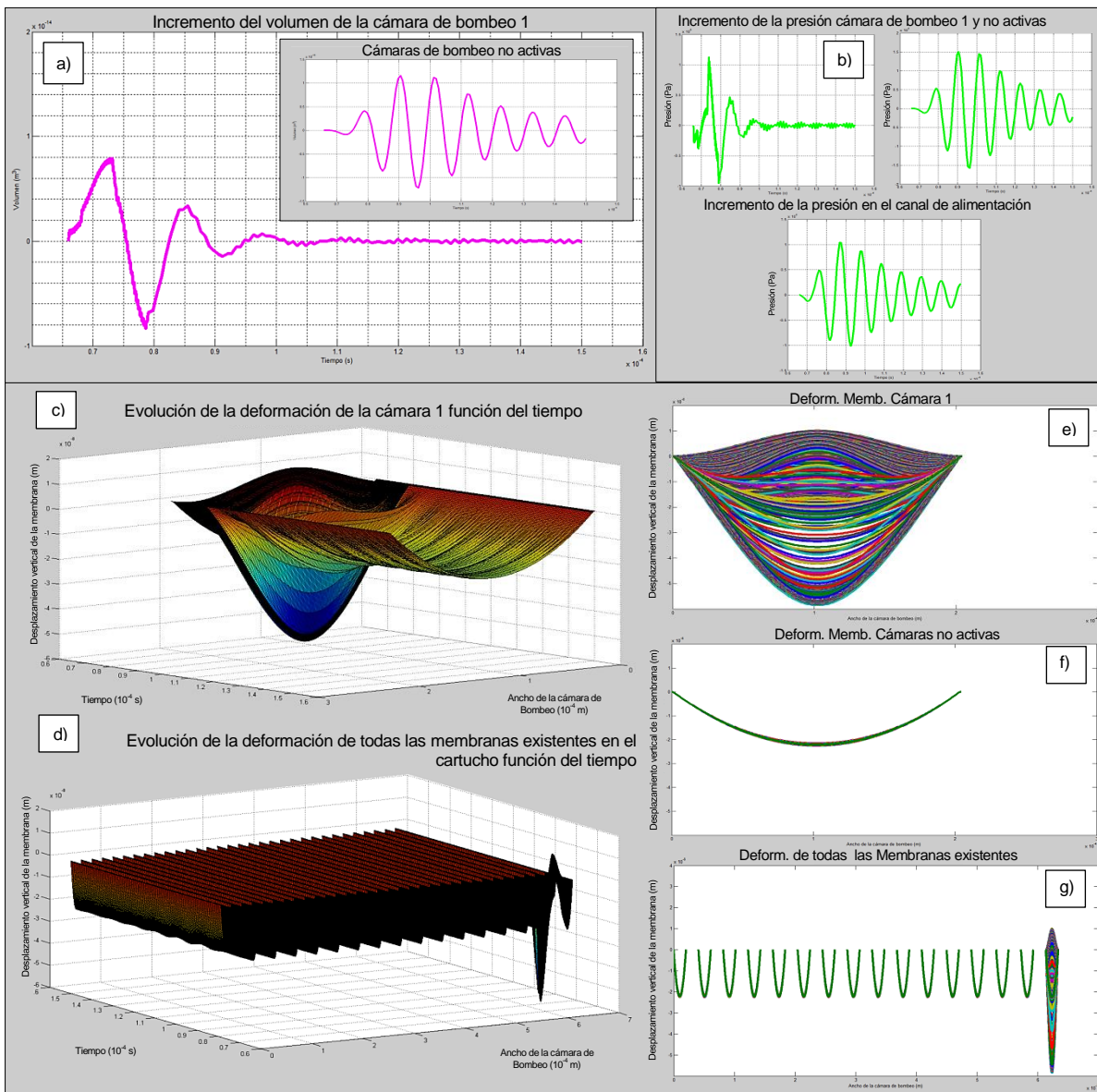
$$W_{eyec.} = \int_0^{t_f} I_i(t) \cdot V_i(t) dt \quad 3.267$$

Sin embargo, estas suposiciones inducen un error en la modelización puesto que la rigidez de la membrana no es constante y tampoco el espesor del piezoeléctrico, y por ende la capacidad de los piezoeléctricos (ver Figura 206). Por lo tanto, siendo absolutamente purista no es posible realizar las simplificaciones planteadas en las ecuaciones 3.241 y 3.242. Por otra parte, el estado actual de la técnica ha exigido mayores velocidades de impresión lo que en definitiva ha requerido, por un lado, incrementar el número de nozzles de los cabezales o cartuchos, y por otro lado, aumentar la frecuencia de excitación de los actuadores piezoeléctricos en consecuencia de eyección de gotas, lo cual invalida las simplificaciones realizadas previamente de nuevo. De forma que, afín de acercarnos al estado actual de la técnica dicha modelización ha de ser replanteada y abordada en su completa profundidad, sin embargo, en el presente documento solo se hará un planteamiento del mismo en el siguiente apartado.

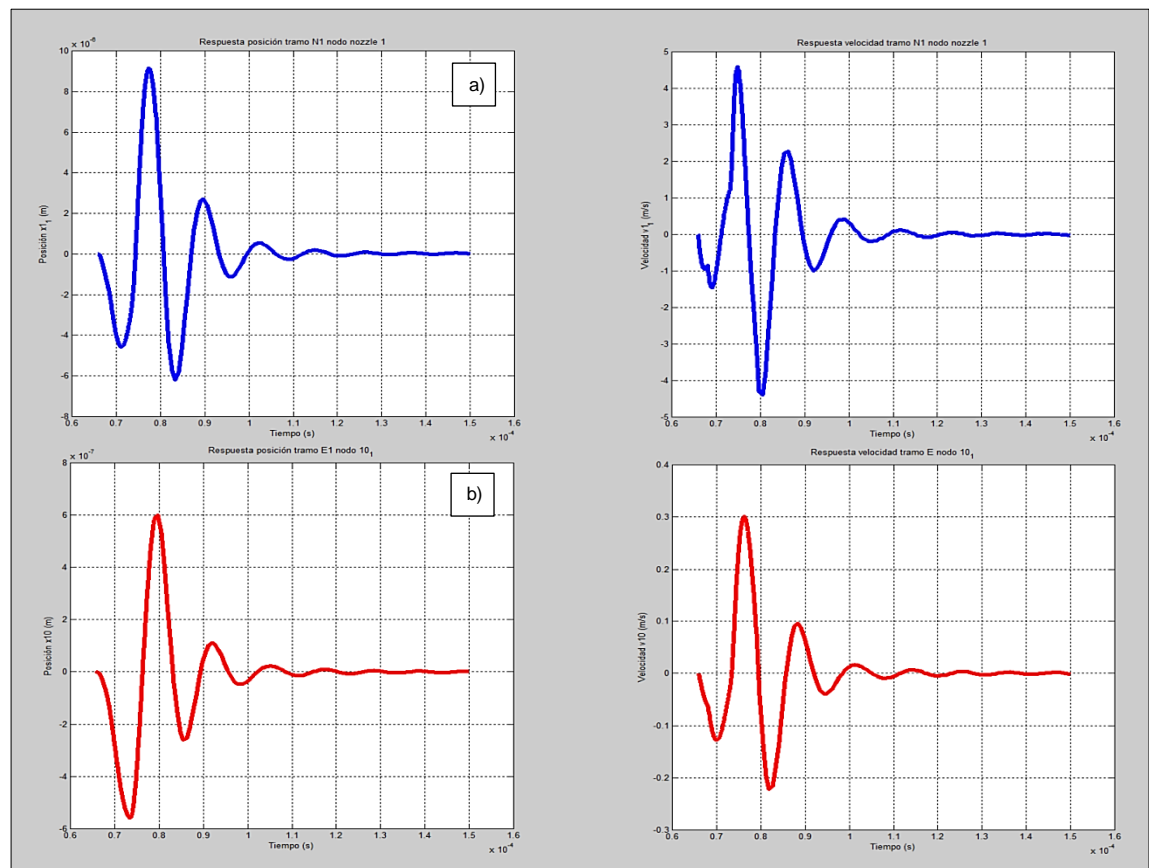


**Figura 210:** Interpretación del actuador piezoeléctrico como un elemento totalmente capacitivo [Fuente: Elaboración propia].

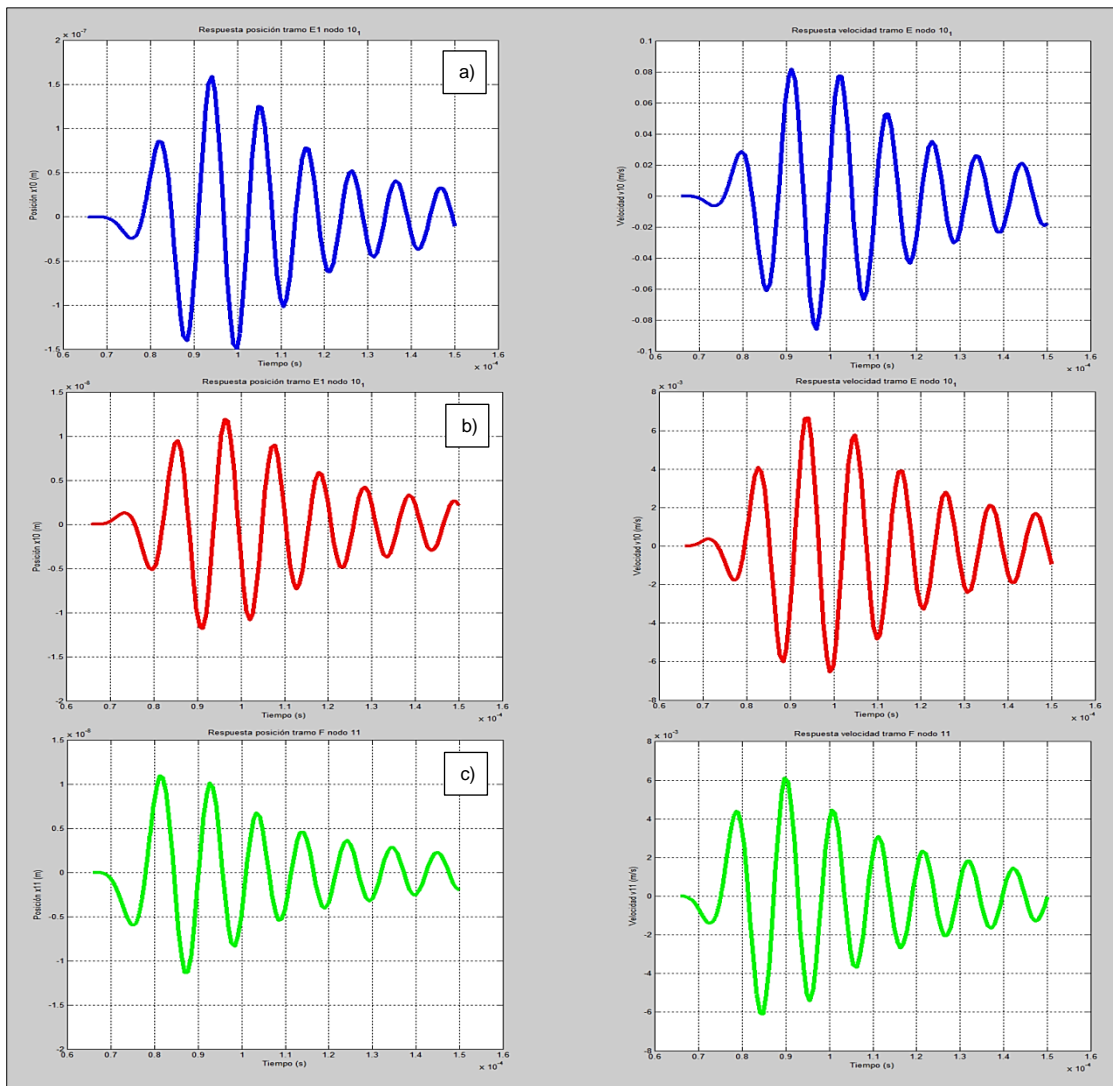
A continuación se expone los resultados obtenidos del modelo anterior aplicados a un sistema multi-nozzle como es el caso del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610.



**Figura 211:** Resultados arrojados por el modelo E-M-H-A implementados en el Matlab para la combinación  $[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1]$ , es decir cuando solo el primer nozzle se encuentra activo y por tanto eyectara una única gota. Desde un punto de vista mecánico: Incremento del volumen en la cámara de bombeo 1 (activa) y resaltado en la esquina superior derecha incremento del volumen en los no activos (a), incremento de la presión (acústica) producto de la señal eléctrica de excitación sin el transitorio del encendido en la cámara activa, en las no activas y en el tramo F respectivamente (b). Evolución de la deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo 1 en función del tiempo (c) y de todas cámaras de bombeo existentes en el cartucho (d). Vista de perfil (plano yz) de la membrana cámara de bombeo 1 (e), de las membranas no activas (f) y finalmente de todas las membranas existentes el intervalo temporal analizado (g) [Fuente: Elaboración propia].

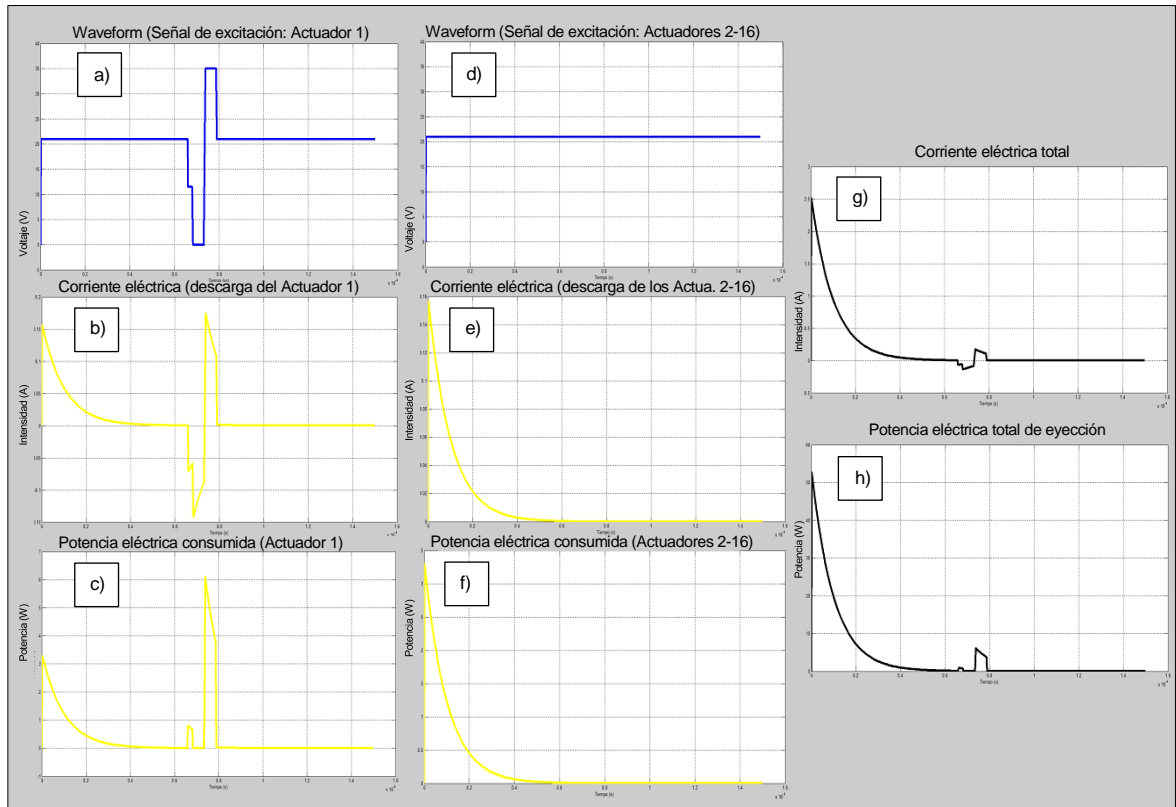


**Figura 212:** Resultados arrojados por el modelo E-M-H-A implementados en el Matlab para la combinación  $[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1]$ , es decir cuando solo el primer nozzle se encuentra activo y por tanto eyectara una única gota. Desde un punto de vista Hidráulico: Respuesta hidrodinámica del cartucho analizado: posición y velocidad de la tinta de plata respecto al nozzle activo en el nodo 1 (a) y respecto al nodo 10 del tramo E de la misma (b) [Fuente: Elaboración propia].



**Figura 213:** Continuación de la gráfica anterior. Posición y velocidad de la tinta en los nozzles no activos respecto al nodo 1 (a) y respecto al nodo 10 del tramo E (b). Finalmente, posición y velocidad de la tinta respecto al nodo 11 del tramo F o de alimentación (c)

[Fuente: Elaboración propia].



**Figura 214:** Resultados arrojados por el modelo E-M-H-A implementados en el Matlab para la combinación  $[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1]$ , es decir cuando solo el primer nozzle se encuentra activo y por tanto eyectara una única gota. Desde un punto de vista eléctrico: Señal de excitación (Waveform) o voltaje aplicado al actuador de la cámara de bombeo 1 (a), intensidad producida a consecuencia de la descarga de dicho actuador activo (b) y potencia eléctrica instantánea consumida durante la eyección de una gota por el nozzle activo 1 (c). De igual forma, Señal aplicada a los nozzles no activos (d), intensidad generada (e) y potencia eléctrica consumida (f). Finalmente, intensidad total generada por el sistema (g) y potencia instantánea eléctrica total consumida en la combinación analizada (h) [Fuente: Elaboración propia].

Como se ha podido apreciar a través en las imágenes anteriores la información arrojada por el modelo E-M-H-A es muy superior a las modelizaciones precedentes. De hecho abre las puertas al diseño de sistemas similares aplicando los mismos principios.

Ésta modelización de marcado carácter multidisciplinar reporta información en primer lugar sobre: desde un punto de vista mecánico, de la deformación de las membranas que sustentan a los actuadores piezoeléctricos y bajo las cuales se encuentran ubicadas las distintas cámaras de bombeo. Un posterior análisis de la flexión compuesta de dichas membranas interpretadas como vigas biempotradas sometidas a una presión variable y condicionada a su propia deformación, permitiría conocer no solo las reacciones en los

empotramientos, sino su comportamiento a fatiga (fundamental debido al elevado número de ciclos a los que se verán expuestos), y bajo un estrés térmico, el envejecimiento de los actuadores (el cual condiciona la respuesta del cartucho), en definitiva su fiabilidad. En segundo lugar, a través de la compresibilidad del fluido (tinta) y teniendo en cuenta la deformabilidad del entorno que lo contiene, ésta modelización permite analizar la evolución de la presión interna transmitida como ondas planas (recogidos en la acústica) a través de las distintas conducciones del sistema hidráulico. Situación a través de la cual nos permite conocer el comportamiento hidrodinámico del cartucho, es decir, en tercer lugar y sin salir de la mecánica, del comportamiento dinámico del fluido (tinta) en todas las conducciones que constituyen al circuito hidráulico del mismo (deshaciendo las simplificaciones realizadas inicialmente en el modelo lumped 1D a través de las leyes de Kirchhoff), y con ello nos referimos a; posición, velocidad, aceleración, etc., lo cual da origen a un posible estudio de los fenómenos de cavitación existentes en sus codos y cambios bruscos de sección en el interior del mismo, así como también contemplar la posibilidad (a evitar) de que entren burbujas de aire en la cámara de bombeo durante las oscilaciones tras la ruptura de los chorros libres (eyección de las gotas) fundamentales nuevamente para garantizar la fiabilidad del sistema Inkjet. Finalmente, a través de este modelo se ofrece la posibilidad de al posibilidad de aumentar o disminuir el rozamiento pared-fluido en las conducciones aguas arriba y abajo de la cámara de bombeo, afín de aumentar el amortiguamiento del sistema hidráulico y de este modo influenciar en el tiempo de atenuación de las oscilaciones modificando las frecuencias de resonancia y en consecuencia de eyección.

Por último, en el campo eléctrico, si bien se ha realizado simplificaciones en el acoplamiento electromecánico de los actuadores, una modelización E-M-H-A completa ofrece la posibilidad del análisis completo del comportamiento eléctrico de los cartuchos en función de la reología de la tinta y dentro de los parámetros de impresión preestablecidos, permitiendo el dimensionamiento de las conducciones, circuitos, etc., y atendiendo a la impedancia, el consumo de los mismos.

Cabe destacar que el análisis realizado refleja el escenario  $[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1]$  es decir, en donde tenemos solo el primer nozzle activo de los 16 existentes. Un análisis completo del cartucho requeriría tener en cuenta los  $65535+1$  escenarios posibles.

Desde el punto de vista del diseño de los mismos, la modelización mostrada aún se encuentra lejos de abordar al sistema en la profundidad que el estado actual de la técnica se encuentra. Sin embargo, en este punto se podría decir que puesto que la compresión de los mismo es mucho mayor, podríamos atrevernos a conjeturar que si se empleara las técnicas de análisis dimensional sería posible, mediante la extrapolación dimensional de éste cartucho ejemplo, en uno de mayor o menor tamaño, quizás estos sistemas Inkjet podrían encontrar aplicación en nuevos campos, y si se recurriera aplicaciones de big data en la búsqueda de reconfigurar geoméricamente dichos sistemas, indagando por machine learning la configuración más óptima de los mismos para unas condiciones dadas, éstos

sufrirían una evolución notable, a lo mejor ofreciendo la posibilidad de superar algunas de las limitaciones impuestas en la actualidad.

### **2.5.5.1. Modelo totalmente acoplado en dos etapas de la respuesta hidrodinámica del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 interpretado como mono-nozzle**

Como hemos podido apreciar la modelización de la respuesta hidrodinámica del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 ha sido abordado paulatinamente ganando complejidad a medida que se ha ido integrando nuevas disciplinas con algunas simplificaciones por un medio (como en el sistema hidroacústico), y sin embargo también se ha dejado al margen deliberadamente los efectos térmicos del sistema calefactor del mismo. Cabe añadir que en la presente tesis sin embargo, desde un punto de vista dinámico los efectos conductivos y convectivos inducidos por el calor producido por el conjunto resistencia-termistor en el sistema no serán tenidos en cuenta aunque sí desde un punto de vista global y estático en las condiciones reológicas del fluido a eyectar.

#### **2.5.5.1.1. Modelo dinámico electro-mecánico acoplado de una viga compuesta biempotrada por elementos finitos**

Desde principio de los 70 la aparición de publicaciones sobre la aplicación de los métodos finitos (MEF) en el análisis de sistemas piezoeléctricos ha ido en crecimiento, siendo hoy muchos y muy variados, el concepto de estructura activa o inteligente es por otra parte más novedoso, y la aplicación de éstas para el desplazamiento de un fluido mucho más novedoso aún.

Debido a la complejidad de las ecuaciones que describen los fenómenos de acoplamiento electromecánico, en particular de piezoelectricidad, solo algunos problemas de este tipo pueden resolverse en forma analítica. Por lo tanto, el método de los elementos finitos, interpretado como una herramienta numérica que basada en dividir el dominio de un problema en múltiples subdominios más simples, para la solución aproximada de un modelo matemático complejo encuentra una aplicación inmediata en este campo.

De manera que, hemos venido arrastrando un modelo en donde analizamos de forma dinámica la membrana superior cámara de bombeo considerada como una viga compuesta biempotrada y cuyas consecuencias se analizan en un segundo modelo acoplado a este y en donde la hidráulica toma protagonismo, pero como se ha resaltado éste ha de replantearse introduciendo las ecuaciones constitutivas de los materiales piezoeléctricos.

Así pues, se ha de partir replanteando las ecuaciones diferenciales del problema haciendo uso de la mecánica de los medios continuos. En primer lugar, la respuesta electro-elástica de un cuerpo piezoeléctrico ésta descrita por las ecuaciones dinámicas de equilibrio mecánico y por las ecuaciones de Maxwell para el electromagnetismo. En las que para el



caso cuasi-electroestático las correspondientes derivadas temporales se pueden despreciar y considerar solo la ecuación de conservación de la carga eléctrica, es decir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + f_i &= \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \\ \frac{\partial D_i}{\partial x_i} - q &= 0 \quad ; \quad i = 1, \dots, 3 \end{aligned} \quad 3. 268$$

Donde  $\sigma_{ij}$  es el tensor de tensiones de Cauchy resultante del conjunto de las fuerzas externas,  $f_i$  representa las fuerzas de volumen (como la gravitatoria),  $\rho$  es la densidad del material a través del cual se obtiene la masa para un volumen de control,  $u_i$  es la componente del desplazamiento en la dirección de la coordenada espacial  $x_i$  y  $t$  es el tiempo, finalmente en la segunda expresión  $D_i$  representa el vector densidad de flujo eléctrico y  $q$  carga eléctrica.

Como se ha establecido previamente  $\sigma_{ij}$  y  $D_i$  se relacionan con el tensor de deformaciones infinitesimales de Cauchy  $[\varepsilon]$  y el vector campo eléctrico  $E_i$  mediante las ecuaciones constitutivas piezoeléctricas inversa y directa, expresiones 3. 241 y 3. 242, reordenadas:

$$\begin{aligned} [\sigma_{ij}] &= [C_{ijkl}] \cdot [\varepsilon_{kl}] - [e_{ijk}] \cdot [E_k] \\ [D_i] &= [e_{ikl}] \cdot [\varepsilon_{kl}] + [\varepsilon_{ik}^S] \cdot [E_k] \end{aligned} \quad 3. 269$$

Donde el tensor de deformaciones y el vector campo eléctrico se relacionan con el vector de desplazamientos mecánicos  $u_i$  y con el potencial eléctrico  $\varphi$  respectivamente mediante las siguientes expresiones:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad ; \quad E_i = - \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \quad 3. 270$$

Es importante resaltar que  $\varepsilon_{kl}$  representa las deformaciones infinitesimales de Cauchy mientras que  $\varepsilon_{ik}^S$  el tensor de permitividad del elemento (sometido a una tensión constante o inexistente). El continuo piezoeléctrico por otro lado, puede estar sujeto a condiciones de borde, ya sean esenciales o naturales, de naturaleza mecánica o eléctrica, o una combinación de las mismas:

Componentes de los desplazamientos  $u_i$  prescritos en  $S^U$ :

$$u_i = U_i$$

Componentes de las fuerzas de superficie  $F_i$  prescritas  $\sigma^S$ :

$$\sigma_{ij} n_j = F_i$$

Donde  $n_j$  es el vector unitario normal a la superficie exterior del continuo.

Potencial eléctrico  $V$  prescrito en la región  $S^\varphi$ :

$$\varphi = V$$

Carga eléctrica  $Q$  prescrita en  $S^Q$ :

$$D_i n_i = -Q_i$$

Las ecuaciones diferenciales (3. 268), junto con las ecuaciones constitutivas (3. 269), las ecuaciones cinemáticas (3. 270), y las condiciones de contorno anteriores, constituyen la formulación fuerte del problema, la cual pocas veces puede resolverse en forma cerrada. Una alternativa para hallar la solución a este problema consiste en plantearlo en forma débil empleando el método de Residuos ponderados o Mínimos cuadrados. Otra manera, es encontrar un principio variacional asociado y utilizarlo para su resolución, como por ejemplo, el método de elementos finitos. La solución de problemas a partir de la minimización de un funcional es muy común en Física e Ingeniería. Como ya se descrito anteriormente haciendo uso del principio de Hamilton extendido al caso del continuo piezoeléctrico, es posible encontrar un funcional a minimizar, considerando como variables independientes los desplazamientos mecánicos  $u_i$  y el potencial eléctrico  $\varphi$ .

De forma que, considerando que el piezoeléctrico tiene un volumen  $\Omega$ , limitado por una superficie  $S$ , y que trabajo es fuerza por desplazamiento, al multiplicar las ecuaciones diferenciales de la expresión (3. 269) por variaciones arbitrarias y admisibles de las variables independientes, sumar ambas ecuaciones dinámicas de equilibrio e integrarlas en todo su dominio se obtiene una nueva expresión genérica con la cual validar el principio de Hamilton, es decir:

$$\int_{\Omega} \left( \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i - \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right) \delta u_i dV + \int_{\Omega} \left( \frac{\partial D_i}{\partial x_i} - q \right) \delta \varphi dV = 0 \quad 3. 271$$

De forma que, para todo desplazamiento  $u_i$  y potencial eléctrico  $\varphi$  existente, se cumple que el balance energético anterior es nulo luego de igual forma será nulo para una variación de dichas variable independientes. Por otra parte, por el teorema de Green los términos primero y cuarto de la expresión anterior evolucionan a:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \delta u_i dV &= \int_S \sigma_{ij} \delta u_j n_i dS - \int_{\Omega} \sigma_{ij} \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} dV \\ \int_{\Omega} \frac{\partial D_i}{\partial x_i} \delta u_i dV &= \int_S D_i \delta \varphi n_i dS - \int_{\Omega} D_i \frac{\partial \delta \varphi}{\partial x_i} dV \end{aligned}$$

Lo que nos lleva finalmente reescribir la expresión 3. 271 de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} - \int_{\Omega} \sigma_{ij} \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} dV + \int_S \sigma_{ij} \delta u_j n_i dS + \int_{\Omega} f_i \delta u_i dV - \int_{\Omega} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \delta u_i dV \\ + \int_S D_i \delta \varphi n_i dS - \int_{\Omega} D_i \frac{\partial \delta \varphi}{\partial x_i} dV - \int_{\Omega} q \delta \varphi dV = 0 \end{aligned} \quad 3. 272$$

Así desde el punto de vista mecánico los dos primeros términos validan el principio de los trabajos virtuales, siendo el siguiente término asociado a la energía potencial y el siguiente el que hace alusión a la energía cinética. Por otra parte, desde el punto de vista eléctrico el balance energético se lleva a cabo teniendo en cuenta el trabajo realizado por las cargas debido a los esfuerzos externos, y debido al campo existente así como también la energía cedida debido a su desplazamiento (carga y descarga del actuador). Es decir, en virtud de la propiedad conmutativa del operador variacional  $\delta$  respecto del operador diferencial:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} &= \delta \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \delta \varphi}{\partial x_i} &= \delta \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \\ \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j} &= \delta(\epsilon_{ij} + \omega_{ij}) = \delta \epsilon_{ij} + \delta \omega_{ij}\end{aligned}$$

Siendo  $\omega_{ij}$  el tensor rotaciones del sólido rígido (tensor antisimétrico), al introducir estas expresiones en la ecuación 3. 275, la misma evoluciona a:

$$\begin{aligned}- \int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV + \int_S F_i \delta u_i n_i dS + \int_{\Omega} f_i \delta u_i dV - \int_{\Omega} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \delta u_i dV + \int_S Q \delta \varphi n_i dS \\ - \int_{\Omega} D_i \delta E_i dV - \int_{\Omega} q \delta \varphi dV = 0\end{aligned}\quad 3. 273$$

Afín de encontrar una expresión que valide el principio de Hamilton, siendo  $\delta u_i$  y  $\delta \varphi$  dependientes del tiempo y siendo 0 en los instantes  $t_1$  y  $t_2$  cualquiera, integrando la expresión principal anterior dentro de dicho intervalo temporal e intercambiando los símbolos de integración en algunos casos tenemos que:

$$\begin{aligned}- \int_{\Omega} \int_{t_1}^{t_2} \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dt dV + \int_S \int_{t_1}^{t_2} F_i \delta u_i n_i dt dS + \int_{\Omega} \int_{t_1}^{t_2} f_i \delta u_i dt dV - \int_{\Omega} \int_{t_1}^{t_2} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \delta u_i dt dV \\ + \int_{t_1}^{t_2} \int_S Q \delta \varphi n_i dS dt - \int_{t_1}^{t_2} \int_{\Omega} D_i \delta E_i dV dt - \int_{t_1}^{t_2} \int_{\Omega} q \delta \varphi dV dt = 0\end{aligned}\quad 3. 274$$

Luego integrando por partes el cuarto término, y atendiendo a que la energía cinética es un escalar expresable como;  $T = \int_{\Omega} \rho \frac{\dot{u}^2}{2} dV$  podemos decir que:

$$\begin{aligned}- \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{1}{2} \delta \int_{\Omega} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} dV \right) dt + \int_{t_1}^{t_2} \left( \delta \int_S F_i u_i dS \right) dt + \int_{t_1}^{t_2} \left( \delta \int_{\Omega} f_i u_i dV \right) dt - \delta^{(1)} \int_{t_1}^{t_2} T dt + \int_{t_1}^{t_2} \left( \delta \int_S Q \varphi dS \right) dt \\ - \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{1}{2} \delta \int_{\Omega} D_i E_i dV \right) dt - \int_{t_1}^{t_2} \left( \delta \int_{\Omega} q \varphi dV \right) dt = 0\end{aligned}\quad 3. 275$$

Por último siendo todas las fuerzas involucradas conservativas y haciendo distinción entre energía cinética y potencial extendida al caso piezoeléctrico tenemos:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} T - \left( \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} dV - \int_S F_i u_i dS - \int_{\Omega} f_i u_i dV + \int_S Q \varphi dS - \frac{1}{2} \int_{\Omega} D_i E_i dV + \int_{\Omega} q \varphi dV \right) dt = 0 \quad 3.276$$

Es decir;

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U) dt = 0 \quad 3.277$$

De modo que, la energía potencial total extendida, término que incluye la contribución piezoeléctrica es definible como:

$$U = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} dV - \int_S F_i u_i dS - \int_{\Omega} f_i u_i dV + \int_S Q \varphi dS - \frac{1}{2} \int_{\Omega} D_i E_i dV + \int_{\Omega} q \varphi dV \quad 3.278$$

Cabe destacar sin embargo que la notación tensional de la expresión 3. 276 dificulta su manipulación, luego afín de obtener un sistema de ecuaciones diferenciales con el cual por el método de los elementos finitos encontrar una solución al problema, ésta ha de ser reexpresado como un producto de matrices y vectores. Luego el tensor deformaciones será ordenado en forma vectorial de la siguiente manera:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{11} \ \varepsilon_{22} \ \varepsilon_{33} \ \varepsilon_{12} \ \varepsilon_{13} \ \varepsilon_{23}\}^T \quad 3.279$$

Así pues, siendo las ecuaciones constitutivas de los piezoeléctricos expresadas en forma matricial como:

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= [C] \cdot \{\varepsilon\} - [e]^T \cdot \{E\} \\ \{D\} &= [e] \cdot \{\varepsilon\} + [\varepsilon^S] \cdot \{E\} \end{aligned} \quad 3.280$$

Y teniendo en cuenta que el método de los elementos finitos consiste dividir un dominio en subdominios (elementos) que no se superponen pero se unen nodalmente y cuyas variables independientes se aproximan dentro de cada elemento mediante funciones de interpolación o funciones de forma, dichas variables independientes nodales se expresaran a partir de ahora en forma vectorial como:  $q = \{q_m \ q_e\}^T$  haciendo distinción entre los mecánicos y los eléctricos respectivamente. De manera que, tenemos una viga bidimensional la cual posee 4 subdominios en cuyos 5 nodos tenemos 2 grados de libertad desde un punto de vista mecánico (traslación vertical y giro:  $\{u\}$ ) y desde el punto de vista eléctrico, un único grado de libertad (potencial eléctrico:  $\{\varphi\}$ ), es decir en un sistema acoplado por elementos finitos 3 grados de libertad por nodo.

Y siendo las funciones de forma  $[N]$ , una matriz constituida por los polinomios de interpolación a través de los cuales describimos desde un punto de vista global el comportamiento de las variables independientes pertenecientes a cada elemento o subdominio tenemos que:

$$\begin{aligned}\{u\} &= [N_m]\{q_m\} \\ \{\varphi\} &= [N_e]\{q_e\}\end{aligned}\quad 3. 281$$

Por otra parte, el campo de desplazamientos  $\{u\}$  y el campo de potencial eléctrico  $\{\varphi\}$  tienen asociados sus correspondientes campos de deformación  $\{\varepsilon\}$  y campo eléctrico  $\{E\}$  luego en por elementos finitos dichos campos introducen los operadores diferenciales  $[\partial_m]$  y  $[\partial_e]$ , es decir;

$$\begin{aligned}\{\varepsilon\} &= [\partial_m]\{u_m\} = [B_m]\{q_m\} \quad ; \quad \{B_m\} = [\partial_m][N_m] \\ \{E\} &= -[\partial_e]\{\varphi\} = -[B_e]\{q_e\} \quad ; \quad \{B_e\} = [\partial_e][N_e]\end{aligned}\quad 3. 282$$

Luego volviendo a la expresión 3. 278 tenemos que ésta, expresada por el método de los elementos finitos adopta la siguiente forma matricial:

$$\begin{aligned}U &= \frac{1}{2} \int_{\Omega} ([C]\{\varepsilon\} - [e]^T\{E\})^T\{\varepsilon\}dV - \int_S \{F\}^T\{u\}dS - \int_{\Omega} \{f\}^T\{u\}dV + \int_S Q\varphi dS \\ &\quad - \frac{1}{2} \int_{\Omega} ([e]\{\varepsilon\} + [\varepsilon^s]\{E\})^T\{E\}dV + \int_{\Omega} q\varphi dV\end{aligned}\quad 3. 283$$

De forma que, reordenando los distintos términos y sustituyendo en la expresión anterior las igualdades de 3. 411 y 3. 412, ésta puede ser expresada en función de los grados de libertad nodales de la siguiente forma, es decir:

$$\begin{aligned}U &= \frac{1}{2} \int_{\Omega} ([B_m]\{q_m\})^T [C] ([B_m]\{q_m\})dV + \frac{1}{2} \int_{\Omega} ([B_e]\{q_e\})^T [e] ([B_m]\{q_m\})dV + \frac{1}{2} \int_{\Omega} ([B_m]\{q_m\})^T [e]^T ([B_e]\{q_e\})dV \\ &\quad - \frac{1}{2} \int_{\Omega} ([B_e]\{q_e\})^T [\varepsilon^s] ([B_e]\{q_e\})dV + \int_S Q[N_e]\{q_e\}dS + \int_{\Omega} q[N_e]\{q_e\}dV \\ &\quad - \int_S \{F\}^T [N_m]\{q_m\}dS - \int_{\Omega} \{f\}^T [N_m]\{q_m\}dV\end{aligned}\quad 3. 284$$

Y reagrupando en función de las variables independientes expresadas en forma vectorial:

$$U = \frac{1}{2} \begin{matrix} \{q_m\} \\ \{q_e\} \end{matrix}^T \left[ \begin{matrix} \int_{\Omega} [B_m]^T [C] [B_m] dV + \int_{\Omega} [B_m]^T [e]^T [B_e] dV \\ \int_{\Omega} [B_e]^T [e] [B_m] dV - \int_{\Omega} [B_e]^T [\varepsilon^s] [B_e] dV \end{matrix} \right] \begin{matrix} \{q_m\} \\ \{q_e\} \end{matrix} - \left[ \begin{matrix} - \int_S \{F\}^T [N_m] dS - \int_{\Omega} \{f\}^T [N_m] dV \\ \int_S Q [N_e] dS + \int_{\Omega} q [N_e] dV \end{matrix} \right]^T \quad 3. 285$$

Retomando el término de la energía cinética se tiene que:

$$T = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \rho \dot{u}^2 dV = \frac{1}{2} \{\dot{q}_m\}^T \left( \int_{\Omega} \rho [N_m]^T ([N_m]) dV \right) \{\dot{q}_m\} \quad 3. 286$$

Y volviendo a la expresión variacional 3. 277 donde se valida el principio de Hamilton extendido:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \left( \begin{array}{c} \frac{1}{2} \{\dot{q}_m\}^T \left( \int_{\Omega} \rho [N_m]^T [N_m] dV \right) \{q_m\} \\ - \frac{1}{2} \left\{ \begin{array}{c} \{q_m\} \\ \{q_e\} \end{array} \right\}^T \left[ \begin{array}{c} \int_{\Omega} [B_m]^T [C] [B_m] dV + \int_{\Omega} [B_m]^T [e]^T [B_e] dV \\ \int_{\Omega} [B_e]^T [e] [B_m] dV - \int_{\Omega} [B_e]^T [\varepsilon^s] [B_e] dV \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{q_m\} \\ \{q_e\} \end{array} \right\} \\ - \left\{ \begin{array}{c} \{q_m\} \\ \{q_e\} \end{array} \right\}^T \left[ \begin{array}{c} - \int_S \{F\}^T [N_m] dS - \int_{\Omega} \{f\}^T [N_m] dV \\ \int_S Q [N_e] dS + \int_{\Omega} q [N_e] dV \end{array} \right] \end{array} \right) dt = 0 \quad 3. 287$$

Una vez definidas las coordenadas espaciales de los nodos, el vector  $q = \{q_m \ q_e\}^T$  resulta solo dependiente del tiempo y por tanto la única variable independiente del lagrangiano. En estas condiciones, el vector  $q = \{q_m \ q_e\}^T$  que minimiza la expresión 3. 313 es aquel que verifica las condiciones de Euler-Lagrange asociadas:

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0 \quad ; \quad i = 1, \dots, n$$

Donde  $n$  es el número de grados de libertad del sistema discreto sustituto del continuo original. Por lo tanto, la ecuación de Euler-Lagrange puede expresarse de la siguiente manera:

$$\left( \int_{\Omega} \rho [N_m]^T [N_m] dV \right) \{\ddot{q}_m\} + \left[ \begin{array}{c} \int_{\Omega} [B_m]^T [C] [B_m] dV + \int_{\Omega} [B_m]^T [e]^T [B_e] dV \\ \int_{\Omega} [B_e]^T [e] [B_m] dV - \int_{\Omega} [B_e]^T [\varepsilon^s] [B_e] dV \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{q_m\} \\ \{q_e\} \end{array} \right\} = \left[ \begin{array}{c} \int_S \{F\}^T [N_m] dS + \int_{\Omega} \{f\}^T [N_m] dV \\ - \int_S Q [N_e] dS - \int_{\Omega} q [N_e] dV \end{array} \right] \quad 3. 288$$

Y de forma compacta, la ecuación elemental que describe el comportamiento dinámico a través de los nodos de un piezoeléctrico puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} M_{mm} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} \ddot{q}_m \\ 0 \end{array} \right\} + \begin{bmatrix} K_{mm} & K_{me} \\ K_{em} & K_{ee} \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} q_m \\ q_e \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} F_m \\ F_e \end{array} \right\} \quad 3. 289$$

Donde las matrices de masa y rigidez tienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} M_{mm} &= \int_{\Omega} \rho [N_m]^T [N_m] dV: \quad \text{Matriz de masa} \\ K_{mm} &= \int_{\Omega} [B_m]^T [C] [B_m] dV: \quad \text{Matriz de rigidez mecánica} \\ K_{me} &= \int_{\Omega} [B_m]^T [e]^T [B_e] dV: \quad \text{Matriz de acoplamiento mecánico-eléctrico} \\ K_{em} &= \int_{\Omega} [B_e]^T [e] [B_m] dV: \quad \text{Matriz de acoplamiento eléctrico-mecánico} \\ K_{ee} &= - \int_{\Omega} [B_e]^T [\varepsilon^s] [B_e] dV: \quad \text{Matriz dieléctrica} \end{aligned} \quad 3. 290$$

Por otro lado, los vectores de cargas externas tienen las siguientes componentes;

$$F_m = \int_S \{F\}^T [N_m] dS + \int_{\Omega} \{f\}^T [N_m] dV: \text{Vector de cargas mecánicas}$$

3. 291

$$F_e = - \int_S Q [N_e] dS - \int_{\Omega} q [N_e] dV: \text{Vector de cargas eléctricas}$$

De manera que, a través de la formulación mostrada y denominada irreducible, tras el ensamblaje de los distintos elementos que constituyen la membrana superior compuesta de la cámara de bombeo, es posible calcular como ésta reacciona a una excitación eléctrica variable, teniendo en cuenta ahora su acoplamiento electromecánico. Sin embargo, a la expresión anterior se le habría de añadir la variación inducida por la temperatura existente en su entorno la cual hemos dejado deliberadamente al margen previamente, así como también la no linealidad de la respuesta de los piezoeléctricos, así desde un punto de vista más amplio tenemos:

$$\begin{bmatrix} M_{mm} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_m \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{mm} & K_{me} \\ K_{em} & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_m \\ q_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{\Delta T} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_m \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_g & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_m \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_m \\ F_e \end{Bmatrix} \quad 3. 292$$

Donde  $K_{\Delta T}$  representa la matriz elemental de dilatación termica, la cual debido a su escasa influencia en el sistema y puesto que la temperatura se ha considerado constante sus efectos éstos han sido despreciados. Por otra parte  $K_g$  representa la matriz de no linealidad de la respuesta de los piezoeléctricos la cual también despreciaremos en esta modelización.

De forma que, la modelización del sistema desde un punto de vista electro-mecánico para una única cámara de bombeo siendo éste mono-nozzle, arroja un sistema de ecuaciones de segundo orden no homogéneo global de 17 dimensiones (una por grado de libertad mecánico, luego desde un punto de vista elemental: 4 mecánicos y 2 eléctricos, más los grados de libertad hidráulicos (apartado siguiente) que son 2 por cámara de bombeo. Finalmente, cabe destacar que puesto que el actuador es un elemento de sección no constante ya que evoluciona en función de la tensión existente en sus bornes, también lo hace el potencial eléctrico al que se ve expuesto a lo largo del eje vertical del mismo necesitándose hacer una nueva interpolación y por tanto solicitando un elemento finito que desde el punto de vista eléctrico posee 4 grados de libertad dos asociados a la superficie exterior del actuador y dos asociados a la superficie interior del mismo, de modo que en conjunto y para resumir se trata ahora de un sistema de 22 dimensiones por cámara de bombeo constituido de 4 elementos o por nozzle activo.

### 2.5.5.1.2 Modelo dinámico hidro-acústico acoplado del conjunto sistema de bombeo del cartucho Inkjet analizado

Conocida la modelización dinámica lumped (acoplado) por elementos finitos desde el punto de vista electro-mecánico de la cámara de bombeo es necesario ahora abordar sus efectos en una segunda modelización dinámica a través de la acústica y la hidráulica del cartucho Inkjet contemplando todas las conducciones existentes en su interior. Para ello recurrimos a las simplificaciones realizadas a través de las leyes de Kirchhoff como puede apreciarse en

la expresión 3. 227. De manera que, volvemos a otro sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden no homogéneo el cual es monodimensional en donde ahora si tenemos término disipativo asociado a la velocidad del fluido, es decir la modelización del sistema Inkjet recurre a otro modelo acoplado de 2 grados de libertad del tipo:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad 3. 293$$

De forma que, la modelización completa respuesta hidrodinámica del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 interpretado como mono-nozzle pasa por la resolución en dos etapas del siguiente conjunto de ecuaciones que en nuestro caso por tener 4 elementos posee una dimensión de 22:

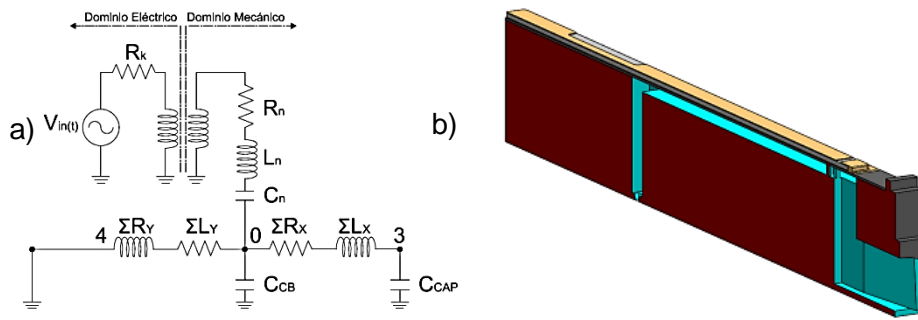
$$\begin{bmatrix} M_{mm} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_m \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{mm} & K_{me} \\ K_{em} & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_m \\ q_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{\Delta T} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_m \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_m \\ F_e \end{Bmatrix}$$

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\}$$

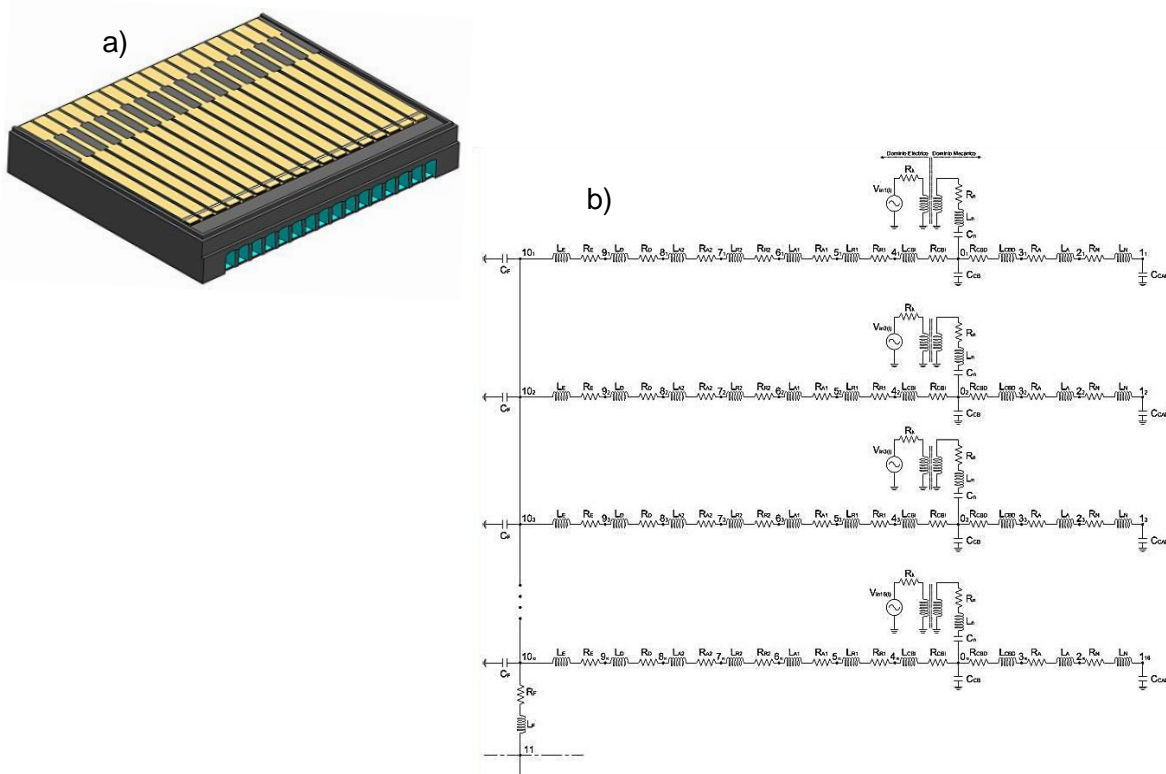
En donde, el vector  $F_m$  es función de la presión en el interior de la cámara de bombeo y de la excitación eléctrica que recibe el piezoeléctrico en sus bornes, la cual a su vez está condicionada por la reología de la tinta y los parámetros de impresión. Dicha excitación eléctrica produce el desplazamiento de las cargas en el piezoeléctrico deformándose así mismo, y en consecuencia a la membrana que lo sustenta. Las consecuencias de dicha excitación por otra parte, son recogidas en el segundo set de ecuaciones a través del cual se analiza el comportamiento del fluido y se modifica las condiciones iniciales del modelo electro-mecánico. Por otro lado, a través de éste segundo modelo acoplado en sí mismo, pero no con el anterior, se verifica si el fluido a eyectar cumplirá con los requisitos impuestos por los parámetros de impresión y de no ser así se reajustar la excitación eléctrica (ver Figura 176).

Esquemáticamente el cartucho Inkjet analizado e interpretado como un sistema mono-nozzle puede ser representado como un circuito RLC tal y como se ha comentado en apartados precedentes y se muestra en la figura de a continuación. El cual, bajo ésta interpretación, en donde conocida las dimensiones, los materiales constructivos, su respuesta y las reologías de la tintas es posible diseñar las señales de excitación (waveform) en función de los parámetros de impresión, aunque ciertamente con un margen de error tolerable.





**Figura 215:** Representación simplificada del circuito eléctrico análogo al sistema dinámico mediante la agrupación de los distintos elementos en serie, que modeliza el comportamiento del fluido en el interior del cartucho Dimatix DMC-11610 bajo una interpretación electro-mecánica-hidráulica-acústica del mismo fijando la temperatura a un valor constante. Esquema electric equivalente a) y vista seccionada del sistema visto como mono-nozzle b) [Fuente: elaboración propia].



**Figura 216:** Representación del sistema de bombeo completo a) y esquema eléctrico completo del cartucho Inkjet como un sistema como multi-nozzle b) [Fuente: elaboración propia].

### 2.5.5.2. Modelización en dos etapas de la respuesta hidrodinámica del Cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 como un sistema acoplado multi-nozzle Electro-Mecánico-Hidráulico-Acústico.

La modelización completa de la respuesta hidrodinámica del Cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 plantea una complejidad añadida, ya que si bien por un lado la excitación de los actuadores de las distintas cámaras de bombeo son independientes y condicionadas a la disposición de las gotas que el patrón a reproducir sobre el sustrato solicite, sus efectos o consecuencias en el circuito hidráulico del mismo no son independientes, puesto que todas las conducciones están conectadas entre sí por el conducto de alimentación o tramo F. Es decir, la excitación del actuador de la cámara de bombeo  $i$  afecta tanto a las conducciones asociadas al nozzle  $i$  como a sus colindantes, lo que en resumen supone la utilización de un sistema de ecuaciones de grandes dimensiones.

La modelización del sistema en dos etapas a través de las cuales se acoplan dos modelizaciones distintas (una asociada a la deformación de la cámara de bombeo a consecuencia de una señal eléctrica y otra al desplazamiento del fluido contenido en su interior) en este aspecto aumenta la dificultad del mismo. Sin embargo, siendo un sistema lineal y siendo el nexo común entre ambos modelos el incremento del volumen en dicha cámara, es posible replantear la modelización del cartucho Inkjet al completo, pudiéndose interpretar como un sistema multi-nozzle constituido por múltiples subsistemas (uno por cada nozzle) electro-mecánico-hidráulico-acústico completamente acoplados entre sí y por ende en conjunto (dejando al margen claro está, la temperatura, por ser considerada estática durante el funcionamiento del mismo, la no linealidad de la respuesta de los piezoeléctricos, el envejecimiento de los mismos y las condiciones de ruptura de los corros libres en régimen de eyección no contemplados en este caso por encontrarse aguas abajo y fuera del sistema). De modo que, siendo cada subsistema de dimensión 22, el análisis completo de la respuesta del cartucho a dichas señales eléctricas en función de la reología de la tinta contenida en su interior, por ser de 16 nozzles y cuyas cámaras de bombeo hemos dividido en 4 elementos, requiere de sistema de segundo orden no homogéneo 352+1 ecuaciones las cuales a continuación se resume en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} M_{mm} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_m \\ 0 \end{Bmatrix}_i + \begin{bmatrix} K_{mm} & K_{me} \\ K_{em} & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_m \\ q_e \end{Bmatrix}_i + \begin{bmatrix} K_{\Delta T} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_m \\ 0 \end{Bmatrix}_i = \begin{Bmatrix} F_m \\ F_e \end{Bmatrix}_i \quad 3. 294$$

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t, i)\}$$

Cabe destacar, por otro lado que esta modelización abre la posibilidad de utilizar múltiples señales ya no solo independientes en función del nozzle a excitar porque el patrón a reproducir sobre un sustrato determinado así lo solicita, sino para generar unas consecuencias concretas lo que se traduce en unas condiciones de impresión distintas

(gotas de distintos volúmenes; Niveles). Dicha eventualidad se aborda en el apartado siguiente.

### **2.5.6. Planteamiento de un sistema Inkjet DOD accionados por piezoeléctricos del tipo bend multi-nozzle multimaterial.**

Siguiendo la línea de pensamiento establecida en las distintas modelizaciones precedentes se ha dejado constancia que en todo sistema Inkjet multi-nozzle hay parámetros fijos como son; la geometría del sistema eyector y la reología del material a eyectar (considerando fija la temperatura), llamémosle tinta. Por otra parte, desde el punto de la reproducción de un archivo digital, tenemos una cantidad de variables que condicionan el funcionamiento de dichos cartuchos, o en genérico: cartuchos y cabezales. Y estos principalmente están condicionados a los patrones a reproducir, pudiendo éstos, los patrones, ser; un punto, una línea, un carácter, un gráfico, una imagen o un elemento tridimensional, es decir, un objeto, un alimento, un tejido, etc. Todos ellos en dificultad creciente pueden ser mono-cromático o multicolores si lo interpretamos como una reproducción bidimensional constituida por píxeles, o en una reproducción tridimensional constituida por vóxeles, desde un punto de vista más general; pudiendo éste elemento a reproducir ser mono-atributo o multi-atributo, constitutivamente mono-material o multi-material. Por lo tanto, considerando al Inkjet como la herramienta a través de la cual empleando un medio líquido podemos transportar y depositar algo en alguna parte, éste algo en alguna parte está condicionado al elemento a reproducir, y por ser el Inkjet una tecnología capaz de combinar de forma eficiente distintos materiales y en distintas graduaciones bajo demanda, la señal de excitación en éste aspecto acoge dicha variabilidad.

De forma que, el estado actual de la técnica permite: a través de un reducido número de materiales eyectables y combinables entre sí (tintas) y limitados por las dimensiones de los archivos digitales a reproducir, dentro del dominio (xyz) que éste posea y con la precisión que éste a su vez permita, reproducir cualquier archivo digital multi-atributo mediante un equipo que disponga de  $j = 1, \dots, m$  cabezales o cartuchos con  $m$  materiales distintos alojados en su interior los cuales a su vez poseen  $n$  nozzles en su interior ( $i = 1, \dots, n$ ), por los cuales se eyecten los  $m$  materiales de  $k$  formas distintas o graduaciones  $k = 1, \dots, o$  siendo  $o$  el número de gotas de distintos volúmenes (niveles) que estos cartuchos o cabezales puedan eyectar.

El control de dicho equipo reproductor solicita pues un modelo del tipo:

$$\begin{bmatrix} M_{mm} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_m \\ 0 \end{Bmatrix}_{ijk} + \begin{bmatrix} K_{mm} & K_{me} \\ K_{em} & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_m \\ q_e \end{Bmatrix}_{ijk} + \begin{bmatrix} K_{\Delta T} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_m \\ 0 \end{Bmatrix}_i = \begin{Bmatrix} F_m \\ F_e \end{Bmatrix}_{ijk}$$

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t, i, j, k)\} \quad 3. 295$$

$$i = 1, \dots, N \quad ; \quad N: \text{nozzles}$$

$$j = 1, \dots, M \quad ; \quad M: \text{Materiales}$$

$$k = 1, \dots, O \quad ; \quad O: \text{Graduaciones}$$

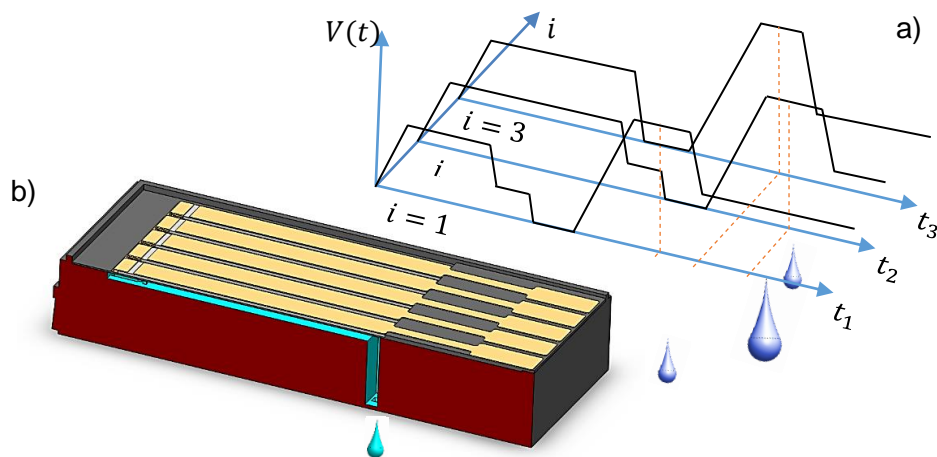
De modo que, ahora en vez de una señal de excitación (una única waveform, como hasta ahora se ha contemplado) para un único material, y ajustada a unos parámetros de impresión fijos en función de la reología de dicho material; principalmente velocidad y volumen de la gota tendremos;  $mxo$  señales distintas, las cuales serán aplicadas a los  $nxm$  nozzles existentes.

De manera que, fijando la variable velocidad de salida de las gotas como constante, y siendo la velocidad de desplazamiento del carro de impresión constante también, el control de la eyección de las gotas en un sistema multi-nozzle multi-material se ha de realizar a través de múltiples señal de eyección habilitadas selectivamente por otra señal y esta última discrimina entre los  $n$  nozzle de los  $m$  cartuchos de las  $o$  graduaciones existentes en función del archivo digital a reproducir y la posición en la que se encuentre el carro de impresión.

Así desde el punto de vista de la simulación, a la inversa conocido el archivo digital a reproducir y por ende la disposición de las gotas en el domino xyz del equipo reproductor teniendo en cuenta que las velocidades de desplazamiento del carro de impresión son constantes, el mapa de puntos que constituye un archivo digital pasa a ser un mapa de desfases temporales, es decir;

$$t_{ijk}|_{FC} = \frac{x_{ijk}}{v}|_{FC} \quad 3. 296$$

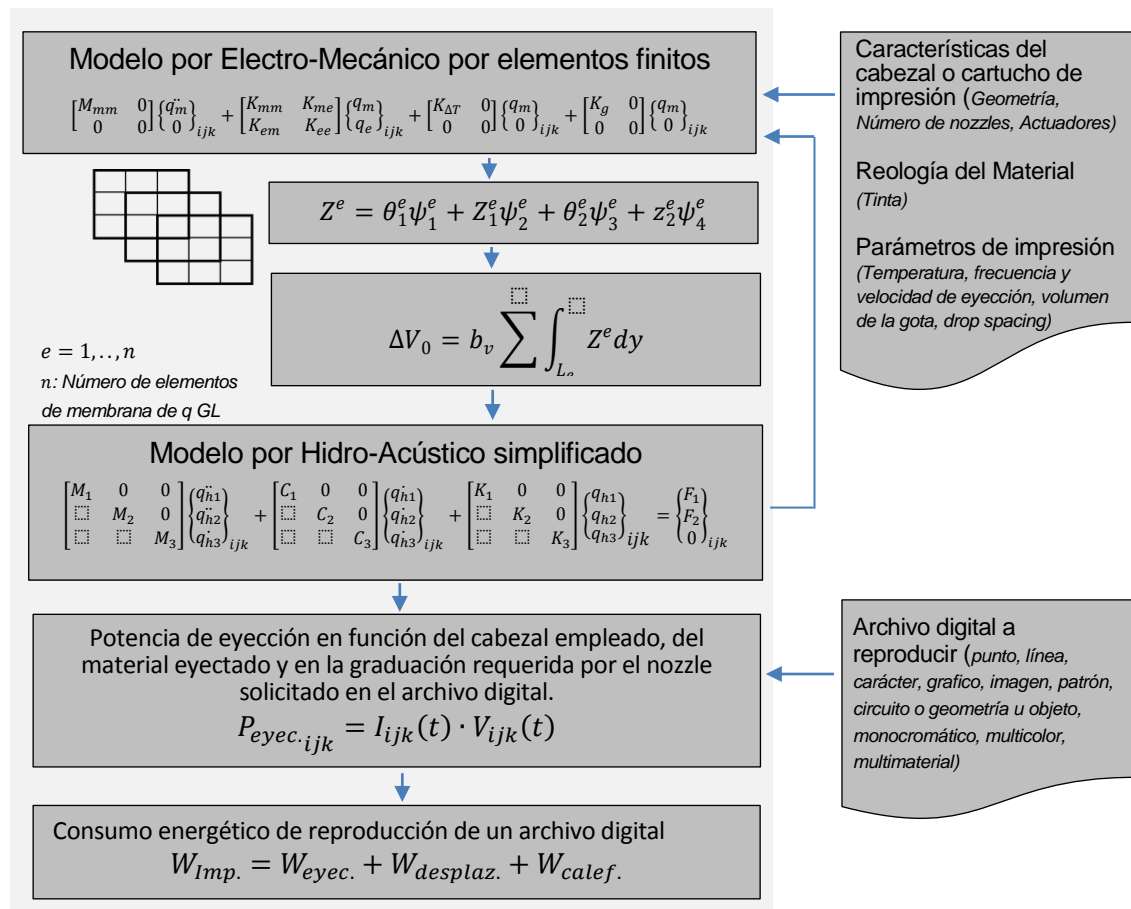
En donde  $t_{ijk}|_{FC}$  representa el momento en el que la señal habilitadora ha de dejar paso a la señal de eyección del nozzle  $i$  que eyectará el material  $j$  de la forma  $k$  cuando el carro de impresión se encuentre realizando la franja  $F$  de la capa  $C$  del elemento a reproducir.



**Figura 217:** Representación de las señales de eyección condicionadas por el archivo digital a reproducir (3 señales para 3 nozzles, desfasadas y en el nozzle 3 con distinto nivel (volumen)) a), y aplicadas sobre uno de los cartuchos multi-nozzle mostrado en perspectiva y seccionado, de un sistema hipotético multimaterial basados en los cabezales analizados b) [Fuente: elaboración propia]

La conceptualización de un sistema capaz de reproducir objetos tridimensionales multi-atributo a partir de un archivo digital, bajo el control de múltiples cartuchos o cabezales dotados de múltiples nozzles plantea cuestiones sin precedentes, ya no solo relacionadas con la combinación de los materiales dentro de una ilimitación geométrica reproductiva, sino relativa a la ejecución del proceso en sí mismo, es decir; dotados de un ordenador con suficiente capacidad de cálculo sería posible conocer a priori, antes de la reproducción cuanto material se va a consumir, cuanta energía y cuánto va a tardar. Es decir, mediante la simulación (aunque no completa debido al coste computacional) del acto en sí de reproducción.

Basándonos en un cabezal de 16 nozzles, bastaría simular 65536 escenarios posibles por nivel de gota, por material disponible en el equipo, y una vez almacenada la información correspondiente al consumo de cada escenario (ver Figura 218), la reproducción de cada píxel de cada capa que constituirá cada vóxel de una geometría multi-atributo estará constituida por una suma de escenarios y por tanto, en conjunto: un objeto, tejido, alimento puede ser interpretado como una descomunal suma de escenarios previamente contemplados y simulados.



**Figura 218:** Algoritmo genérico multietapa para el cálculo de la potencia eléctrica requerida para la eyección de una gotita del material  $j$  en la graduación  $k$  en un sistema de  $N$  nozzles, bajo una interpretación del mismo como un sistema Electro-Mecánico-Hidráulico-Acústico, y tras la introducción del archivo digital el consumo de eléctrico de su reproducción [Fuente: Elaboración propia].

De manera que, teniendo en cuenta el algoritmo anterior desde un punto de vista más amplio nos encontramos ante un sistema que pierde masa como consecuencia de una excitación eléctrica. Excitación a su vez que, debido a que se encuentra muy por debajo de la frecuencia natural de los actuadores hace que éstos ofrezcan un comportamiento capacitivo variable. Bajo la interpretación inicial en donde despreciábamos las matrices de acoplamiento, la cuantificación de la potencia eléctrica consumida por el sistema durante el proceso de eyección se realizaba a través de la carga y descarga de los piezoeléctricos de capacidad constante, ahora en este caso dicha intensidad puede ser cuantificada a partir del modelo por nozzle activo como:  $(I(t) = \partial q_e / \partial t)$  consecuencia del voltaje aplicado al actuador del mismo (señal o waveform  $V(t)$ ). De forma que, indistintamente del modelo considerado, acoplado o no, en dos etapas o no, la potencia eléctrica instantánea requerida por estos sistemas durante el proceso de eyección en función de la reología de la tinta y los parámetros de impresión deseados puede definirse como:

$$P_{eyec.ijk} = I_{ijk}(t) \cdot V_{ijk}(t) \quad 3. 297$$

Del mismo modo, la energía eléctrica consumida por gota eyectada por el nozzle  $i$  del material  $j$  en la graduación ó nivel  $k$  puede definirse como:

$$W_{eyec.ijk} = \int_0^{t_f} I_{ijk}(t) \cdot V_{ijk}(t) dt \quad 3. 298$$

De forma que, en un sistema de impresión Scan Printing, la energía eléctrica de eyección requerida para la reproducción de una franja  $a$  (ancho imprimible por un cartucho o cabezal de impresión) de una capa  $c$  de una geometría tridimensional cualquiera reproducida por un sistema reproductor del tipo planteado con un drop spacing en la dirección horizontal (scan direction)  $b$  puede ser expresada como:

$$W_{eyec.} = \sum_a \sum_b \sum_c \sum_j^M \int_0^{t_f} (P_{eyec.ejk})_{abcj} dt \quad 3. 299$$

Donde a diferencia de la expresión anterior, ahora tenemos en cuenta los escenarios simulados anteriormente, es decir los  $OxMx2^N$  posibles. De manera que, la energía eléctrica de eyección para la reproducción de un archivo digital cualquiera se define como la integral de la potencia instantánea evaluada durante el periodo de eyección ( $0 - t_f$ ) en función del salto entre gotas  $b$  de la franja  $a$  a reproducir, de la capa  $c$  del objeto a construir, en cuyo equipo existen  $j$  materiales distintos y por tanto, en cada salto vertical (feed direction)  $a$  pueden estar éstos presentes o no, los cuales han sido eyectados a través de los algunos de los  $N$  nozzles existentes en cada cabezal contemplados en el escenario  $e$ , el cual contiene a los  $M$  materiales disponibles en el equipo y en alguna de los  $O$  niveles, graduaciones o tamaños de gotas que el sistema sea capaz de eyectar.

Por otro lado, puesto que la reproducción por tanto de un patrón, carácter, texto, gráfico o imagen u objeto en el estado actual de la técnica ofrece la posibilidad de combinar múltiples colores por píxel o materiales por vóxel, situación que se traduce en un consumo másico variable por material (tintas), éste en conjunto puede definirse como:

$$M_{imp.} = \sum_a \sum_b \sum_c \sum_j^M \sum_k^O (\rho_j \cdot V_{ejk}) \quad 3. 300$$

Donde ahora  $\rho_j$  representa la densidad del material  $j$ , el cual se eyecta en  $O$  volúmenes distintos, y por tanto, en cada salto  $b$  de la franja  $a$  de la capa  $c$  estará constituida de  $j$  escenarios  $e$  de todos los posibles, correspondientes a cada uno de los materiales existentes.

Finalmente, es necesario establecer una relación espacio-temporal con el carro de impresión afín de conocer la duración de la reproducción y en este aspecto conocida velocidad de desplazamiento del carro y los parámetros de impresión (drop spacing y a

través de éste, resolución (puntos por pulgada)) considerando que ésta la reproducción de una franja  $a$  se realiza de una sola pasada y partiendo de la base que conocemos la velocidad de desplazamiento tanto en el sentido de alimentación como en vertical podríamos decir que:

$$t_{imp.} = \left(\frac{b_x}{V_x}\right) + \left(\frac{a_y}{V_y}\right) + \left(\frac{c_z}{V_z}\right) \quad 3. 301$$

Donde  $a_y, b_x, c_z$  representan ancho de la franja, largo de la franja y altura de la capa en definitiva dimensiones del objeto y  $V_x, V_y, V_z$  velocidades del carro de impresión. Así desde un punto de vista general que en un sistema dotado de cabezales cuyos depósitos de tintas se encuentran alejados del carro de impresión tenemos:

$$W_{Imp.} = W_{eyec.} + W_{desplaz.} + W_{calef.} + W_{sist. aux.}$$

$$W_{eyec.} = \sum_a \sum_b \sum_c \sum_j^M \int_0^{t_f} (P_{eyec. e_{jk}})_{abc} dt \quad 3. 302$$

$$W_{desplaz.} = [(E_x P_{Motor_x} + E_y P_{Motor_y} + E_z P_{Motor_z}) t_{AB} + (E_x P_{Motor_x} + E_y P_{Motor_y} + E_z P_{Motor_z}) t_{AC} + (E_x P_{Motor_x} + E_y P_{Motor_y} + E_z P_{Motor_z}) t_{AD}] E_{ijkpMG}$$

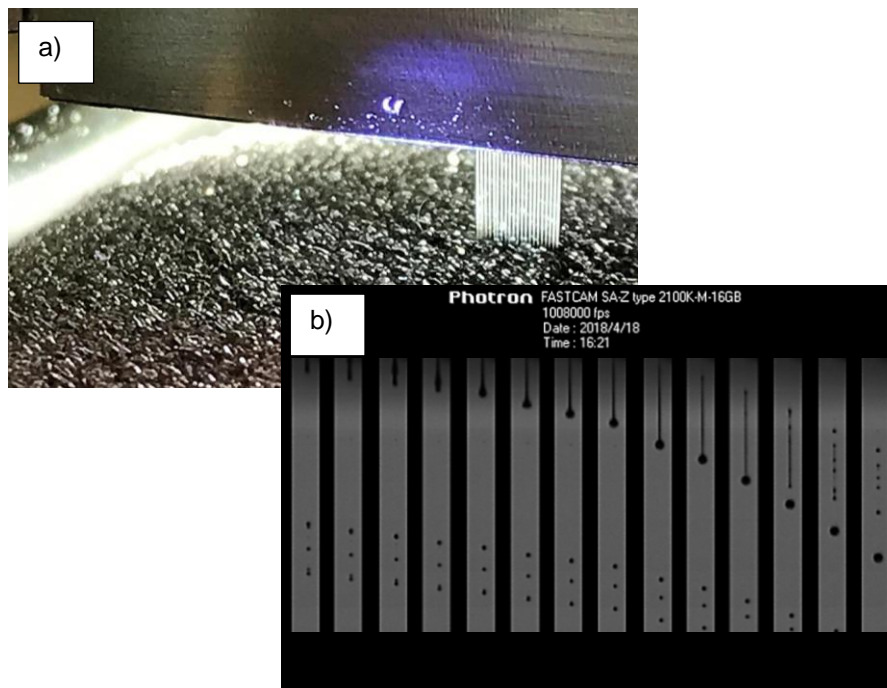
$$W_{calef.} = \int_0^{t_{imp.}} P_{calef.} dt$$

Donde  $t_{AB}, t_{AC}, t_{AD}$  representa la duración del desplazamiento del carro de impresión a lo largo de la franja  $a$  (dirección X), a lo ancho, es decir entre franjas (dirección Y) por el número de franjas y a lo alto es decir, entre capas (altura de capa, dirección Z) por el número de capas respectivamente. Por otro lado, cabe destacar que ahora hemos recurrido al uso un enabler  $E$ , a través del cual se hace referencia a la posición en la que se encuentre el carro de impresión (considerando a la máquina ciega y accionada por motores paso a paso). Finalmente, a través de éste habilitador se discierne entre el consumo eléctrico de los motores x, y, z en funcionamiento y en su estado inactivo y bloqueado.

Finalmente, cabe añadir que se ha aglutinado el consumo energético de los elementos auxiliares como son los sistemas de bombeo, calefacción de los depósitos de tinta, lámparas UV, etc., en el término  $W_{sist. aux.}$ , y el consumo energético de los sistemas de calefacción de los cabezales y/o cartuchos en  $W_{calef.}$  Por último, destacar que si bien el consumo eléctrico de eyección de un sistema capaz de depositar a altas frecuencias gotas del tamaño de picolitros es insignificante en comparación al consumo de los sistemas auxiliares y de desplazamiento, en sistemas dimensionalmente mayores y capaces de eyectar gotas de un volumen mayor y de materiales más viscosos, la importancia de dicho consumo en el total, cobra un mayor protagonismo siendo relevante ante estrategias especulativas. Por ejemplo, si se desea reproducir una casa o una pista de aterrizaje en un isla desierta con parte de los materiales disponibles allí, afín de minimizar costes y justificar la viabilidad del proyecto se



ha de conocer en antelación todos los consumos, la duración, etc., situación que requerirá la simulación de dicha reproducción.



**Figura 219:** Imagen de un cabezal de impresión del tipo push de generación 5 de la empresa RICOH de 384 nozzles de los cuales solo una veintena se encuentran activos (a) y secuencia de imágenes tomadas en las instalaciones de dicha empresa ubicada en Telford UK de a través de una cámara de ultra alta velocidad de la eyección de una gota de tinta de nivel 2 constituida por un pulso doble sin optimizar aplicado a los actuadores de dicho cabezal (b) [Fuente: elaboración propia].

En la secuencia de imágenes de la figura anterior se puede apreciar la eyección de una gota accionada por un pulso doble con una velocidad de salida variable, siendo el primer pulso el causante de la eyección de un volumen inicial de tinta, mientras que el segundo pulso de un voltaje superior es capaz de desplazar una mayor cantidad de tinta y con la particularidad de al ofrecer una transición más violenta entre los niveles consecutivos del voltaje de la señal eléctrica, generar además de un volumen mayor, una velocidad de eyección superior. De forma que, éstas (ambas gotas) se agrupan en el aire aun cuando la ruptura del chorro libre no se ha producido por completo al inicio de la etapa de eyección, generando una gota de nivel 2 en este caso. Por otro lado, cabe resaltar que puesto que dicha señal de excitación no ha sido optimizada aun, la eyección de la tinta genera gotas satélites haciéndose inadecuada según los parámetros de impresión actuales. Por último, destacar el hecho de que la generación de múltiples niveles de gotas (volúmenes) se realiza mediante la concatenación de distintas waveforms dentro de un mismo pulso de eyección, siendo éste cada vez más largo en el sentido temporal y por tanto reduciendo la frecuencia del sistema haciendo de éste uno menos productivo.

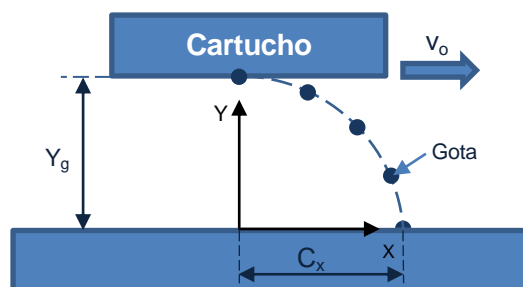
## 2.6. MODELIZACIÓN DE LA TRAYECTORIA Y COMPORTAMIENTO DE LAS GOTAS UNA VEZ EXPULSADAS

El estudio cinético de las gotas una vez eyectadas es de interés en multitud de campos en donde las gotas son esparcidas a través del aire como por ejemplo; en la eyección de combustibles en motores de combustión interna [247] o en el esparcimiento de agua y fertilizantes para la agricultura donde las trayectoria de las gotas cobran especial relevancia [248], etc.

En este apartado se expone la modelización de la trayectoria y el comportamiento de la gota una vez eyectada. A través de ella se ha podido predecir donde caerán las gotas y por tanto ha sido fundamental en el desarrollo del control y coordinación del posicionamiento, y eyección de las gotas afín de reproducir las pistas y los patrones requeridos en el sistema de impresión híbrido multimaterial llamado Nhibrid32D.

### 2.6.1. Modelización de la trayectoria de las gotas

Basándonos en los trabajos previos de Mohebi y Evans [249], en los cuales se modeliza la trayectoria de gotas eyectadas horizontalmente por sistemas Inkjet, a continuación se expone el modelo de cálculo de la trayectoria de una gota eyectada por un sistema Inkjet DOD, en un medio estacionario, viscoso e incompresible (Aire), teniendo en cuenta el régimen de eyección (semi-laminar) y la geometría de la gota (transición de cilíndrica a esférica). Dicho modelo incremental iterativo ha sido desarrollado con el objetivo de predecir la trayectoria de la gota hasta impactar con el sustrato, así pues, en primer lugar, se plantean las ecuaciones fundamentales de dicha modelización y posteriormente se expone el funcionamiento de dicho algoritmo incremental iterativo.



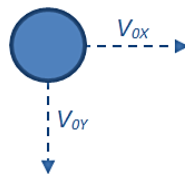
**Figura 220:** Esquema conceptual utilizado en la modelización de la trayectoria de las gotas [Fuente: Elaboración propia].

En el esquema anterior (Figura 220) se muestra conceptualmente el sistema de coordenadas utilizado para el desarrollo del modelo de cálculo de la trayectoria de la gota. Como se puede apreciar se ha utilizado un sistema de coordenadas cartesiano fijo que tiene su origen en el sustrato, en donde  $V_{ox}$  representa la velocidad de transversal del carro Inkjet donde va alojado el cartucho de tinta y  $V_{oy}$  representa la velocidad eyección de las gotas. Por otro lado,  $Y_{gap}$  representa la distancia vertical entre los nozzles del cartucho y el sustrato, así para un tiempo  $t_0$  la gota se encuentra ubicada en el punto  $(0, Y_{gap})$  y tras recorrer la trayectoria e impactar en el sustrato a  $t_f$  la gota se encontrará en la posición  $(C_x, 0)$ .

Por otro lado, como se puede intuir la gota describe un movimiento parabólico donde fruto de la fricción de la gota con el aire éste sufre una desaceleración. Así pues, en primer lugar se plantean las ecuaciones de movimiento deducidas a partir de las leyes de Newton, por tanto:

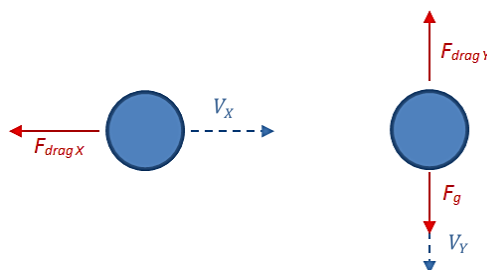
$$m \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{F}_g + \vec{F}_d + \vec{F}_c \quad 3. 303$$

Donde  $F_g$ ,  $F_d$ ,  $F_c$  representa la fuerza debido a la gravedad, la fuerza debido al rozamiento con el aire (Drag) y la fuerza de Coulomb respectivamente (gotas cargadas eléctricamente). Debido a que nuestro el sistema Inkjet es del tipo drop on demand, las gotas no poseen carga como en los sistemas CIJ y por tanto la fuerza  $F_c$  es despreciable.



**Figura 221:** Representación esquemática de las velocidades iniciales de las gotas eyectadas [Fuente: Elaboración propia].

Así pues, teniendo en cuenta el esquema de velocidades iniciales mostrada en la imagen anterior (Figura 286), a continuación se exponen las ecuaciones del movimiento y el diagrama de sólido libre de las gotas respecto a los ejes X, Y (Figura 222).



**Figura 222:** Diagramas del sólido libre de las gotas [Fuente: Elaboración propia].

Eje X:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}_x}{dt} = F_{drag\ x} \quad 3.304$$

Eje Y:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}_y}{dt} = F_{drag\ y} - F_g \quad 3.305$$

Por otro lado, la fuerza de drag o la resistencia al desplazamiento de la gota en un medio fluido, pudiendo considerarse éste como viscoso, incompresible y estacionario, puede estimarse basándonos en la ecuación general de Bernoulli, es decir:

$$\Delta H = \left( \frac{P_2 - P_1}{\rho g} \right) + \left( \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right) + (Z_2 - Z_1) + H_{roz\ 1 \rightarrow 2} \quad 3.306$$

En donde  $H_{roz\ 1 \rightarrow 2}$  representa las pérdidas por fricción en el paso del estado 1 al estado 2, siendo  $v, P, Z$  las variables asociadas a la velocidad, presión y altura piezométrica, y  $\rho, g$  representa la densidad y la gravedad respectivamente. Por otro lado, si despreciamos los términos asociados a las presiones y las alturas piezométricas, y teniendo en cuenta que la presión se puede definir como:  $P = \rho g h$  y fuerza  $F = P \cdot S$  donde  $S$  es la superficie perpendicular a la fuerza, a través de la ecuación 3.306 podemos establecer que la fuerza requerida para desplazar una partícula a través de un fluido puede expresarse como:

$$F = \left[ \rho \left( \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right) + \rho g (H_{roz\ 1 \rightarrow 2}) \right] S \quad 3.307$$

De esta manera, si considerásemos que la fuerza requerida para desplazar una partícula a través de un fluido entre los estados 1 y 2 es producto de un coeficiente, vemos que este ha de tener dos términos; uno asociado a su dinamismo y otro asociado a la fricción, y puesto que la fricción a su vez es función de la velocidad la ecuación anterior puede expresarse como [169]:

$$C_D = C_{D\text{Presión}} + C_{D\text{Fricción}} \quad 3.308$$

$$F_{drag} = C_D \left( \frac{1}{2} \rho v^2 \right) S \quad 3.309$$

Donde  $C_{D\text{Presión}}$  es el término asociado a la diferencia de presión entre la región frontal y posterior de la partícula y  $C_{D\text{Fricción}}$  el término que hace referencia al rozamiento de toda la superficie de la partícula con el fluido que lo rodea. Por otro lado, como se puede apreciar en la ecuación anterior la oposición al desplazamiento que experimenta toda partícula es función de su forma y de su velocidad, por ello como se ha comentado anteriormente en la modelización de la generación de las gotas, debido a que la reconfiguración geométrica de éstas una vez eyectadas tiene lugar en unas  $100\ \mu m$  siendo esta distancia aproximada el 10% del desplazamiento total y debido a la gran diferencia entre la velocidad desplazamiento del carro y la de eyección (88 veces mayor ésta última, datos establecido en

el equipo Nhibrid32D) se ha considerado que la influencia de la forma en la desaceleración horizontal tiene una importancia despreciable en la trayectoria global o al menos en esta primera modelización, y en cuanto a la componente vertical afín de simplificar la modelización se ha considerado que ésta tiene forma esférica desde el inicio a  $t_R = 0$ . En este aspecto considerando al medio como un fluido viscoso, incompresible y estacionario, Stokes [250] estableció que para  $Re \leq 1$  (Régimen laminar) el esfuerzo requerido por una partícula esférica al despasarse a través un fluido puede expresarse como:

$$\vec{F}_{drag} = -3\pi\phi_0\mu\vec{v} \quad 3. 310$$

Donde  $\phi_0, \mu, v$  representan el diámetro de la gota, la viscosidad dinámica del aire y la velocidad de la gota respectivamente. La velocidad de eyección de las gotas por otro lado, suelen estar por el entorno de los 3-6 m/s en sistemas Inkjet DOD [251], lo cual teniendo en cuenta las características del medio (aire),  $\rho_a, \mu_a$  de aproximadamente  $0,82 \text{ kg/m}^3$  y  $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  respectivamente, nos encontramos con un Reynolds de 30-60, luego el flujo al redor de la esfera no puede considerarse laminar [252], lo cual invalida el uso de la expresión 3. 310. En este aspecto Coulson et. Al [253] modelizo la fuerza de drag de partículas esféricas mediante dos agrupaciones adimensionales de variables de una forma similar al diagrama de Moody donde se expone el factor de pérdida de carga en tuberías (ver Figura 223). De esta forma la primera agrupación adimensional de variables es el número de Reynolds y la segunda es  $R'/\rho v^2$  donde  $R'$  es la fuerza por unidad de área proyectada de la partícula en el plano perpendicular a la dirección de movimiento (en una partícula esférica dicha área proyectada es un círculo), así la ecuación 3. 310 puede re-expresarse como:

$$F_{drag} = R' \left( \frac{\pi\phi_0^2}{4} \right) \quad 3. 311$$

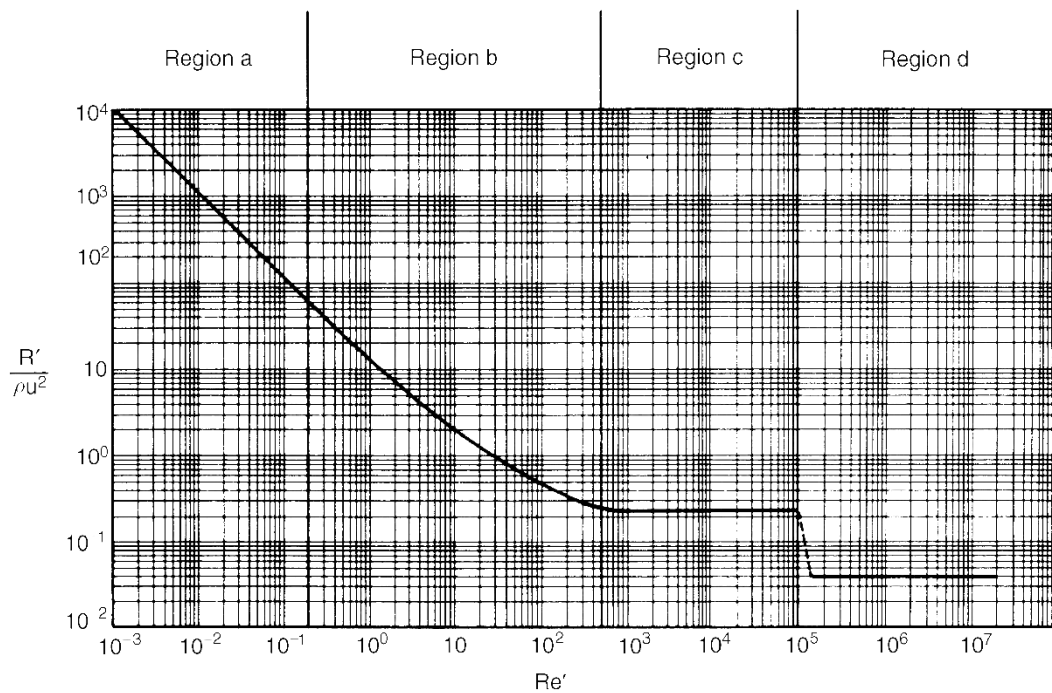
Y a su vez;

$$\frac{R'}{\rho v^2} = \frac{4F_{drag}}{\pi\phi_0^2\rho v^2} \quad 3. 312$$

Así  $R'/\rho v^2$  es una especie de coeficiente de drag, el cual a menudo suele denotarse como  $C'_D$ . Por otro lado, frecuentemente el coeficiente de drag  $C_D$  suele expresarse como función de  $R'$  mediante la expresión [253]:

$$C_D = 2C'_D = \frac{2R'}{\rho v^2} \quad 3. 313$$

Donde el factor de 2 corresponde al tributo concedido por White [254] a Euler y Bernoulli.



**Figura 223:** Representación de la fuerza de drag en función del Reynolds [253].

Por otro lado, en la Figura 223 en donde se representa  $C'_D$  como función del  $Re$ , podemos apreciar ésta está a su vez subdividida por tramos, así en función del tramo en el que nos encontremos el cálculo de la fuerza de drag se realizará mediante distintas aproximaciones, las cuales se expone a continuación:

- Intervalo a ( $10^{-4} < Re < 0.2$ ): en este intervalo como se ha comentado anteriormente mediante la ley de Stokes [250] el coeficiente de drag puede expresarse mediante la combinación de la ecuaciones 3. 309 y 3. 310 como:

$$C_D \left( \frac{1}{2} \rho v^2 \right) S = |3\pi\phi_0\mu\vec{v}| \rightarrow C_D = \frac{24}{Re} \quad 3. 314$$

- Intervalo b ( $0.2 < Re < 500$ ): para este intervalo Dallavelle [255] propuso que  $C'_D$  puede considerarse como compuesta por dos partes, una debido a la ley de Stokes y la otra, una constante, debido a efectos no viscosos adicionales, así ésta se expresa como:

$$\frac{R'}{\rho v^2} = 12Re^{-1} + 0,22 \quad 3. 315$$

- Por otro lado, Schiller y Naumann [256] aportaron la siguiente expresión en dicho tramo b alargando el Reynolds hasta 1000:

$$\frac{R'}{\rho v^2} = 12Re^{-1}(1 + 0,15Re^{0,687}) \quad 3. 316$$

- Por otro lado, en el intervalo c ( $500-1000 < Re < 2 \times 10^5$ ) la ley de Newton es aplicable y por tanto, de acuerdo con el trabajo de Coulson et al [253]  $C_D'$  puede expresarse como:

$$\frac{R'}{\rho v^2} = 0,22 \quad 3. 317$$

- Finalmente, en el intervalo d donde  $Re > 2 \times 10^5$  debido a que el flujo en la capa límite cambia a turbulento separándose de la parte trasera de la esfera, la fuerza de drag decrece considerablemente pudiéndose expresar como:

$$\frac{R'}{\rho v^2} = 0,05 \quad 3. 318$$

Dicho esto, se ha de aclarar que el modelo desarrollado en la presente tesis define al coeficiente de drag en función del rango en el que se encuentre el Reynolds mediante la expresión 3. 313, pero debido a que la partícula desacelera como consecuencia del rozamiento afectando al Reynolds dicho valor se ha de calcular iterativamente mediante la siguiente expresión:

$$C_D^{i,j} = \frac{K_{i,j}}{Re} \quad 3. 319$$

Donde  $K_{i,j}$  representa un valor el cual se ajustará iterativamente  $j$  veces hasta converger en función del rango en el que se encuentre Reynolds con el  $C_D$  calculado con modelos anteriores para cada incremento de  $Y$  (ver Figura 224). Así teniendo en cuenta la ecuación 3. 309 y teniendo en cuenta que  $Re = \rho \phi v / \mu$  las ecuaciones de movimiento tanto para el eje X como para el eje Y pueden reescribirse como:

Eje X:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}_x}{dt} = -\frac{K_{i,j}}{8} \pi \phi \mu \vec{v} \quad 3. 320$$

Resolviendo la ecuación diferencial anterior la velocidad horizontal de la gota se define como:

$$\vec{v}_x(t) = c_1 e^{-\left(\frac{K_{i,j} \pi \phi \mu}{8m}\right)t}$$

Donde para  $t = 0 \rightarrow \vec{v}_x(t) = \vec{v}_{0X}$  luego:

$$\vec{v}_x(t) = v_{0X} e^{-\left(\frac{K_{i,j} \pi \phi \mu}{8m}\right)t} \quad 3. 321$$

Y con el objeto de simplificar los cálculos posteriores la ecuación anterior puede reescribirse como:

$$\vec{v}_x(t) = v_{0X} e^{-t/\tau} \quad ; \quad \tau^{-1} = \frac{K_{i,j} \pi \phi \mu}{8m}$$

De igual modo para el eje Y la ecuación de movimiento puede expresarse como:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}_y}{dt} = - \left( \frac{K_{i,j}}{8} \pi \phi \mu \vec{v} \right) - (mg) \quad 3.322$$

Y resolviendo la ecuación diferencial anterior, la velocidad vertical se define como:

$$\vec{v}_y(t) = -g\tau + (v_{0Y} + g\tau)e^{-t/\tau} \quad 3.323$$

De igual manera una vez conocidas las velocidades iniciales (eyección y desplazamiento horizontal de carro Inkjet) así como también las expresiones que definen la evolución de éstas en el tiempo, podemos ahora mediante integración definir su trayectoria y despejar la duración de la misma. Así la posición vertical de la gota puede definirse como:

$$Y(t) = \int_t v_y(t) dt$$

Resolviendo la integral planteada anteriormente la posición en el eje vertical se define como:

$$Y(t) = \left[ \tau \left( -gt + \left( (1 - e^{-t/\tau})(v_{0Y} + g\tau) \right) \right) \right] + Y_{gap} \quad 3.324$$

De igual forma la posición en el eje X de la gota respecto al origen ubicado sobre el sustrato en  $t_0$  se expresa como:

$$X(t) = \tau v_{0X} (1 - e^{-t/\tau}) \quad 3.325$$

Llegados a este punto y una vez deducidas las ecuaciones básicas de posición y velocidad a continuación se expone el algoritmo incremental iterativo con el cual se pretende predecir la ubicación del impacto de la gota contra el sustrato respecto al carro Inkjet en movimiento constante, para ello partimos de las siguientes hipótesis y consideraciones previas:

- a) El modelo desarrollado no tiene en cuenta la formación de la gota y se considera que ésta desde el estado inicial es esférica. Sus características son:
  - Volumen: 10pL. Considerando que la gota no pierde masa por evaporación de solventes y que ésta posee forma esférica donde si  $V = \pi\phi_0^3/6$  su diámetro es de 26,73  $\mu\text{m}$ .
  - Tomando como referencia la tinta de plata ANP cuyas características básicas son: densidad 1,45 kg/l. Por tanto, teniendo en cuenta que  $\rho = m/V$ , la gota tendrá una masa de  $1,45 \cdot 10^{-11}$  Kg.
  - Viscosidad absoluta o dinámica del aire en condiciones estándar  $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$  Pa.s).
  - En cuanto al estado inicial de la gota, debido a que el nozzle se encuentra a una distancia en vertical del sustrato de 1 mm hemos considerado ésta como su ubicación y por otro lado, la gota inicialmente presenta una velocidad inicial  $v_{0X}, v_{0Y}$ . Donde  $v_{0X}$  corresponde a la velocidad de avance del cabezal Inkjet y  $v_{0Y}$  corresponde a la velocidad de eyección respecto al nozzle del cartucho Inkjet (Figura 220).



b) Hipótesis del modelo:

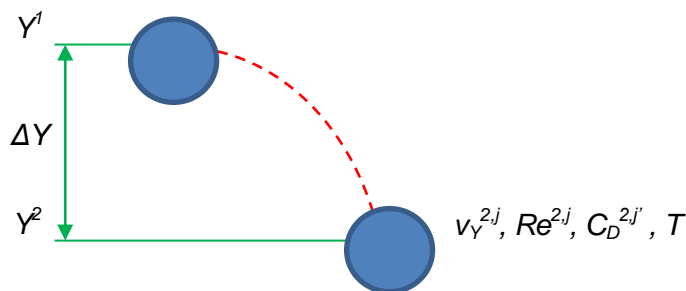
- Hasta ahora hemos planteado el cálculo de las velocidades por separado, es decir respecto al eje X y respecto al eje Y, pero para poder calcular correctamente el Reynold y por tanto a través de él estimar el coeficiente de drag hemos de obtener la velocidad efectiva de la partícula para todo punto de la trayectoria, la cual se define como:

$$|\vec{v}_e(t)| = \sqrt{(\vec{v}_x(t))^2 + (\vec{v}_y(t))^2} \quad 3. 326$$

Y debido a que  $v_{OX} \ll v_{OY}$  la velocidad efectiva puede re-expresarse como:

$$|\vec{v}_e(t)| \approx \sqrt{(\vec{v}_y(t))^2} = |\vec{v}_y(t)|$$

- En segundo lugar debido a que el coeficiente de drag es función del Reynolds y éste a su vez es función de la velocidad efectiva de la partícula, la cual evoluciona en el tiempo fruto de la fricción con el aire y en menor medida de los efectos gravitatorios, se ha considerado oportuno como se ha comentado anteriormente linealizar éste iterativamente, es decir mediante  $j$  iteraciones donde se ajuste  $C_D$  a los valores obtenidos para cada rango de  $Re$  mediante las modelizaciones anteriores, en cada incremento discreto de  $Y$ , así de una forma conceptual el algoritmo incremental iterativo desarrollado en la presente tesis se puede explicar mediante la Figura 224.



**Figura 224:** Esquema de la linealización del coeficiente de drag mediante  $j$  iteraciones en cada incremento  $i$  [Fuente: Elaboración propia].

Dicho esto y teniendo en cuenta que en el cálculo de la velocidad efectiva  $|\vec{v}_e(t)|$  se desprecia la componente horizontal por ser muy pequeña ( $v_x(t)$ ) en el cálculo de la evolución de ésta y en consecuencia la posición horizontal de la gota, se ha de tener en cuenta la velocidad efectiva de la misma para la estimación del Reynolds y en consecuencia el coeficiente de drag. Así pues, mediante la combinación de las ecuaciones 3. 308, 3. 309 y 3. 319 la evolución de la velocidad horizontal de una gota eyectada en un medio fluido viscoso como el aire puede rexpresarse teniendo en cuenta la velocidad efectiva como:

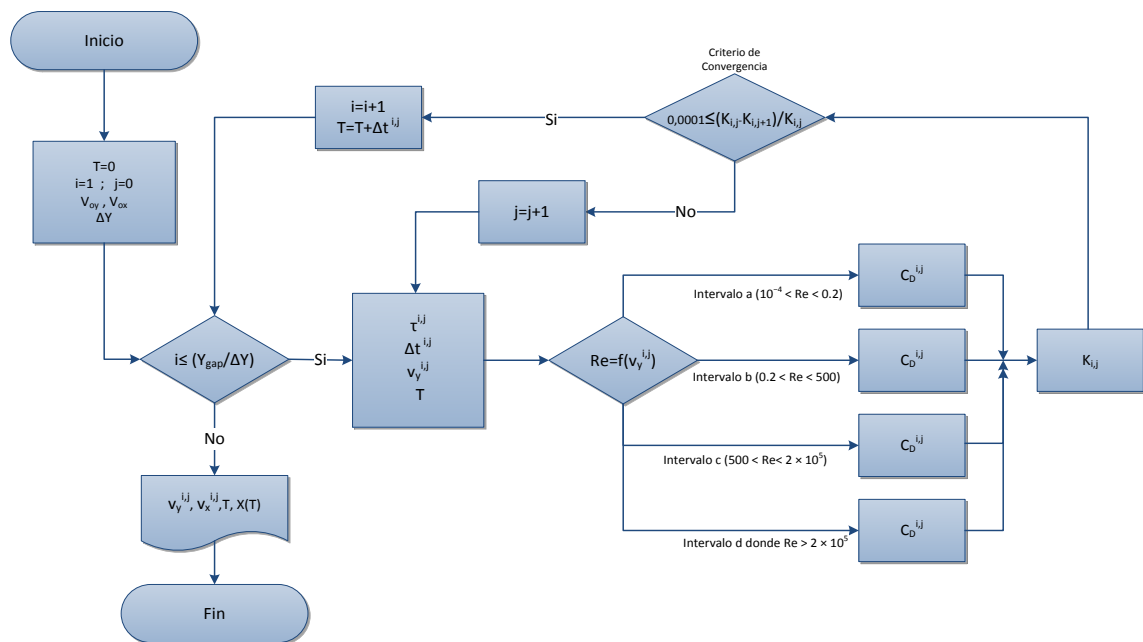
$$\frac{d\vec{v}_x}{dt} = -\frac{1}{\tau} \frac{\vec{v}_x^2}{|\vec{v}_e(t)|} \quad 3.327$$

En este aspecto como  $v_{0X} \ll v_{0Y}$  luego  $|\vec{v}_e(t)| \approx |\vec{v}_y(t)|$  las ecuaciones de movimiento, velocidad y posición para el eje Y se mantendrá iguales a las expresadas anteriormente (3.322, 3.323, 3.324). De igual modo la velocidad y la posición para el eje X pueden ser redefinidas como:

$$\vec{v}_x(t) = \frac{v_{0X}(|\vec{v}_y(t)|\tau)}{(|\vec{v}_y(t)|\tau) + (v_{0X}t)} \quad 3.328$$

$$X(t) = \int \vec{v}_x(t)dt \rightarrow X(t) = |\vec{v}_y(t)|\tau \ln\left(1 + \frac{\vec{v}_{0X}t}{|\vec{v}_y(t)|\tau}\right) \quad 3.329$$

A continuación se expone el esquema del algoritmo incremental iterativo desarrollado e implementado en Matlab con el cual se ha modelización el tiro parabólico de las gotas eyectadas:



**Figura 225:** Esquema del algoritmo incremental iterativo desarrollado [Fuente: Elaboración propia].

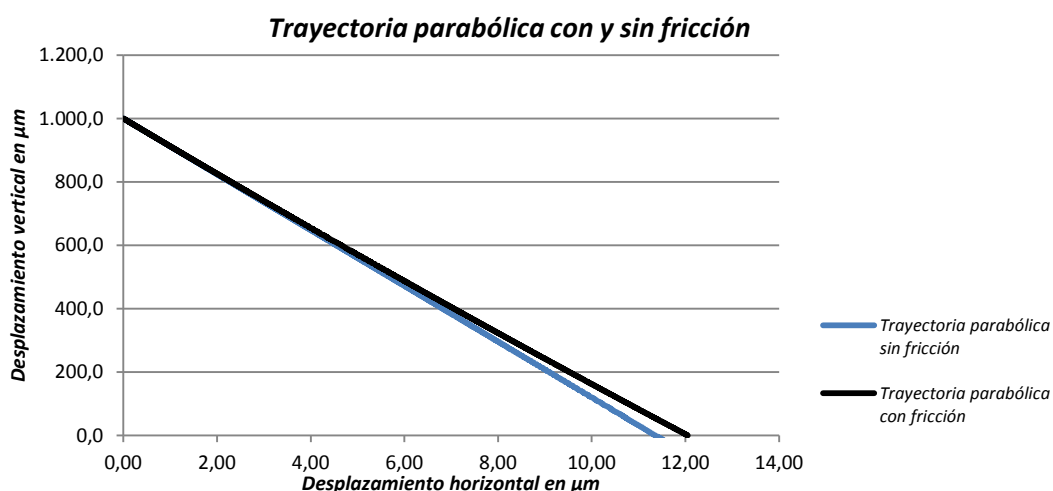
De manera que, como puede apreciarse a través del esquema de la figura anterior, partimos de las condiciones iniciales siguientes; a  $t = 0$  nos encontramos ubicados en  $(0, Y_{gap})$  con una velocidad de  $(V_{0X}, V_{0Y})$ , posteriormente introducimos el concepto de incremento  $(i = 1, \dots, n$  donde  $n \in \mathbb{Z}^+$ ) discretizando la distancia vertical entre los nozzles del cartucho y el sustrato. De modo que, establecemos un incremento vertical de dimensión  $\Delta Y$  tal que  $n$  sea un entero positivo del cociente  $n = Y_{gap}/\Delta Y$ . Así pues, mientras  $i \leq n$  el algoritmo

procede a iterar. Sino, significa que nos encontramos sobre el sustrato y por tanto la trayectoria ha concluido.

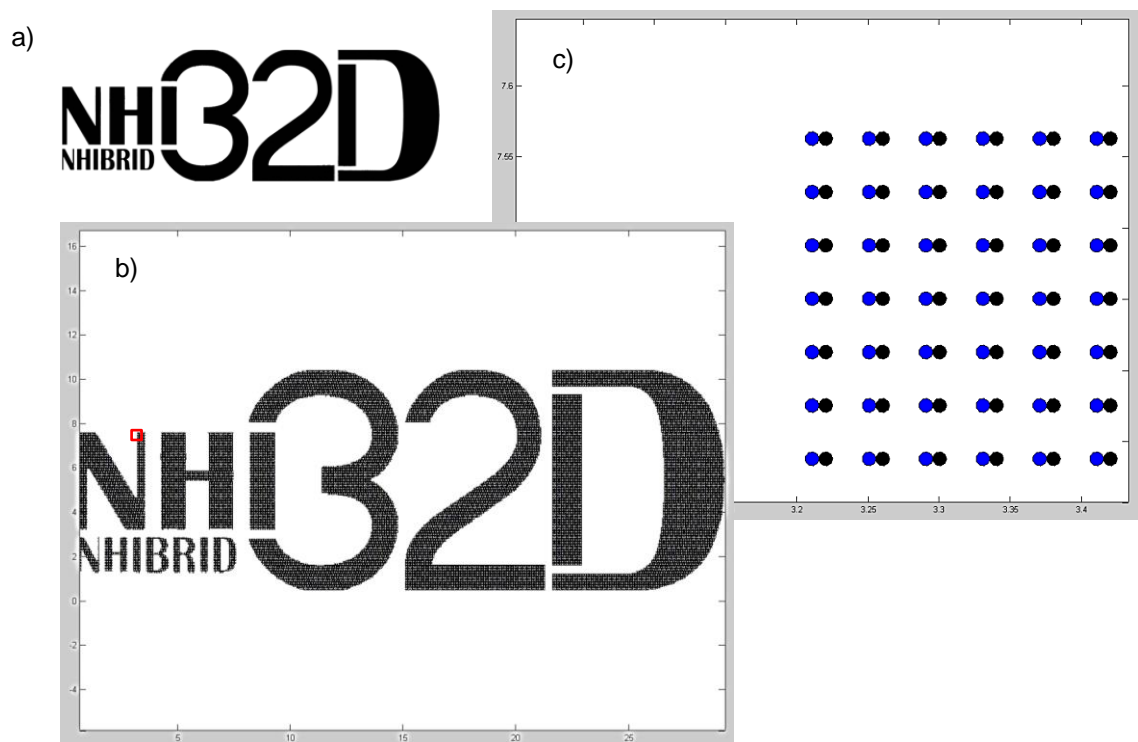
De forma que, en un primer incremento vertical sabemos las condiciones en la posición  $(0, Y_{gap})$  y buscamos conocer las condiciones finales en  $(X_{1j}, Y_{1j})$ . Así partiendo de la suposición donde la velocidad final vertical de la gota ( $V_Y$ ) del incremento  $i = 1$  es  $V_{0Y}$  (de la iteración  $j = 0$ ), procedemos a calcular el número adimensional de Reynolds y con él, la  $K_{ij}$  correspondiente dentro del intervalo al que pertenezca de la gráfica mostrada en la Figura 223, y finalmente a través de éstos el tiempo transcurrido ( $t_{1j}$ ) y la posición y velocidad final de la gota dentro de dicho intervalo.

Mientras exista una diferencia mayor o igual a 0,001 entre el número de Reynolds de dos iteraciones consecutivas (criterio de convergencia) el algoritmo no dejará de hacer iteraciones ajustando los valores de  $R_{e1,j}$ ,  $K_{1,j}$  y con ellos  $t_{1j}$ ,  $X_{1j}$ ,  $Y_{1j}$ ,  $V_{X1j}$ ,  $V_{Y1j}$ . Así una vez satisfecho el criterio de convergencia el algoritmo procederá a realizar un nuevo incremento vertical hasta que  $i > n$  y de este modo, concluir la modelización de la trayectoria descrita por las gotas mediante un conjunto de  $n$  puntos discretos equiespaciados verticalmente.

Así pues, mediante la implementación del algoritmo anterior en la herramienta matemática Matlab a continuación se representa la trayectoria descrita por una gota de 10 pL de tinta ANP silverjet DGP HRA eyectadas por un cartucho FUJIFILM modelo Dimatix DMC-11610 a una temperatura de 37,55°C través de los nozzle de 21  $\mu\text{m}$  de diámetro en una atmosfera de aire en condiciones normales, con una velocidad estimada de 4,4 m/s y donde el desplazamiento unidireccional del carro de impresión se lleva a cabo a 50 mm/s, situando los nozzles de éste a una distancia vertical respecto del sustrato de 1mm.



**Figura 226:** Comparación entre la trayectoria desarrollada por una gota eyectada despreciando la oposición al desplazamiento que presenta el aire y bajo las mismas condiciones teniendo en cuenta la fricción del mismo con ésta [Fuente: Elaboración propia].



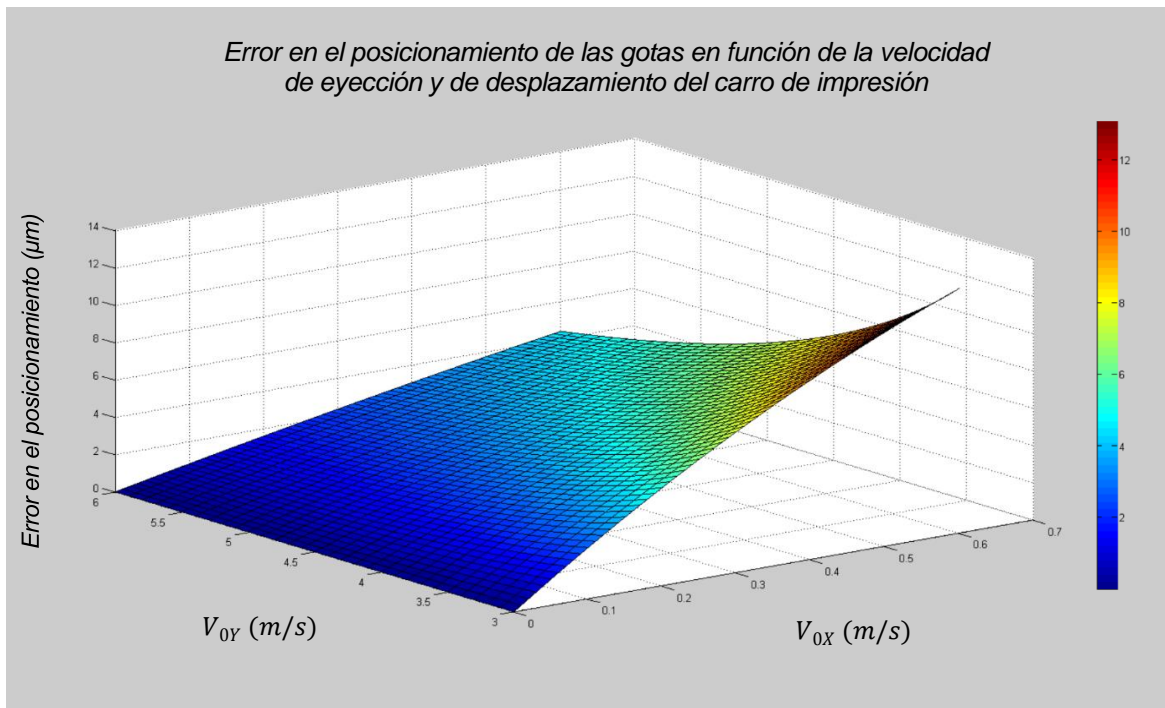
**Figura 227:** Patrón digital a reproducir (a) y representación en negro del mismo mediante la superposición de gotas depositadas a voluntad en una ubicación concreta sobre del plano de impresión sin la compensación del error y solapada a ésta la misma en azul pero con el desfase corregido introducido por la fricción del aire (b) y detalle ampliado de una zona de la misma (c) [Fuente: Elaboración propia].

Como puede apreciarse en las imágenes precedentes bajo una condiciones de impresión constantes y con ello nos referimos a las velocidades, frecuencia de eyección, drop spacing en X e Y, diámetro de la huella, y altura del carro de impresión, la desaceleración que experimentan las gotas durante el recorrido que describen éstas hasta impactar con el sustrato, fruto del rozamiento con el aire modifica su trayectoria, lo cual en principio puesto que afectaría a todas por igual siempre que éstas fuesen iguales en volumen y del mismo material (en nuestro caso tinta de plata ANP silverjet DGP HRA), no modificaría el punto, línea, patrón o imagen a reproducir, aunque sí afectaría su posición (ver figura anterior). Se hace evidente por tanto que, en la coordinación del desplazamiento del carro de impresión en dirección al eje X y las señales eléctricas que accionan a los piezoeléctricos que generan la eyección de las gotas, debe existir una compensación y/o adelanto temporal de las mismas afín de corregir los  $0,69 \mu\text{m}$  de error que el aire produce (6,0768% del desplazamiento total en x experimentado por la gota) y de éste modo conseguir que las gotas impacten en la posición solicitada.

Así pues, mediante la modelización propuesta es posible ahora plantear cual es la evolución del error inducido por la ficción con el aire circundante en función de los parámetros de eyección, y en este sentido para una misma altura del carro de impresión respecto al

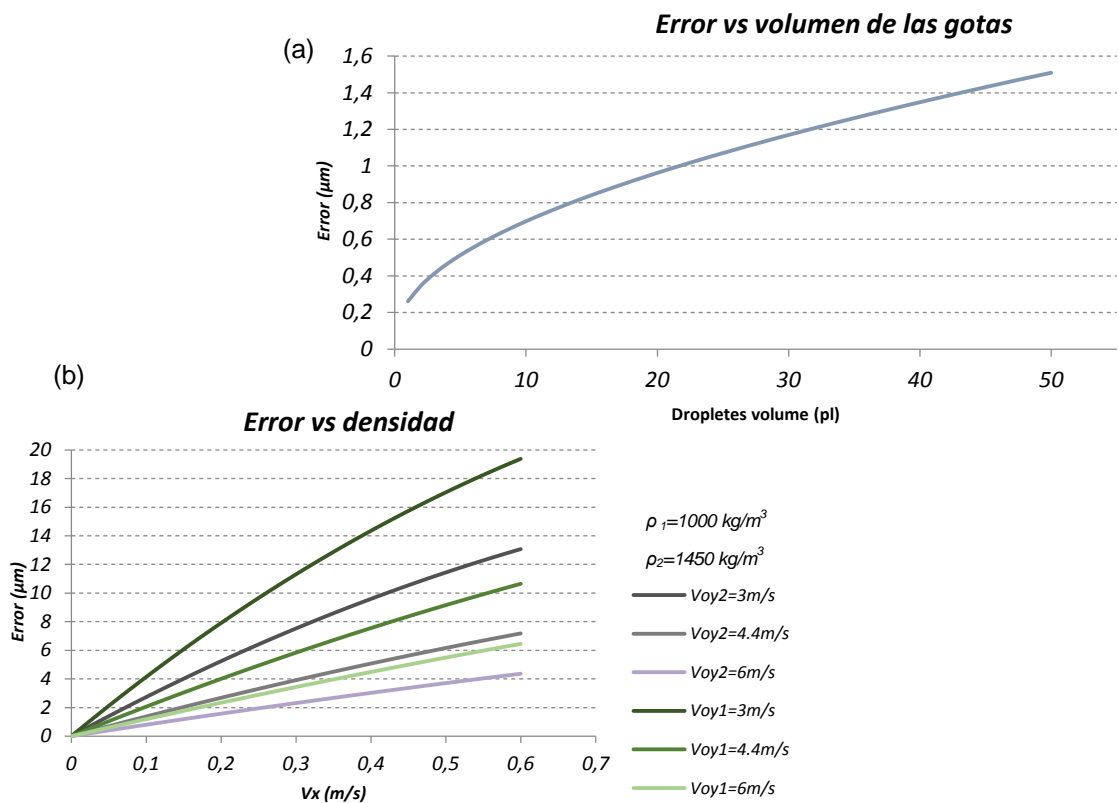
sustrato y fijado el volumen eyectado a 10 pL nos referimos a la velocidad de salida ( $V_{0X}, V_{0Y}$ ).

Manteniendo una proporción donde  $V_{0X} \ll V_{0Y}$  de manera que  $V_{0X}$  pueda ser despreciable, a continuación en la Figura 228 se expone la evolución del error para una velocidad de eyección ( $V_{0Y}$ ) de 3-6 mm/s (rango aproximado de salida de las gotas en sistemas Inkjet) y bajo la condición  $V_{0Y}/V_{0X} < 10$ .



**Figura 228:** Evolución del error inducido por la fricción de la gota con el aire durante el desarrollo de la trayectoria parabólica que esta describe en función de las velocidades de eyección [Fuente: Elaboración propia].

Como se puede apreciar en la figura anterior, a mayor velocidad de eyección menor error en el posicionamiento de las gotas mientras que, por otro lado, a mayor velocidad del carro de impresión mayor el error debido a la fricción por el aire siendo máximo el error ( $13,0734 \mu\text{m}$ ) bajo las condiciones de simulación establecidas en el punto donde las velocidades son 3 y 0,6 m/s respectivamente. Finalmente, como se puede apreciar en las gráficas de la Figura 229 de a continuación a medida que el tamaño de las gotas crece también lo hace el error ya que su superficie al ser mayor produce una mayor fricción lo que aumentar su desaceleración, por otra parte, la densidad de los fluidos (tintas) también juega un papel importante en la evolución del error siendo éste mayor a medida que la densidad del fluido decrezca.



**Figura 229:** Evolución del error en función del volumen eyectado bajo los parámetros de impresión establecidos Voy1, Vox1 a) y en función de la densidad del fluido empleado a diferentes condiciones de impresión b) [Fuente: Elaboración propia].

Por otro lado, cuando la reproducción del patrón deseado debe llevarse a cabo sobre un sustrato no plano, es decir, con una cierta inclinación  $\alpha$ , teniendo en cuenta que los parámetros de impresión son fijos; volumen y velocidad de las gotitas, y Drop spacing, siendo la velocidad del carro de impresión constante en la dirección de escaneo (eje x), el ajuste de la frecuencia de eyección debido a la inclinación del sustrato para mantener constante el Drop spacing (ver Figura 281), se ve afectada por la no linealidad del error a una distancia  $Y_{gap}$  variable y, por lo tanto, este algoritmo se puede usar para compensar esta variación, es decir:

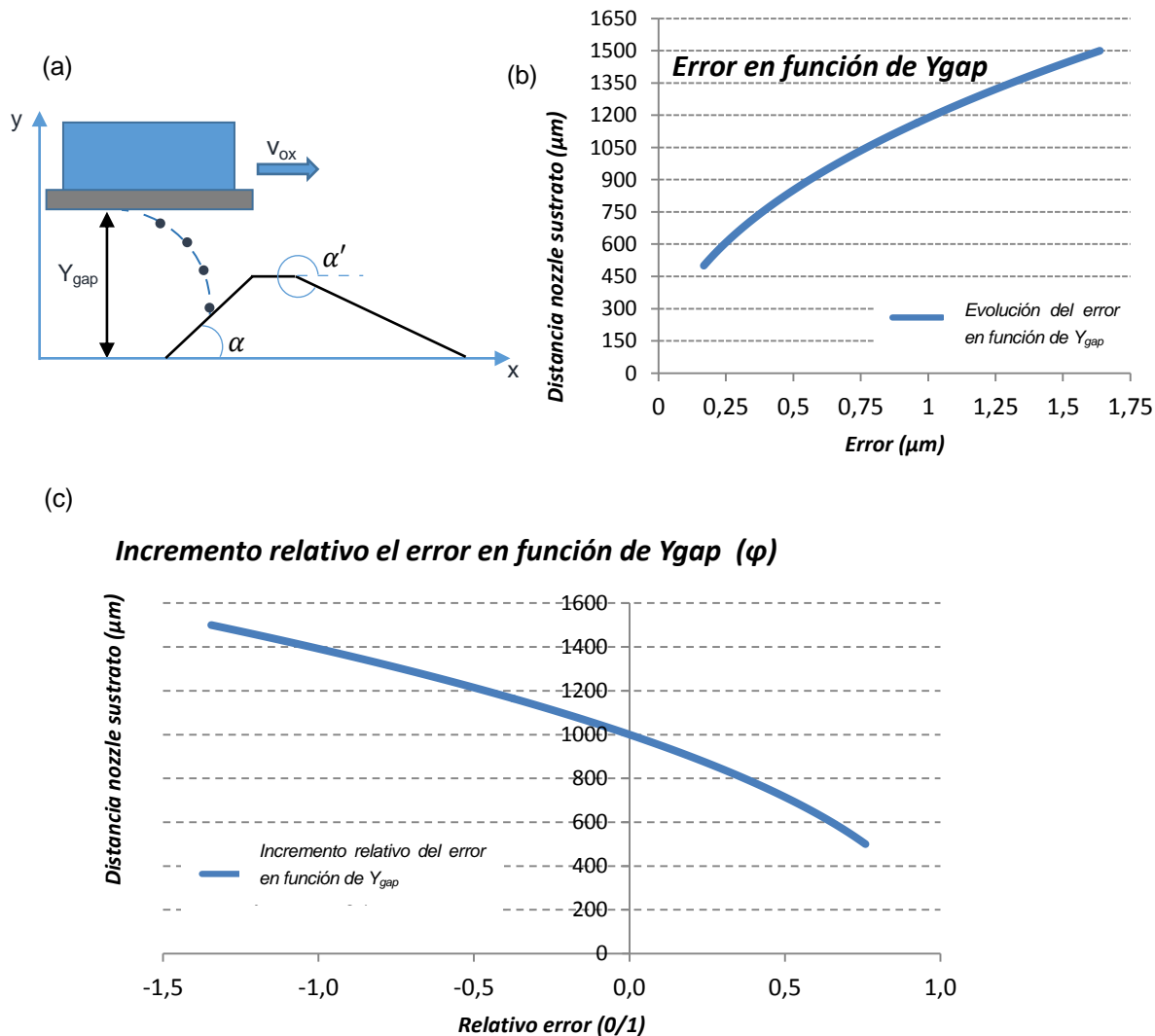
$$f(\alpha) = \frac{v_{OX}}{D_x \cos(\alpha)} \quad 3.330$$

Donde  $f$  representa la frecuencia de eyección como una función de la inclinación del sustrato y  $D_x$  el drop spacing deseado. De modo que, teniendo en cuenta la expresión anterior y que el  $Y_{gap}$  varía en la dirección de escaneo, lo que hace que la trayectoria y el tiempo de vuelo de las gotas aumenten o disminuyan el error cometido ( $\varepsilon = f(Y_{gap}, v_{OX}, v_{OY})$ ;  $Y_{gap} = f(x)$ ), mediante la fijación de los parámetros de impresión iniciales (velocidad de eyección y velocidad del carro), la frecuencia de eyección para reproducir el patrón con un Drop spacing fijo evoluciona a:

3. 331

$$f = \frac{1}{(1 - \varphi)T \cos(\alpha)} ; \quad \varphi = \frac{\Delta\varepsilon(\Delta Y_{gap})}{\varepsilon_0}$$

Donde  $T$  representa el período (tiempo transcurrido entre dos eyecciones consecutivas) y  $\varepsilon_0$ ,  $\Delta Y_{gap}$ ,  $\varphi$  el error inicial considerado en el posicionamiento de las gotitas, el incremento de la distancia vertical entre el nozzle activo y el sustrato relativo a un Drop spacing  $D_x$  fijo y el parámetro de ajuste del error debido a la variación de  $Y_{gap}$ . Por lo tanto, cuando  $\alpha > \pi/2$  el período se ve reducido incrementando la frecuencia de eyección pero, como consecuencia de la fricción del aire, el error inicial debe reducirse también. Por otro lado, cuando  $\alpha < 3\pi/2$  la frecuencia debe ser incrementada también pero, debido a la fricción el error considerado al principio debe ser aumentado. En la figura de a continuación se expone la evolución del error como consecuencia de la evolución del  $Y_{gap}$ .



**Figura 230:** Representación esquemática del carro donde se alojan los cartuchos que se mueven en la dirección de escaneado (eje x) eyectando gotas sobre superficies no planas (a). Evolución del error en el posicionamiento de las gotas en función de la distancia entre

*una boquilla activa con el sustrato en las condiciones de impresión establecidas (b), y el parámetro de ajuste o incremento relativo del error ( $\varphi$ ) (c) [Fuente: Elaboración propia].*

A través del gráfico anterior (Figura 230b) es posible apreciar que a través del algoritmo incremental iterativo expuesto se ha podido comprobar que el error existe siempre que  $Y_{\text{gap}} > 0$ , y que se vuelve mayor a medida que la distancia entre la boquilla activa y el sustrato aumenta. Por otro lado, en el siguiente gráfico referenciado a un valor inicial (Figura 230c), se muestra la evolución del error relativo al error inicial ( $\varepsilon_0$ ) establecido a una distancia de 1 mm. Luego es posible apreciar que mientras la distancia entre la boquilla y el sustrato sea inferior a 1 mm  $\varphi$  adquiere valores negativos, de manera que el error es menor al inicialmente considerado, y por lo tanto, en rampas o sustratos de pendiente positiva de teniendo en cuenta la expresión 3.331 se debe aumentar la frecuencia debido a la inclinación, pero debido a la fricción con el aire, el error se reduce, por lo que se reduce el espaciado de las gotas, debiéndose compensar reduciendo dicha frecuencia de excitación. Del mismo modo, en el caso de pendientes negativas la frecuencia se aumenta doblemente; por un lado, debido a la inclinación y en el otro lado debido al aumento de  $Y_{\text{gap}}$  y en consecuencia por la fricción de las gotas con el aire.

Un control preciso de las trayectorias parabólicas descritas por las gotitas durante su etapa de vuelo podría permitir, en un sistema de impresión de frecuencia de eyección variable, reproducirse con mayor precisión y con un Drop spacing fijo los patrones sobre sustratos no planos, como por ejemplo en superficies de topografía discreta como la que se muestra en la Figura 281, cuyo sustrato se imprimió previamente en 3D por medio de un sistema MIP-SL y donde la distancia de las boquillas del cartucho de impresión varió a lo largo de su desplazamiento.

Por otra parte, de una manera más simple, mediante el ajuste digital del patrón que se va a reproducir en función de la realidad topográfica del sustrato, la impresión de dichos patrones se lleva a cabo en la actualidad satisfactoriamente, sin embargo, nuevamente el ajuste del error inducido por la fricción de las gotas con el aire debe tenerse en cuenta y compensarse para mejorar la calidad de la reproducción y es en este punto que se resalta nuevamente la utilidad del algoritmo incremental iterativo expuesto.

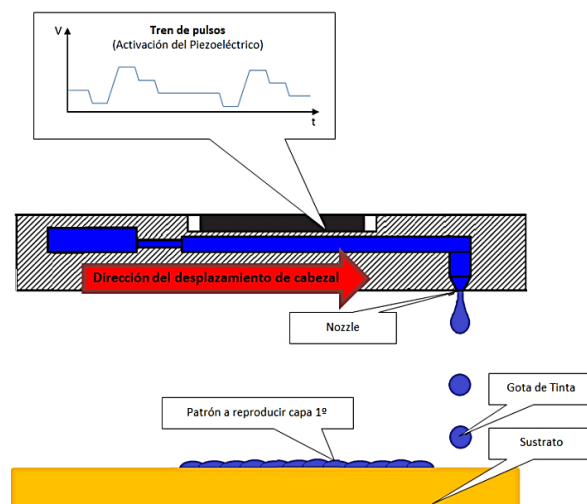


## 2.7. MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE CONTACTO DE LAS GOTAS CON EL SUBSTRATO

Como se ha podido comprobar en apartados precedentes la impresión por Inkjet es un método de donde se genera y depositan gotas sin tacto de forma controlada, precisa y secuenciada sobre un sustrato con el objetivo de reproducir puntos, líneas y patrones. Estos patrones eventualmente se convertirán en letras, gráficos o imágenes, y/o mediante la superposición de capas geometrías tridimensionales.

A sí pues, este apartado está dedicado a los conceptos básicos utilizados en las distintas teorías que modelizan y nos permiten comprender los fenómenos y mecanismos involucrados en el proceso de impacto y posterior interacción de las gotas con el sustrato.

Finalmente se plantea el modelo matemático en el cual se sustenta el control de la deposición de las gotas de tinta utilizado en el sistema de impresión híbrido multimaterial del presente trabajo de investigación. A través de dicho modelo establecemos las condiciones de funcionamiento del sistema Inkjet capaz de; mediante el uso de materiales funcionales reproducir patrones, cordones o pistas conductoras bidimensionales mediante la deposición controlada de gotas adyacentes y secuenciadas sobre un sustrato previamente impreso en tres dimensiones, teniendo en cuenta la reología de la tinta, el drop spacing, la velocidad de deposición, así como también la naturaleza y la afinidad de las gota con el sustrato.



**Figura 231:** Representación esquemática del proceso de impresión desde el punto de vista de la deposición de las gotas sobre el sustrato, afín de reproducir con estas las líneas y patrones deseados y mediante la superposición de capas geometrías tridimensionales

[Fuente: elaboración propia].

### 2.7.1.1. Conceptos básicos

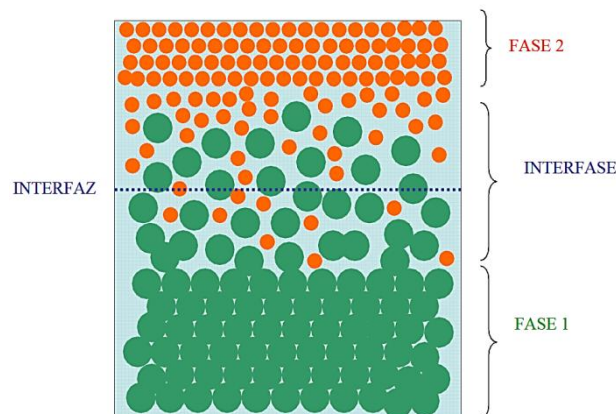
Pese a que el comienzo del estudio de los fenómenos asociados a la mojabilidad no puede datarse con exactitud, la teoría del mojado lleva puliéndose desde comienzos del siglo XIX, donde Thomas Young (1805) y Pierre-Simon Laplace (1806) establecieron las bases de la teoría clásica de la capilaridad explicando fenómenos como la aparición de los meniscos o la forma que adoptan las gotas de agua. A pesar de haber trascurrido desde entonces más de 200 años los fenómenos asociados con la capilaridad siguen siendo de notable interés en la actualidad, debido a que tienen cabida en una gran cantidad de aplicaciones prácticas en multitud de campos, desde la biología y la biomedicina, pasando por agricultura y la ciencia de materiales hasta el diseño de parabrisas, la microfluídica, el mundo textil, las pinturas, los recubrimientos o la impresión tanto en 2D como en 3D.

Si bien el impacto y esparcimiento de las gotas ha sido profundamente estudiado a lo largo de los años todavía hoy el entendimiento completo de todos los fenómenos y mecanismos involucrados en el proceso de impacto y posterior interacción con el sustrato no es completo y de hecho es una fuente constante de investigación ya que son muchas las aproximaciones en esta materia, válidas en algunos contextos, pero imprecisas en otros. Parece paradójico, que algo tan aparentemente simple como una gota depositada sobre una superficie puede generar tantas dificultades y controversias. Como explicación de su fenomenología basta con que hagamos la prueba de esparcir un líquido sobre una superficie y así comprobar que aquella expresión frecuentemente empleada al comprobar dos personas u objetos que nos resultan idénticos: “como dos gotas de agua”, no puede ser más desafortunada cuando se trata de gotas depositados sobre superficies reales. La clave de ello se encuentra en lo lejano que están de la realidad los modelos ideales del mojado.

La magnitud más importante es el ángulo de contacto. Definido como el ángulo que forma la tangente a la interfaz líquido-fluido con el sólido, en el punto de contacto de las tres fases, hacia el lado de la fase líquida. Pese a lo intuitivo de su definición y pese a su relativamente fácil obtención experimental, es una magnitud muy poco reproducible y nos vemos obligados a definir diferentes ángulos de contacto sobre un mismo sistema, como se podrá ver en más adelante (ángulo intrínseco, de avance, de retroceso, de equilibrio, local, aparente, etc.). De todos estos ángulos el más importante por su significado físico, pero desafortunadamente el más difícilmente accesible, es el ángulo de equilibrio. A comienzos del siglo XX, Cassie y Wenzel dedujeron las relaciones entre los ángulos de equilibrio del sistema con las propiedades químicas y topográficas de superficies lisas y heterogéneas, y superficies rugosas y homogéneas, respectivamente. Hoy día, a principios del siglo XXI, existe controversia a la hora de identificar el margen de aplicabilidad de estas relaciones [257].

Antes de exponer las ecuaciones básicas de la termodinámica de superficies e interfases, es necesario hacer una descripción del sistema que nos concierne, así como de algunos conceptos básicos.

El sistema de mojado, se define como un sistema termodinámico compuesto por tres fases; Una fase fluida (líquido o vapor), una fase líquida y una fase sólida. La región de separación entre cada una de las fases recibe el nombre de interfase y tradicionalmente por simplicidad es considerada como una superficie. Sin embargo, la realidad es que en la naturaleza no existen discontinuidades y la transición entre diferentes fases es algo gradual, por lo que estrictamente la interfase debe tratarse como una región de transición continua no discreta de un espesor de varias moléculas. La superficie escogida para describir la ubicación de la interfase recibe el nombre de interfaz o superficie de Gibbs (Figura 232). Por tanto, a partir de ahora nos referiremos a una interfaz como la superficie imaginaria de separación entre dos fases y a interfase como la región tridimensional de transición entre dos fases.



**Figura 232:** Representación esquemática de una interfase y una interfaz [257].

La termodinámica de Interfases es la rama de la física que estudia los fenómenos macroscópicos de equilibrio localizados en interfaces. Dentro de esta disciplina destacan la capilaridad y el mojado. La capilaridad es una propiedad de los líquidos, la cual depende de la tensión superficial y esta desde la cohesión del líquido, que cuando es menor a la adhesión del líquido al material de un tubo (existe mojado) se produce la ascensión del líquido por el tubo. En cuanto al mojado es un fenómeno interfacial asociado a la adhesión del líquido a un sustrato el cual tiene lugar en un sistema termodinámico de tres fases.

La existencia de esas interfaces es algo desfavorable desde el punto de vista energético y es por ello que siempre existe una tendencia a disminuir la extensión de esa interfaz, es decir su área interfacial en la medida de lo posible. La justificación de ello es la existencia de un exceso de energía almacenada en las interfases. Esa tendencia a disminuir el área de la interfaz no es otra cosa que la respuesta del sistema termodinámico a disminuir su energía libre (potencial termodinámico que depende del potencial químico, la presión y la temperatura). A esta energía se le conoce como energía libre superficial o interfacial [258] y

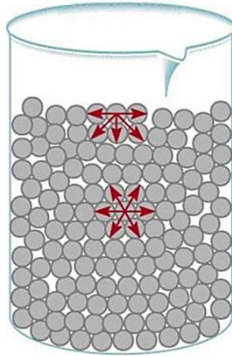
se mide en  $\text{J/m}^2$  (S.I.), por lo que estrictamente, es una densidad superficial de energía y por tanto se define como la energía almacenada por unidad de área en una interfaz.

A menudo solemos confundir los términos de energía superficial con tensión superficial o interfacial, dicho términos pese a que poseen las mismas unidades representan conceptos distintos y no hacen referencia a la misma magnitud física, sin embargo son magnitudes que a menudo se emplean indistintamente en la literatura.

La tensión superficial es un tensor que actúa perpendicularmente a la superficie y es una fuerza por unidad de longitud. La energía superficial es un escalar (no direccional) y representa la energía por unidad de superficie almacenada en la interfaz. Cuando se hace referencia a interfases fluidas o interfases flexibles es más empleado el término de tensión superficial/interfacial, mientras que para interfases rígidas, que son las que tienen lugar cuando una de las fases es sólida, se emplea el término de energía superficial/interfacial. Esto es debido a que la tensión interfacial es entendida como la mencionada respuesta del sistema a minimizar el área interfacial. Cuando una determinada interfaz fluida o flexible aumenta su área, aparece una fuerza recuperadora que tiende a contrarrestar ese aumento de área y correspondiente aumento de energía libre. Esta disminución de área no tiene lugar en las interfaces rígidas y por esta razón, no se aplica el término de tensión interfacial sobre tales interfases. Pero esto no quiere decir que no haya un exceso de energía acumulado en la misma. Las unidades de la tensión superficial/interfacial son  $\text{N/m}$  (S.I.) y corresponde con la fuerza por unidad de longitud ejercida sobre la interfaz. Si observamos, las unidades son equivalentes a las de la energía interfacial, de ahí la confusión. El trabajo realizado por la tensión interfacial coincide con el aumento de la energía libre del sistema al aumentar su área interfacial. Con objeto de ser rigurosos, nos referiremos en adelante a la energía interfacial con el símbolo  $\sigma$  y a la tensión interfacial con el símbolo  $\gamma$ .

El origen de la energía interfacial puede entenderse desde el punto de vista microscópico y ésta se debe a la energía potencial que las moléculas más próximas a la superficie poseen como consecuencia de las fuerzas de cohesión con sus vecinas. Las moléculas expuestas al exterior carecen de la estaticidad que poseen las moléculas internas provista de un balance de fuerzas cohesivas teniendo por tanto un desbalance que fomenta la reconfiguración de dicha sustancia en busca de la minimización de la energía libre. Es decir, imaginemos una molécula de un determinado fluido (Figura 233), esa molécula experimenta una interacción atractiva por parte de sus vecinas. Por isotropía, si la partícula está situada lo suficientemente lejos de la superficie, experimenta una fuerza neta igual a cero puesto que encuentra vecinas próximas en todas las direcciones del espacio. Sin embargo, si la molécula está situada cerca de la superficie sí existe una fuerza neta, ya que encontramos una distribución anisótropa de moléculas vecinas. Esta fuerza neta es la que retiene a la partícula hacia el seno del líquido (tensión superficial). Desde el punto de vista energético, como consecuencia de esta fuerza neta, las moléculas en el seno del fluido tienen menos energía potencial de interacción que las situadas en las cercanías de la superficie del fluido.

Ese exceso de energía es la mencionada energía interfacial. Si separamos dos moléculas vecinas situadas en la interfase, una molécula del seno del fluido vendrá a ocupar el hueco creado entre ambas, de forma que esa nueva molécula aumenta su energía potencial. Consecuentemente, es fácil deducir que un aumento de área interfacial implica un aumento de la energía total del sistema, algo desfavorable desde el punto de vista termodinámico.

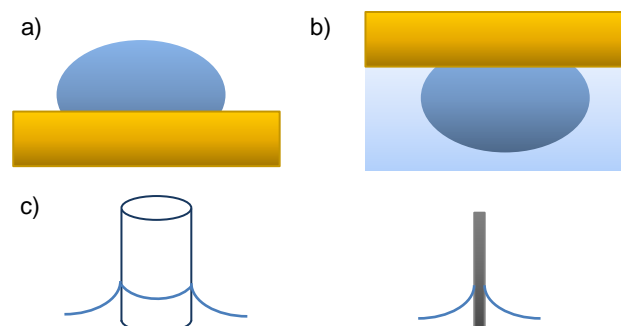


**Figura 233:** Interpretación microscópica de la tensión/energía interfacial

[Fuente: elaboración propia].

La influencia de la tensión interfacial en la forma de las interfaces depende del estado fisicoquímico de cada componente. La tensión interfacial no afecta de la misma forma a las interfaces sólido-líquido o sólido-fluido, que a las interfaces líquido-fluido puesto que estas últimas son más fácilmente deformables. Esto explica que la forma habitual en ausencia de campos externos de una interfaz líquido-fluido sea la esférica. La tensión interfacial tiende a minimizar la relación área-volumen, y la superficie de mínima área que encierra el mayor volumen es la esfera. Además, también es cierto que cuanto mayor sea el tamaño de dicha esfera, menor será esa relación área-volumen.

Los modelos interfaciales clásicos del mojado son la gota sésil, la burbuja cautiva y los meniscos líquidos (Figura 234). Estos modelos corresponden con los sistemas experimentales convencionales empleados para la medida de ángulo de contacto.

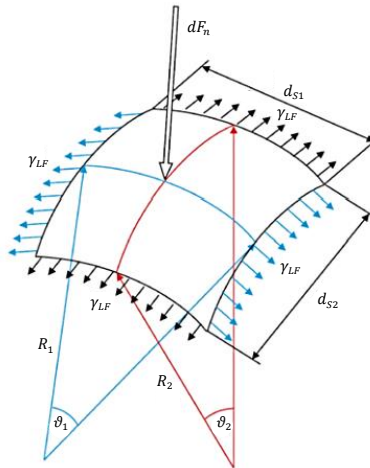


**Figura 234:** Sistemas clásicos de mojado: a) Gota sésil b) Burbuja cautiva y c) Meniscos líquidos [Fuente: Elaboración propia].

### 2.7.1.2. Ecuación de Young-Laplace

Como ya se ha comentado Thomas Young [259] y Pierre Simon Laplace [260] dedujeron a principios del siglo XIX y de forma independiente la relación existente entre la diferencia de presiones a ambos lados de una interfaz y su forma geométrica. Young fue el primero que enunció dicha ley, pero sin darle el suficiente formalismo matemático, algo que sí hizo Laplace poco después. Por esta razón hoy día esta ley es conocida como ecuación de Young-Laplace [261].

La ley de Young-Laplace nos dice que la diferencia de presiones ( $\Delta P$ ) a ambos lados de un punto de la interfaz es proporcional a la semisuma de las inversas de los radios principales de curvatura ( $R_1, R_2$ ) multiplicada por una constante la cual representa la tensión interfacial o superficial ( $\gamma_{LF}$ ), es decir;



**Figura 235:** Esbozo para la deducción de la presión capilar, donde la fuerza normal a la superficie se representa como  $dF_n$ , la tensión superficial  $\gamma_{LF}$ , los ángulos de curvatura  $\vartheta_1$  y  $\vartheta_2$ , los radios de curvatura  $R_1$  y  $R_2$  y las longitudes laterales  $d_{S1}$  y  $d_{S2}$

[Fuente: Elaboración propia].

$$dF_n = \Delta P_{cap} \cdot d_{S1} \cdot d_{S2} = \gamma_{LF} \cdot d_{S2} \cdot \vartheta_1 + \gamma_{LF} \cdot d_{S1} \cdot \vartheta_2 \quad 3.332$$

Donde ambos ángulos de curvatura se definen como:

$$\vartheta_1 = \frac{d_{S1}}{R_1} \quad ; \quad \vartheta_2 = \frac{d_{S2}}{R_2} \quad 3.333$$

De forma que mediante la combinación de las expresiones anteriores (3.332 y 3.333) la presión capilar se define mediante la ecuación de Young-Laplace como:

$$\Delta P = \gamma_{LF} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad 3.334$$

Por otra parte en el caso de encontrarnos ante una gota esférica rodeada de un fluido, la ecuación anterior puede deducirse mediante un balance energético donde teniendo en

cuenta que el trabajo ( $W$ ) necesario para aumentar el volumen desde un radio  $r$  a un radio  $R$  donde  $R = r + dr$ , podemos mediante el establecimiento de equilibrio mecánico que:

$$\partial W = \partial W_i + \partial W_e + \partial W_s = 0 \quad 3. 335$$

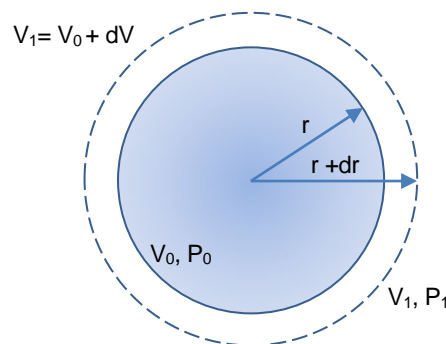
Donde  $W_i$  es el trabajo interno debido al aumento de volumen,  $W_e$  es el trabajo externo debido a la disminución del volumen y  $W_s$  es el trabajo correspondiente al aumento de la superficie de la interfaz, pudiéndose expresarse como:

$$\partial W_i = -P_0 \cdot \partial V_0 \quad 3. 304$$

$$\partial W_e = -P_1 \cdot -(\partial V_1) \quad 3. 305$$

$$\partial W_s = \sigma \cdot \partial S \quad 3. 306$$

Donde  $S$  es el área de la superficie interfacial y  $V_0$  es el volumen inicial y por tanto para una esfera  $\partial S = 4\pi r \partial r$  y  $\partial V_0 = 4\pi r^2 \partial r$ .



**Figura 236:** Esquema de una gota de líquido inmersa en un fluido; inicialmente, de radio  $r$  y área superficial  $S_0$  que tras un aumento de su radio en una cantidad  $d_r$ , le corresponde con una nueva área superficial  $S_1$  y una presión  $P_1$  [Fuente: Elaboración propia].

Sustituyendo las ecuaciones 3. 304, 3. 305 y 3. 306 en la ecuación 3. 335 y estableciendo que el estado de equilibrio se encuentra en el volumen inicial  $V_0$  tenemos:

$$(-P_0 \cdot 4\pi r^2 \partial r) + (P_1 \cdot 4\pi r^2 \partial r) + (\sigma \cdot 4\pi r \partial r) = 0$$

Reordenando la ecuación anterior:

$$\Delta P = P_0 - P_1 = \frac{2\sigma}{r_0} \quad 3. 303$$

De modo que, la diferencia entre la presión existente en el interior de una gota esférica ( $R_1 = R_2 = r_0$ ) y la presión del medio fluido que le rodea, es función del radio de la misma y su tensión superficial según la expresión alcanzada por Young y Laplace.

### 2.7.1.3. Ecuación de Young-Laplace en gravedad

En la realidad los fluidos se ven sometidos a distintos campos como es el caso del campo gravitatorio, el cual tiene una influencia directa en los fenómenos interfaciales. Por tanto, el

término  $\Delta P$  de la ecuación 3. 334 debe modificarse teniendo en cuenta la hidrostática, ya que la presión a ambos lados de cualquier interfaz se ven afectadas como consecuencia de la altura, así pues, dicha ecuación evoluciona a:

$$\Delta P(h) = \Delta P_0 - \Delta \rho g h = \gamma_{LF} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (z \leq 0) \quad 3. 336$$

Donde el término  $\Delta P_0$  representa la diferencia de presiones a ambos lados de la interfaz en un punto de referencia de altura  $z = 0$ , mientras que  $\Delta \rho$  es la diferencia de densidad entre el líquido y el fluido. La ecuación 3. 334 en términos de la curvatura media puede verse reescrita como:

$$H_z(x, y) = \frac{1}{2\gamma_{LF}} (\Delta P_0 - \Delta \rho g h(x, y)) \quad 3. 337$$

Donde  $H_z(x, y)$  representa la curvatura media de la superficie o interfaz descrita, a su vez el término  $\Delta P_0/2\gamma_{LF}$  representa la curvatura media pero referenciada al origen de altura cero, de forma que el radio medio de la misma  $r_0$  tal y como se ha expresado en 3. 335 se expresa de la manera siguiente:

$$\frac{1}{r_0} = \frac{\Delta P_0}{2\gamma_{LF}}$$

El segundo término de la ecuación 3. 337 puede reescribirse de manera más compacta a partir del concepto de longitud de capilaridad, definida a partir de todas las constantes físicas del sistema:

$$l_o = \sqrt{\frac{\gamma_{LF}}{\Delta \rho g}}$$

Esta magnitud es proporcional a la elevación que sufre un menisco en contacto con una superficie. Por tanto, la ecuación 3. 337 puede escribirse como:

$$H_z = \frac{1}{r_0} - \frac{z}{2l_o^2} \quad 3. 338$$

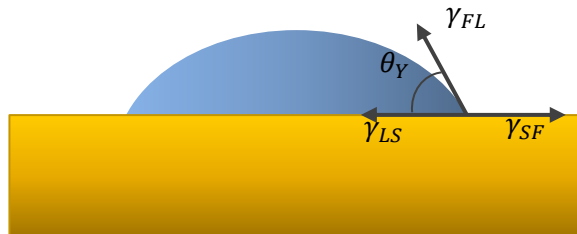
#### 2.7.1.4. Ecuación de Young (Mojabilidad)

Si observamos la naturaleza nos damos cuenta que un mismo líquido no se comportan de la misma manera al entrar en contacto con sólidos diferentes o al contrario y, dicho de otra manera, un sólido no se mojan de la misma forma ante distintos líquidos. La rama de la Termodinámica de Interfases que estudia la afinidad de los líquidos a los sólidos es el Mojado.

La mojabilidad es la capacidad que tiene un líquido de extenderse y dejar una traza sobre un sólido. Dicha propiedad depende de las fuerzas intermoleculares de las sustancias en



contacto y la magnitud física accesible experimentalmente relacionada con la mojabilidad, es el ángulo de contacto.



**Figura 237:** Ángulo de contacto y tensiones interfaciales representadas vectorialmente de donde se deduce la ecuación de Young [Fuente: Elaboración propia].

En sistemas de tres fases, las ecuaciones de capilaridad y de mojado están íntimamente relacionadas por lo que no es casualidad que fuera el mismo físico; Thomas Young [259], el que enunciara la ecuación básica de mojado. La ecuación de Young relaciona dicho ángulo de contacto con las tensiones interfaciales del sistema de mojado y se expresa como:

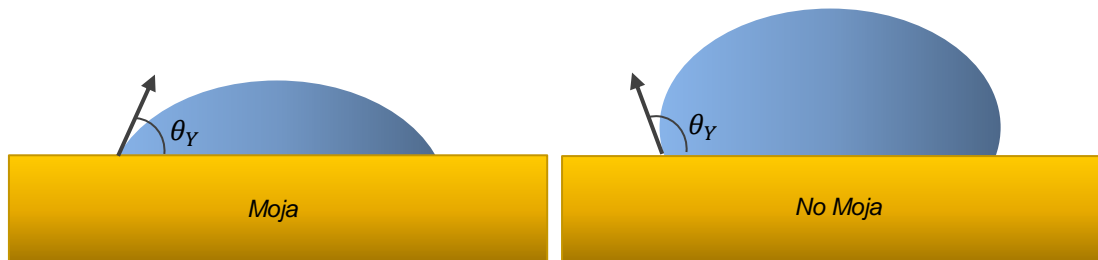
$$\gamma_{SF} - \gamma_{FL} \cos(\theta_Y) - \gamma_{LS} = 0 \quad 3.339$$

Donde  $\gamma_{SF}$ ,  $\gamma_{LS}$ ,  $\gamma_{FL}$ , son las tensiones interfaciales sólido-fluido, líquido-sólido y fluido-líquido respectivamente y  $\theta_Y$  es el ángulo de Young.

A diferencia de la ecuación de Young-Laplace 3.336, la ecuación de Young es invariante en presencia de gravedad Marmur 2006 [262]. El ángulo de contacto sólo depende de las propiedades fisicoquímicas de las tres fases, mientras que la gravedad, como vimos en la sección anterior, sólo afecta a la forma de la interfaz líquido-fluido relativamente lejos de la línea de contacto.

Mediante la ecuación de Young podemos saber si un líquido moja o no una superficie. En la Figura 238 se muestra ambas situaciones. Así la mojabilidad ( $\mu$ ) de una superficie por parte de un fluido se establece por el siguiente criterio; si el ángulo de contacto  $\theta_Y < \pi/2$ , decimos que el líquido moja y por tanto nos encontramos ante una superficie hidrófila en caso de ser agua el fluido, su mojabilidad será definida como  $\mu > 0$ . En el caso contrario, si el ángulo de contacto  $\theta_Y > \pi/2$ , decimos que el líquido no moja y por tanto nos encontramos ante una superficie hidrófoba, cuya mojabilidad  $\mu < 0$ . La mojabilidad viene definida por la expresión siguiente:

$$\mu = \cos(\theta_Y) = \frac{\gamma_{SF} - \gamma_{LS}}{\gamma_{FL}} \quad 3.340$$



**Figura 238:** Representación de las superficies hidrófilas con  $\theta_Y < 90^\circ$  y superficies hidrófobas  $\theta_Y > 90^\circ$  [Fuente: elaboración propia].

Por desgracia, la ecuación de Young es una ecuación válida exclusivamente para superficies ideales que por definición, son superficies lisas, homogéneas, no porosas, rígidas y químicamente inertes. Una superficie de estas propiedades no existe en la naturaleza, por lo que la ecuación de Young no es válida para superficies reales y por tanto el ángulo de Young es un ángulo inaccesible experimentalmente. Es por esta razón, por la que a este ángulo en ocasiones se le denomina como ángulo de contacto ideal. Con esta aclaración, no se pretende restar importancia a la ecuación, pues su trascendencia es incuestionable. Muchos estudios de mojado surgidos a partir de la presentación de esta ecuación buscan solventar las limitaciones que presenta.

### 2.7.1.5. Capilaridad, adhesión, Cohesión y coeficiente de expansión

La capilaridad es una propiedad de los líquidos que depende de su tensión superficial (la cual, a su vez, depende de la cohesión o fuerza intermolecular del líquido), que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar.

Cuando un líquido sube por un tubo capilar, es debido a que las fuerzas intermoleculares adhesivas entre el líquido y el sólido son más fuertes que las fuerzas intermoleculares cohesivas del líquido. Esto causa que el menisco tenga una forma cóncava cuando el líquido está en contacto con una superficie vertical, por tanto, moja a éste mostrando un ángulo de contacto menor a  $90^\circ$ . Este es el mismo efecto que causa que materiales porosos absorban líquidos.

#### Ley de Jurin

La ley de Jurin define la altura que se alcanza cuando se equilibra el peso de la columna de líquido y la fuerza de ascensión por capilaridad, dicha ley se deduce a partir de la condición de equilibrio:

$$\sum F = 0$$

donde la componente vertical de la fuerza es debida a la tensión superficial o interfacial y es:

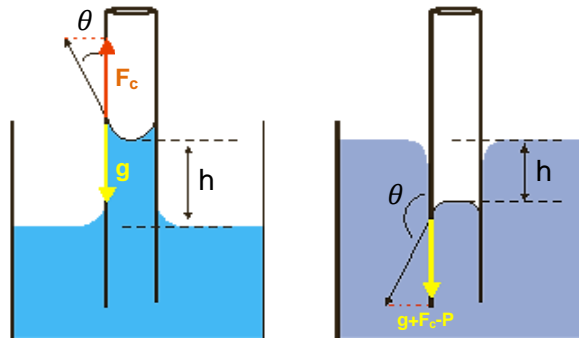
$$F_Y = (2\pi r)\gamma \cdot \cos(\theta_Y) \quad \uparrow \quad 3.341$$

y el peso de la columna es definible como:

$$F_Y = \rho g h \cdot (\pi r^2) \quad \downarrow \quad 3.342$$

Al establecer la condición de equilibrio, sustituyendo las ecuaciones anteriores y reagrupando obtenemos la expresión que define la altura alcanzable por un líquido por capilaridad (ley de Jurin):

$$H = \frac{2\gamma \cos(\theta_Y)}{\rho g r} \quad 3.343$$



**Figura 239:** Representación de la ascensión capilar, fluidos que mojan agua por ejemplo (a), fluidos que no mojan por ejemplo el mercurio (b) [Fuente: elaboración propia].

Como se ha podido apreciar en la figura anterior, cuando un líquido moja una superficie, es decir cuando las fuerzas de adhesión (líquido-sólido) son mayores que las fuerzas de cohesión (líquido-líquido) y por tanto su ángulo de contacto es menor que  $90^\circ$ , el fluido asciende por capilaridad dentro del tubo. Antes de continuar se ha creído oportuno repasar los conceptos de cohesión y adhesión a fin de aportar claridad.

### Adhesión y cohesión

La adhesión es una propiedad de la materia la cual permite que dos sustancias permanezcan unidas cuando entran en contacto, existen cinco mecanismos que explican porque un material se adhiere a otro estos son:

**Adhesión mecánica:** donde los materiales adhesivos rellenan los huecos o poros de las superficies manteniendo las superficies unidas por enclavamiento.

**Adhesión química:** se produce cuando los átomos de la interfaz de dos superficies separadas forman enlaces iónicos, covalentes o enlaces de hidrógeno.

**Adhesión dispersiva:** este mecanismo de adhesión se fundamenta en las fuerzas intermoleculares o fuerzas de van der Waals, en la ciencia de superficies el término adhesión siempre suele hacer alusión a este mecanismo.

**Adhesión electrostática:** Algunos materiales conductores dejan pasar electrones formando una diferencia de potencial al unirse creando una fuerza electrostática atractiva entre materiales.

Adhesión difusiva: este fenómeno se produce cuando las moléculas de ambas fases penetran o difunden en la superficie adyacente sin dejar de estar unido a su fase de origen, este mecanismo también ocurre en la sinterización, donde los átomos difunden de una partícula a otra hasta logra una mayor homogeneización.

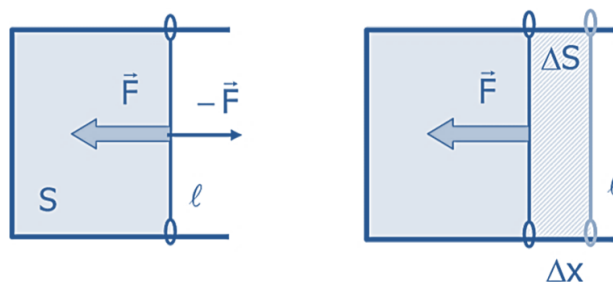
La cohesión en cambio es distinta de la adhesión. La cohesión es la fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo dependiendo únicamente la naturaleza del mismo, mientras que la adhesión es fruto de la interacción entre las superficies de distintos cuerpos.

La cuantificación de la fuerza de cohesión puede definirse conceptualmente través de la tensión interfacial como:

$$F_{coh} = 2\gamma l \quad 3.344$$

donde  $l$  representa la longitud de las interfacial (Figura 240) y el factor de dos representa los dos lados de la interfase, así el trabajo de cohesión puede definirse como:

$$W_{coh} = 2\gamma l \cdot \Delta x = 2\gamma \Delta S \quad 3.345$$



**Figura 240:** Representación de las fuerzas de cohesión [Fuente: elaboración propia].

En este apartado se evidencia claramente porque las gotas tienden a minimizar su superficie haciéndose esféricas, ya que las fuerzas cohesivas de los líquidos son superiores a la de los gases y por tanto las gotas en busca del equilibrio minimizan la energía libre reduciendo su área expuesta al entorno.

Por otro lado, habiendo definido la adherencia como la atracción mutua entre las superficies de dos cuerpos opuestos en contacto, el trabajo de adhesión por unidad de superficie puede definirse como el trabajo necesario para separar dos fases A y B en presencia de una tercera C. En la separación de la fase A-B generaremos nuevas interfaces como son AC y BC de manera que el balance energético por unidad de área del proceso puede ser expresado como:

$$W_{Adh} = \gamma_{AC} + \gamma_{BC} - \gamma_{AB} \quad 3.346$$

En el caso que nos ocupa, el trabajo de adhesión en un sistema de mojado se define como el trabajo necesario para separar la fase líquida de la fase sólida por lo que en este caso la ecuación anterior puede expresarse como:

$$w_{Adh}^{LS} = \gamma_{SF} + \gamma_{FL} - \gamma_{LS} \quad 3. 347$$

que haciendo uso de la ecuación de Young 3. 339 obtenemos la siguiente expresión también conocida como la de Young-Dupre:

$$w_{Adh}^{LS} = \gamma_{FL} \cdot (1 + \cos(\theta_Y)) \quad 3. 348$$

La ecuación anterior define el trabajo de adhesión por unidad de superficie necesario para separar el líquido de tensión superficial  $\gamma_{FL}$ , de una superficie sólida ideal de ángulo de Young  $\theta_Y$ . Esta expresión nuevamente es válida exclusivamente para superficies ideales. Lo que sí podemos observar, es que en todo sistema donde se tenga un líquido en contacto con un sólido en el seno de un fluido (gas), es necesario realizar un trabajo para separar ambas fases, independientemente del ángulo de contacto característico de dicho sistema (salvo para  $\theta_Y = 180^\circ$ ).

### Balance de energías y coeficiente de expansión

Supongamos un menisco que en ausencia de campos externos como el gravitatorio experimenta un desplazamiento infinitesimal y con él, una variación infinitesimal de la energía libre E del sistema:

$$\partial E = (\partial E^S + \partial E^L + \partial E^G) + (\partial E^{SF} + \partial E^{FL} + \partial E^{FS}) \quad 3. 349$$

Donde la suma contenida en el primer término hace referencia a las energías de las fases (Cohesión), y los superíndices S, L y F hacen referencia a las diferentes fases: sólida, líquida y fluida, respectivamente. Por otro lado, el segundo término hacer referencia a las energías interfaciales (adhesión), y los superíndices SF, FL, LS hacen referencia a las interfaces sólido-fluido, fluido-líquido y fluido-sólido. Si suponemos que no hay cambio en el número de moles ni en el volumen de cada una de las fases, se tiene:

$$\partial E = \sigma_{SF} \cdot \partial A^{SF} + \sigma_{FL} \cdot \partial A^{FL} + \sigma_{LS} \cdot \partial A^{LS} \quad 3. 350$$

Es decir, el incremento de energía libre se debe exclusivamente a la variación de cada una de las tres áreas interfaciales. Como el aumento de área seca coincide con la disminución de área mojada y se tiene que  $\partial A^{FL} = \partial A^{LS} \cos(\theta_Y)$ , podemos expresar:

$$\begin{cases} \partial A^{SF} = -\partial A^{AS} \\ \partial A^{FL} = \partial A^{LS} \cos(\theta_Y) \end{cases}$$

donde  $\theta_Y$  es el ángulo de contacto. Sustituyendo estos resultados en 3. 216 se llega a una expresión más compacta de la energía infinitesimal. La variación de energía libre a presión, volumen y temperatura constante puede expresarse de la forma:

$$\left. \frac{\partial E}{\partial A^{LS}} \right|_{P,V,T} = -\sigma_{SF} + \sigma_{FL} \cos(\theta_Y) + \sigma_{LS} \quad 3. 351$$

La condición de extremo (máximo o mínimo) en la energía libre, implica que la anterior derivada tiene que ser igual a 0, obteniéndose la ecuación análoga a la ecuación 3. 339, pero expresada en función de las energías interfaciales y no de las tensiones interfaciales [28].

$$\left. \frac{\partial E}{\partial A^{LS}} \right|_{P,V,T} = 0 \rightarrow \cos(\theta_Y) = \frac{\sigma_{SF} - \sigma_{LS}}{\sigma_{FL}}$$

Por otro lado, retomando el balance energético de la ecuación 3. 349 podemos decir que un desbalance entre las energías de cohesión y adhesión producirá, un cambio en la superficie interfacial y por tanto un trabajo, esto es:

$$E = -W_{coh} + W_{Adh} \quad 3. 352$$

Donde E representa la energía libre cedida por el sistema o el trabajo de la gota en su expansión y atendiendo a este criterio energéticamente el trabajo producido por las fuerzas cohesivas es representado negativamente. Por otro lado, puesto que la fase sólida no sufre ningún cambio el trabajo de cohesión en dicha fase es despreciable. Así pues, si continuamos expresando la energía por unidad de área y sustituimos ambos términos con las ecuaciones 3. 345 y 3. 348 tenemos:

$$\left. \frac{\partial E}{\partial A^{LS}} \right|_{P,V,T} = w_{Adh}^{LS}$$

$$w_{coh} = 2\gamma_{LF}$$

Luego:

$$S^{LS} = -(2\gamma_{LF}) + (\gamma_{FL} \cdot (1 + \cos(\theta_Y))) \quad 3. 353$$

Donde  $S^{LS}$  representa el coeficiente de expansión o la energía libre cedida por la gota por unidad de área, así siempre que las fuerzas de adhesión superen a las de cohesión se producirá un aumento en la superficie de contacto entre las fases sólida y líquida producto del esparcimiento de la gota  $S^{LS} > 0$ . De igual modo, si las fuerzas de cohesión superan a las de adhesión la gota no se esparcirá sino que se contraerá y por tanto no mojará  $S^{LS} < 0$ . Reagrupando términos la expresión en anterior tenemos:

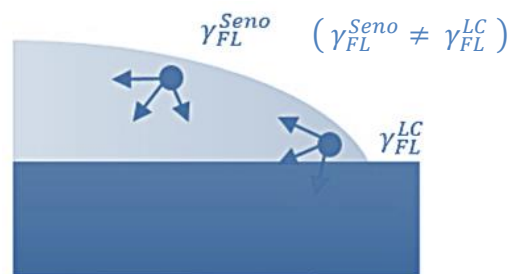
$$S^{LS} = \gamma_{FL} \cdot (\cos(\theta_Y) - 1) \quad 3. 354$$

La expresión 3. 354 representa la ecuación que gobierna la expansión de la huella de la gota sobre un sustrato en función de su ángulo de contacto y la tensión superficial de la interfase fluido-líquido en superficies ideales, es decir; planas, lisas, homogéneas, no porosas, rígidas y químicamente inertes.

### 2.7.1.6. Ecuación generalizada de Young (tensión de línea)

La ecuación generalizada de Young hace referencia a la interacción de las tres fases en un mismo punto o línea de contorno de la huella que deja la gota depositada. En gotas de

grandes dimensiones la influencia de las tres fases en la tensión líquido-fluido puede ser despreciable más en gotas de un volumen diminuto como es en el caso de los sistemas Inkjet y principalmente dentro de la impresión funcional donde el control de línea de contacto es de gran importancia, dicha influencia puede llegar a modificar la tensión líquido-fluido y en consecuencia tener efectos en el mojado (ver Figura 241). Esta posibilidad fue reconocida por Gibbs [263], que sugirió que la interacción mutua entre las tres fases puede contabilizarse por la tensión de línea  $\sigma_{SFL}$ . El valor, e incluso el signo de la tensión de línea es hoy día motivo de controversia, pero lo que sí está claro es que la tensión de línea afecta al ángulo de contacto de gotas relativamente pequeñas ( $< 1\mu l$ ). En gotas voluminosas, la contribución de la tensión de línea al ángulo es insignificante, por lo que para gotas suficientemente grandes sobre superficies ideales, la ecuación (3. 340) es aplicable.



**Figura 241:** Interpretación microscópica de la tensión de línea [Fuente: elaboración propia].

Cuando se tiene en cuenta la tensión de línea hay que añadir un término a la ecuación de Young 3. 340 introduciendo el efecto de dicha magnitud, es decir:

$$\cos(\theta_i) = \cos(\theta_Y) - K_g \frac{\sigma_{SFL}}{\gamma_{LF}} \quad 3. 355$$

donde  $K_g$  es la curvatura geodésica de la línea de contacto en el punto en cuestión y es el término que introduce la dependencia con el tamaño. Para el caso de una gota axisimétrica será igual a la inversa del radio de contacto, por lo que es de entender, la débil influencia que tiene la tensión de línea de gotas grandes ( $> 5\mu l$ ). El ángulo de contacto dado por la ecuación generalizada de Young recibe el nombre de ángulo intrínseco  $\theta_i$  [264] del que emana el concepto de mojabilidad intrínseca  $\mu_i$ :

$$\mu_i = \cos(\theta_i) \quad 3. 356$$

Hasta este momento hemos considerado superficies ideales. Sin embargo, el concepto de mojabilidad intrínseca se aplica también para superficies reales como concepto local, es decir, en un determinado punto de una superficie la mojabilidad intrínseca viene representada por el ángulo de contacto intrínseco que sería el ángulo de Young corregido que la huella de una gota depositada sobre una superficie o sustrato ideal exhibiría.

En los siguientes apartados veremos qué relación existe entre el ángulo que una gota exhibe localmente sobre superficies reales, con respecto al ángulo intrínseco, lo que denominaremos como ecuación local de Young.

### **2.7.2. Mojado de superficies sólidas reales**

Como se ha indicado anteriormente, las superficies existentes en la naturaleza presentan una serie de propiedades que dificultan los estudios de mojado. Por ejemplo, nos podemos encontrar con superficies que interaccionan de alguna manera con el líquido que se deposite sobre ellas. Deformándose, reaccionando químicamente, o incluso permitiendo la penetración de líquido en su interior (porosidad) y además cuyas propiedades mecánicas y fisicoquímicas pueden cambiar con el tiempo tras estar en contacto con el líquido (por ejemplo, una cola, un adhesivo). Pese a estas dificultades, existen muchos estudios que analizan dichos fenómenos y características, y cuya mojabilidad es de sumo interés, no obstante, no todas las superficies reales presentan todas las propiedades anteriores y tampoco pueden considerarse, física y químicamente inertes, o rígidas y no porosas. Sin embargo, algo común a las superficies reales es que presenten defectos superficiales químicos o topográficos, que se manifiestan según la escala de consideración, y que a menudo no podemos obviarlos. De ahí, que las superficies de la naturaleza sean por lo general en diferente grado y a diferente escala, rugosas y químicamente heterogéneas.

A continuación, se van a tratar las bases del mojado de superficies reales, entendidas estas como superficies rugosas y heterogéneas químicamente.

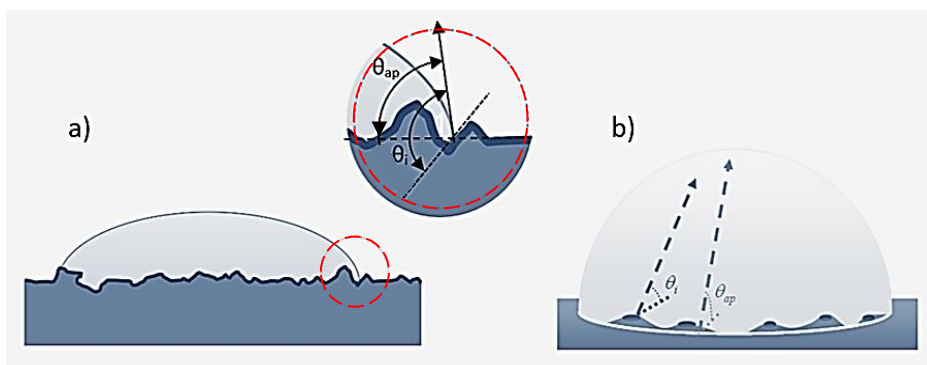
Así pues, la mojabilidad de una superficie rugosa y homogénea químicamente por un determinado líquido, se describe a partir de un único ángulo de contacto intrínseco, tal y como lo definimos anteriormente. Sin embargo, la mojabilidad de una superficie heterogénea por un determinado líquido viene caracterizada por varios ángulos intrínsecos que corresponden con cada una de las realidades químicas superficiales presentes. Conceptualmente, los ángulos intrínsecos son inaccesibles experimentalmente. A cualquier ángulo de contacto obtenido experimentalmente se le denomina ángulo observable. Es importante destacar, que el hecho de que el ángulo observable no coincida con el ángulo intrínseco de una superficie rugosa y homogénea químicamente, o con alguno de los ángulos intrínsecos de una superficie lisa y heterogénea, no significa que tenga lugar un incumplimiento de la ecuación de Young descrito anteriormente. Esta ecuación se interpreta localmente, es decir, para cada uno de los puntos de la línea de contacto por separado. Hasta el momento, por limitaciones ópticas en los dispositivos experimentales convencionales, o por limitaciones de método en estudios teóricos, se corrobora dicha ecuación entendida de forma local, con cierta incertidumbre.

Cuando depositamos una gota sobre una superficie rugosa homogénea y medimos el ángulo en un determinado punto de la línea de contacto, estamos accediendo al ángulo que



aparentemente forma la tangente a la interfaz líquido-fluido de la gota con la superficie sólida. Esto es debido a que el observador considera la superficie horizontal y no tiene acceso a la posible inclinación local microscópica que presente en el punto observado [265]. De esta forma, según sea la inclinación local de la superficie, podemos subestimar o sobrestimar el verdadero ángulo de contacto, que correspondería con el ángulo intrínseco [266]. Véase Figura 242.a. Es por esta razón, que sobre superficies rugosas el ángulo observable se define como ángulo aparente.

Por otro lado, si consideramos la superficie lisa y heterogénea químicamente puede que sí tengamos acceso a los ángulos intrínsecos de la superficie en algunos puntos de la línea de tres fases, pero al tener diferentes químicas superficiales es posible que la interfaz se corrugue de manera que haya puntos de la línea y por tanto ángulos intrínsecos, inaccesibles para el observador. De esta forma, en esta situación también cabría hablar de un ángulo aparente sobre superficies lisas y heterogéneas, puesto que no corresponde con el real (Figura 242.b). Sin embargo, el concepto de ángulo aparente es más empleado y apropiado sobre superficies rugosas [267].



**Figura 242:** Representación esquemática de los ángulos intrínseco y aparente sobre una superficie a) Rugosa y homogénea b) Lisa y heterogénea [Fuente: elaboración propia].

Según lo dicho anteriormente, desde el punto de vista microscópico para un sustrato no rugoso ha de cumplirse que: el ángulo real que una gota exhibe en un determinado lugar coincide con el ángulo intrínseco de la superficie en dicho punto, y que para una superficie homogénea será único, y para una superficie heterogénea será variable a lo largo de la línea de contacto. Esto no es otra cosa que la denominada ecuación local de Young.

$$\cos \theta(\vec{r}) = \mu_i(\vec{r}) \quad 3.357$$

donde el primer miembro hace referencia al ángulo real que una gota exhibe en un punto  $\vec{r}(x, y)$  de la línea de contacto y del otro lado de la igualdad, a la mojabilidad intrínseca en dicho punto. Es decir, el ángulo exhibido localmente se obtiene a través de la imposición de equilibrio mecánico de las tensiones interfaciales que actúan en cada punto de la línea de

contacto. Esta afirmación es válida para superficies ideales y no ideales. Es importante enfatizar, que ese ángulo real no siempre corresponderá con el observable.

Como hemos indicado, tanto la rugosidad como heterogeneidad química están generalmente presentes en las superficies reales. Sin embargo, existen superficies donde hay un claro predominio de una determinada química superficial. A este tipo de superficies nos referimos como superficies cuasi-homogéneas. Por otro lado, podemos encontrar superficies en las que la rugosidad sea muy baja y puedan ser consideradas como lisas (teniendo en cuenta la escala de rugosidad y las dimensiones del sistema de mojado). A estas superficies las denominaremos cuasi-lisas.

El objetivo que subyace en gran parte de los estudios de mojado es el acceso al, o a los ángulos intrínsecos de la superficie, por lo que la primera problemática que surge es, encontrar una relación entre el ángulo observable y dichos ángulos intrínsecos. Pero antes de resolver esta problemática, es necesario saber si ese ángulo observable es único, ya que existen dos fenómenos sobre superficies reales, que inducen variabilidad en el ángulo observable y por tanto, dificultan la reproducibilidad experimental. Estos son, los fenómenos de histéresis del ángulo de contacto y multiplicidad del ángulo de contacto.

### **2.7.2.1. Multiplicidad del ángulo de contacto**

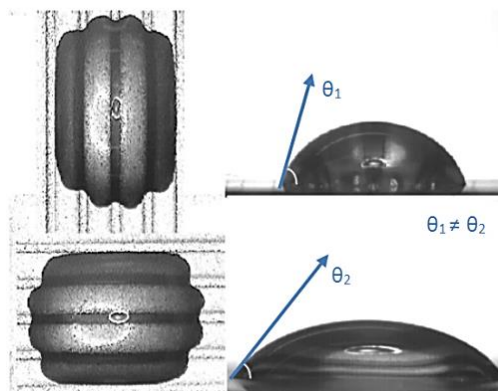
En el apartado anterior, hemos analizado tanto la forma de las interfaces fluidas como el ángulo de contacto de sistemas de mojado sobre superficies ideales. En estas situaciones particulares, donde tenemos rugosidad nula y una única química superficial, la configuración final de equilibrio será aquella para la que el ángulo de contacto observable es único a lo largo de toda la línea de contacto y coincide con el ángulo intrínseco característico del sistema. Para el caso de una gota sésil, el ángulo observable será constante a lo largo de toda la línea de contacto, la forma de la gota será axisimétrica y consecuentemente la línea de contacto circular, tal y como describe la ecuación de Young-Laplace.

Sin embargo, tal y como se ha comentado, la realidad química y topográfica que la línea de contacto encuentra sobre una superficie real, puede ser diferente de un punto a otro. De forma que el ángulo observable varía a lo largo de la línea de tres fases. Así, la línea de contacto se encuentra corrugada respecto a su forma ideal. Este fenómeno es el conocido como multiplicidad del ángulo de contacto (MAC). Este está generalmente presente en las superficies reales, puesto que como hemos indicado, son heterogéneas y rugosas en diferente grado y a diferente escala. Sin embargo, dada la tendencia del sistema a minimizar su área interfacial líquido-fluido; y dada la resolución de los sistemas de medida (ópticos), se puede encontrar situaciones en las que el sistema presente el mismo ángulo observable a lo largo de toda la línea de contacto y ésta tenga una forma aparentemente ideal. De esta forma, podemos encontrar situaciones en las que no hay MAC observable. Siguiendo con el ejemplo de una gota sésil, diremos que hay MAC, si la forma del menisco no es axisimétrica

(Figura 243). Es decir, hay una variabilidad en el ángulo observable a lo largo de toda la línea de contacto [268], [269].

Las situaciones donde tiene lugar con mayor frecuencia la aparición de la MAC son aquéllas para las que el tamaño de los defectos superficiales y el del sistema de mojado son semejantes. Para situaciones en que el tamaño de los defectos es varios órdenes de magnitud menor que el del sistema, puede no observarse la MAC, a no ser que la distribución de estos defectos sin ser isotrópica, exhiba algún tipo de simetría o patrón [270] (e.g. patrón axial).

Es importante resaltar que las fuentes de la MAC son diferentes según estemos ante superficies con predominio de heterogeneidad química o predominio de rugosidad. En el caso de superficies cuasi-lisas y heterogéneas, la MAC se debe a la presencia de varios ángulos intrínsecos sobre la línea de contacto. En superficies cuasi-homogéneas químicamente, pero rugosas, la MAC es debida a la existencia de diferentes inclinaciones locales de la superficie respecto a la horizontal a lo largo de la línea de tres fases. Para este último caso, la superficie presenta un mismo ángulo intrínseco pero diferentes ángulos aparentes u observables. Lo que sí se puede afirmar es que tanto la rugosidad como la heterogeneidad química son responsables del fenómeno de la MAC. Hoy día, hay varias teorías sobre cómo caracterizar la mojabilidad de una superficie que presenta la MAC [271]. Lo que pretenden estas teorías, es dar un único valor del ángulo aparente que dé cuenta de la mojabilidad promedio de la superficie.



**Figura 243:** Diferentes ángulos de contacto observables para una gota con MAC, sobre una superficie químicamente heterogénea con un patrón de heterogeneidad a bandas [257].

Entre dichas teorías, hay algunas que tienden a analizar la línea de contacto mientras que hay otras que se basan en analizar el área mojada. La mojabilidad observable promedio de una determinada superficie, puede venir expresada en función de los ángulos observables medidos a lo largo de la línea de contacto, es decir de la forma;

$$\hat{\mu} \equiv \oint_{LC} \cos \theta_{ob}(\varphi) \partial \varphi \quad 3. 358$$

donde  $\varphi$  es el ángulo polar que parametriza la línea de contacto. Por otro lado, la mojabilidad observable media puede obtenerse a través de una hipotética gota axisimétrica cuya área mojada  $A_m$ , volumen  $V$  y longitud de capilaridad  $l_0$ , coinciden con la de la gota real asimétrica, es decir:

$$\hat{\mu} = f\left(\frac{A_m}{V^{2/3}}, \frac{V}{l_0^3}\right) \quad 3. 359$$

Esta función depende de la forma de la interfaz líquido-fluido escogida (esférica, laplaciana, etc.) y el ángulo de contacto de la gota hipotética será el ángulo observable promedio de la gota asimétrica inicial.

La opción dada por la ecuación 3. 358, parece más rigurosa que la dada por la ecuación 3. 359, pero desde el punto de vista experimental, hoy día existen pocos dispositivos o ninguno a saber capaces de dar la información simultánea de todos los ángulos observables en la línea de contacto [272], por lo que siendo pragmáticos, debemos conformarnos con la aproximación dada en 3. 359.

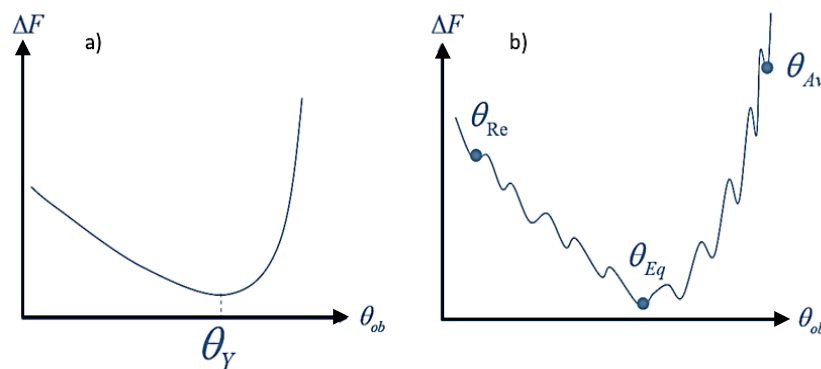
### 2.7.2.2. Histéresis del ángulo de contacto

La configuración que adopta una gota sobre una superficie real (radio y ángulo de contacto para un volumen dado) depende de la forma en la que se ha sido depositada. La histéresis del ángulo de contacto (HAC) es el fenómeno por el cual, el ángulo observable para un determinado volumen del sistema depende de la historia previa del mismo [273], [274]. Este fenómeno es fácilmente observable al depositar una gota sobre una superficie la cual posteriormente inclinamos. Si medimos el ángulo en la parte inferior de la gota, observaremos un ángulo mayor que el que mediríamos en la parte superior [275]. Mediante esta prueba estamos induciendo al sistema a que rompa su posible forma axisimétrica inicial y por tanto estamos induciendo a que el sistema presente MAC. Es por este motivo, por la que ambos fenómenos están habitualmente relacionados. Sin embargo, no es necesario observar MAC para observar HAC. Por ejemplo, supongamos que depositamos una gota de un determinado volumen de líquido sobre un sustrato liso y homogéneo, de manera que la forma aparente de la misma sea axisimétrica (y no haya MAC), observaremos que el ángulo observable inmediatamente después de la deposición será muy diferente al medido al cabo de un tiempo, cuando el líquido comienza a evaporarse o de inicio a un cambio de fase. Así pues, no solo la historia previa juega un papel importante a la hora de estimar experimentalmente ángulo de contacto sino también el tiempo transcurrido en aquellos sistemas en donde se produzca un cambio de fase o la evaporación de sus solventes.

Como ya se ha comentado anteriormente, el exceso de energía libre de un sistema de mojado como consecuencia de la existencia de tres interfaces diferentes (SF, FL, LS) viene dada por 3. 350. La condición de minimización de ese exceso de energía sobre superficies ideales dada en 3. 351, da como resultado una única posible configuración donde la energía

libre es mínima. Como ya se ha comentado, esa configuración corresponde con aquella para la que el ángulo en todos los puntos de la línea de contacto coincide con el de Young (Figura 244.a). La existencia de ese único mínimo implica que, si partiéramos de cualquier configuración diferente, el sistema evolucionaría hasta alcanzar esa configuración de mínima energía global.

Sobre una superficie real, la condición de minimización de energía no da como resultado una única posible configuración, es decir hay un conjunto de mínimos locales de energía o configuraciones de equilibrio metaestable (Figura 244.b). A cada una de estas posibles configuraciones se le denomina metaestado. Esto significa que, partiendo de una determinada configuración inicial, la evolución del sistema tendría lugar de manera que se alcanzara una configuración metaestable cercana a la inicial, que no necesariamente coincidirá con un mínimo global de energía. La condición necesaria para que exista histéresis es la existencia de estos metaestados. La condición suficiente es que dichos metaestados dependan además del volumen del sistema. Se supone que a mayor volumen, mayor número de metaestados [273].



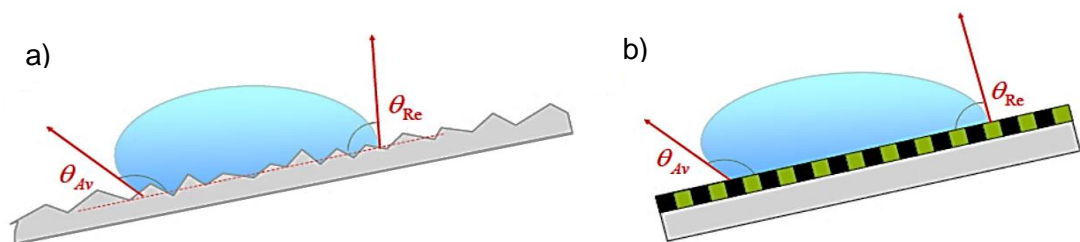
**Figura 244:** Curva típica de energía libre sobre: a) una superficie ideal y b) una superficie no ideal [257].

A cada metaestado le corresponde un determinado ángulo fenomenológico, que corresponderá con el observable cuando no existe MAC o con el ángulo efectivo promedio dado por 3. 358 o 3. 359 en el caso de existir MAC. De todos estos ángulos destacan tres por su significado físico o reproducibilidad. El primero es el denominado ángulo de contacto de equilibrio (ACE,  $\theta_{Eq}$ ) que corresponde con el ángulo fenomenológico obtenido en aquella configuración de mínima energía, por lo que, de todos ellos, es el de mayor significado físico. Es importante aclarar que, pese a que tradicionalmente a este ángulo se le denomina ángulo de equilibrio, no quiere decir que el resto de configuraciones no sean de equilibrio, ya que se trata de configuraciones de equilibrio metaestable. Es por esta razón por la que algunos autores [262] denominan a este ángulo, ángulo de contacto observable más estable.

Existen otros dos ángulos fenomenológicos de gran importancia debido a su reproducibilidad. El ángulo observable mayor recibe el nombre de ángulo de contacto de avance (ACA,  $\theta_{Av}$ ) y se denomina de esta forma, porque es el observado en aquellas situaciones incipientes donde la fase líquida avanza sobre el sólido a expensas de la fase fluida. Este ángulo puede observarse en la parte inferior de una gota sésil inclinada en el momento en que comienza a desplazarse sobre el sólido (ver Figura 245). También se puede observar el ACA a partir del crecimiento del área mojada (interfaz LS) en favor del área seca (interfaz FS). Por otro lado, el ángulo observable menor es el conocido como ángulo de contacto de retroceso (ACR,  $\theta_{Re}$ ) y se denomina así por ser el obtenido en aquellas situaciones donde la fase líquida retrocede sobre el sólido en favor de la fase fluida. Esta situación se ve en la parte superior de una gota inclinada en el momento de movimiento incipiente (Figura 245) o en situaciones donde el área mojada disminuye en favor del área seca. Estos dos ángulos de contacto son lo más reproducibles experimentalmente.

Sobre superficies lisas y heterogéneas, los ACA y ACR están relacionados con los ángulos intrínsecos máximo y mínimo presentes en la superficie a consecuencia de su heterogeneidad (véase Figura 245.b). Por otro lado, los ACA y ACR sobre superficies rugosas y homogéneas, están relacionados con las pendientes locales máximas encontradas en la superficie (véase Figura 245.a).

Los metaestados están separados entre sí por barreras energéticas. Para pasar de un metaestado a otro, el sistema necesita superar esas barreras mediante un aporte de energía por parte de un agente externo, como por ejemplo, mediante la energía adquirida a través de vibraciones acústicas o mecánicas.



**Figura 245:** Ángulos de contacto observables de avance y retroceso sobre: a) Una superficie rugosa y homogénea y b) una superficie lisa y heterogénea

[Fuente: elaboración propia].

El intervalo de histéresis  $H$ , se define como:

$$H = \theta_{Av} - \theta_{Re} \quad 3.360$$

Es decir, la diferencia entre ACA y ACR. El valor de ese intervalo es un estimador del grado de imperfección de la superficie, es decir del grado de rugosidad y heterogeneidad química.

### 2.7.2.3. Ecuaciones de Cassie y Wenzel

Wenzel en 1936 [276] estableció una relación entre el ángulo de equilibrio y el ángulo intrínseco para una superficie homogénea y rugosa:

$$\cos(\theta_{Eq}) = r_W \cos(\theta_i) \quad 3. 361$$

donde  $r_W$ , es el factor de rugosidad, conocido también como factor de Wenzel y representa la relación entre el área real de una superficie y el área proyectada, de manera que  $r_W = 1$  para superficies perfectamente lisas y  $r_W > 1$  para superficies rugosas. Esta ecuación implica que el ángulo de equilibrio de superficies rugosas hidrófilas será menor que su ángulo intrínseco, mientras que, en superficies hidrófobas, será mayor. La ecuación de Wenzel es aplicable para aquellas situaciones donde el líquido penetra totalmente en la rugosidad de la superficie, de manera que no quedan burbujas de aire atrapadas entre el sólido y el líquido. Estas situaciones tienen lugar en condiciones de alta rugosidad dando lugar a algunos fenómenos como el de la superhidrofobia [277],[278].

Años más tarde, Cassie [279] estableció la relación entre el ángulo de equilibrio de superficies heterogéneas y lisas con los ángulos intrínsecos presentes en la superficie mediante la conocida como ecuación de Cassie. La ecuación de Cassie apunta a que el coseno del ACE (ángulo de contacto en equilibrio) corresponde a la media ponderada con las concentraciones, de los cosenos de los ángulos intrínsecos.

$$\cos(\theta_{Eq}) = \sum_j f_j \cos(\theta_{i,j}) \quad 3. 362$$

donde  $f_j$  es la fracción de área caracterizada por un ángulo intrínseco  $\theta_{i,j}$ . Se tiene que:  $\sum_j f_j = 1$ .

La validez de las ecuaciones de Cassie y Wenzel, están siendo actualmente un motivo de gran controversia. Mientras existen autores dispuestos a tachar de incorrectas ambas ecuaciones [280], [281], otros se resisten a negar su invalidez [282]. La realidad es que estas ecuaciones son aproximaciones y su margen de aplicabilidad es limitado. Las condiciones en que ambas ecuaciones son aplicables, son aquellas para las que el tamaño del sistema de mojado es varios órdenes de magnitud superior al tamaño característico de los defectos superficiales. En el caso de los sistemas Inkjet donde el tamaño de las gotas es del orden de los picolitros dichas ecuaciones no son aplicables. Aun así, se ha considerado necesario hacer un repaso de estas ecuaciones debido a su importancia.

Es importante destacar que pese a la gran similitud de ambas ecuaciones anteriores, la ecuación de Cassie parte de los múltiples ángulos intrínsecos y la concentración de cada uno de los diferentes dominios químicos existentes en el sustrato o superficie para obtener el ACE del sistema, cosa que a través de la ecuación de Wenzel se obtiene para un sustrato

homogéneo de un único ángulo intrínseco, mediante el factor de rugosidad que posee el mismo.

#### 2.7.2.4. Ecuación de Cassie-Baxter

No era de extrañarse que para poder modelizar el caso donde nos encontrásemos ante una superficie rugosa y químicamente heterogénea se recurriera a la combinación de las Ec. anteriores, donde el ángulo de contacto en equilibrio viniera dado por los múltiples ángulos intrínsecos existentes y bajo la influencia de rugosidad del sustrato, de manera que el ángulo de contacto en equilibrio puede obtenerse usando de manera conjunta la ecuación de Wenzel y la de Cassie, es decir:

$$\cos(\theta_{Eq}) = \sum_j f_j r_j \cos(\theta_{i,j}) \quad 3. 363$$

donde  $f_j$  es la fracción de área,  $r_j$  el factor de Wenzel correspondiente y  $\theta_{i,j}$  el ángulo intrínseco del sustrato j-ésimo. Nuevamente, se tiene que:

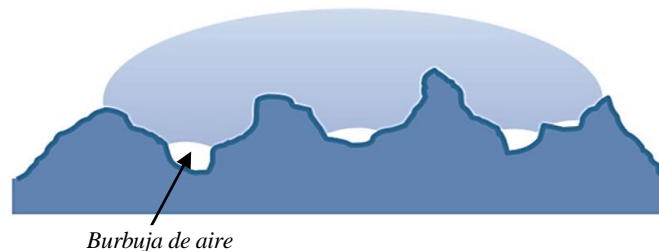
$$\sum_j f_j = 1 \rightarrow \sum_j f_j r_j = r_w$$

Como se han indicado anteriormente, bajo determinadas condiciones de rugosidad, es posible que se formen burbujas de aire (fase fluida) entre el líquido y el sólido, de manera que pese a tener una única composición química en el sólido, la superficie puede considerarse heterogénea, puesto que el líquido en determinados puntos contacta con aire y en otros con la superficie (Figura 246). La ecuación que establece la relación entre el ángulo intrínseco y el de equilibrio para una superficie de este tipo, se denomina ecuación de Cassie-Baxter. En ella se considera al aire como el segundo sustrato químico y por tanto:  $\theta_{i,2} = 180^\circ \rightarrow \cos(\theta_{i,2}) = -1$  y donde  $\sum_j f_j = f_1 + f_2 = 1$ , tras utilizar de manera conjunta la ecuación Wenzel y la de Cassie la ecuación de Cassie-Baxter se expresa como:

$$\cos(\theta_{Eq}) = f_1 r_w \cos(\theta_i) - (1 - f_1) \quad 3. 364$$

donde  $f_1$  es la fracción de área proyectada de la superficie sólida mojada por el líquido y  $r_w$  es el coeficiente de rugosidad de dicha área mojada. La formación de burbujas en la interfaz LS tiene lugar en aquellas situaciones donde  $r_w \cos(\theta_i) < -1$  y por tanto la ecuación de Wenzel no es aplicable.





**Figura 246:** Esquema de la situación de mojado donde es necesaria la aplicación de la ecuación de Cassie- Baxter para la obtención del ángulo de equilibrio

[Fuente: elaboración propia].

A medida que aumenta la rugosidad de una superficie, se observan dos regímenes bien diferenciados llamados:

- A) Régimen de Wenzel: cuando el líquido moja totalmente la superficie.
- B) Régimen de Cassie-Baxter: cuando tiene lugar la fenomenología descrita anteriormente. En estas situaciones, al inclinarse la superficie las gotas no se deslizan, sino que “ruedan”. A este efecto se le conoce como “Efecto loto”, por observarse en la flor de loto como mecanismo de auto-limpieza [283].

### Cálculo del parámetro de rugosidad

En mecánica, la rugosidad es el conjunto de irregularidades que posee una superficie producto de los procesos de manufactura y los parámetros asociados que caracterizan la rugosidad de un perfil se designan con la letra “R” (Ra: rugosidad media, es el más común y ofrece la desviación media aritmética de dicho perfil respecto a una cota. Dependiendo del intervalo  $N_x$  ( $c=1, \dots, 12$ ) al que se encuentre Ra, se establece la calidad del acabado superficial del objeto u elemento, en nuestro caso de la superficie o sustrato). Estos parámetros de rugosidad son ampliamente utilizados en la industria y en muchos otros campos, y cuyos valores son obtenidos mediante rugosímetros. Por otro lado, los parámetros que definen la rugosidad no en un perfil sino en una superficie bidimensional donde es necesario un mayor conocimiento de la topografía de las superficies se designan con la letra “S”, este parámetro puede obtenerse mediante distintas metodologías siendo una de ellas mediante el uso de microscopios de fuerza atómica (AFM). En la Figura 247 se resumen los distintos parámetros que definen la rugosidad superficial para sustratos referenciados a su análogo bidimensional siguiendo la norma ISO 25178. Por otro lado, el parámetro  $S_{dr}$  o factor de área, es un factor especialmente útil en los estudios de mojabilidad ya que se utiliza en la obtención del factor de rugosidad o también conocido como factor de Wenzel ( $r_w$ ) mediante la expresión:

$$r = 1 + \frac{S_{dr}}{100} \quad 3.365$$

Símbolo	Nombre	Ecuación	Descripción
$R_a, S_a$	Media aritmética	$S_a = \frac{1}{M N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M  \eta(x_i, y_j) $	Media de $ z $
$R_q, S_q$	Media cuadrática	$S_a = \sqrt{\frac{1}{M N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^2(x_i, y_j)}$	Desviación estándar de Z
$R_p, S_p$	Altura máxima de picos	$S_p = MAX(\eta_p)$	Máxima z
$R_v, S_v$	Profundidad máxima de valle	$S_v = MIN(\eta_v)$	Mínima z
$R_z, S_z$	Altura máxima de la superficie	$S_z = ( S_p  +  S_v )$	Max z-Min z
$R_{10z}, S_{10z}$	Altura de 10 picos	$S_{10z} = \frac{\sum_{i=1}^5  \eta_{pi}  + \sum_{i=1}^5  \eta_{vi} }{5}$	Media de los 5 máximos locales y los 5 mínimos locales
$S_{dr}$	Factor de área	$S_{dr} = \frac{(Textured\ surface\ area) - (Cross\ sectional\ area)}{Cross\ sectional\ area} * 100\%$ $S_{dr} = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{M-1} A_{i,j} - (M-1)(N-1)\Delta x \Delta y}{(M-1)(N-1)\Delta x \Delta y} * 100\%$	Ratio entre el área interfacial y el área proyectada

**Figura 247:** Algunos parámetros de rugosidad típicos 2D y 3D [284].

Resumiendo, en los estudios de mojado se tienen en cuenta múltiples ángulos de contacto entre los que destaca el ángulo de Young ( $\theta_Y$ ) que define la mojabilidad del sustrato, en este caso por la tinta, y a partir del equilibrio de las tensiones interfaciales. Con la ecuación 3.353 se expuso la definición del coeficiente de expansión (energía libre cedida por la gota por unidad de área) producto del desbalance energético entre las energías cohesivas y las energías adhesivas en superficies ideales y con ella se aglutinan parte de los conceptos fundamentales de la termodinámica de superficies e interfases.

Posteriormente, a través del concepto de tensión de línea y la consideración de superficies no ideales, se introduce el ángulo intrínseco ( $\theta_i$ ) como un concepto local con el cual dejamos los casos ideales. Con la introducción de las superficies reales aumentamos la complejidad de los estudios de mojado. Observándose como influye la rugosidad y la heterogeneidad química en la mojabilidad de las superficies ahora más cercanas a la realidad, pero dejando al margen las interacciones fluido-sustrato desde un punto de vista fisicoquímico (las fases son inertes entre sí). Así pues, la introducción de la rugosidad y la heterogeneidad de las superficies nos han permitido observar la multiplicidad de los ángulos de contacto (MAC) situación más acorde a la realidad de los sistemas de mojado.

A continuación se abandona la interpretación estática del fenómeno del mojado para introducir la dinámica en el mismo y por tanto, visto como un fenómeno dependiente de la historia precedente al mismo aparece la histéresis del ángulo de contacto (HAC), los ángulos de avance ( $\theta_{Av}$ ), de retroceso ( $\theta_{Re}$ ) como consecuencia de la evolución temporal de

las gotas depositadas sobre un sustrato real y el ángulo de equilibrio ( $\theta_{Eq}$ ) ya sea local o global.

Finalmente, se ha de resaltar que además de los fenómenos anteriores asociados a las etapas precedentes, en la deposición de las gotas también tienen lugar los fenómenos asociados a la interacción sustrato-tinta, y los cambios fisicoquímicos que éste último produce o sufre, nos referimos a un posible cambio de fase por cualquier mecanismo o la volatilización de los solventes del fluido depositado que en consecuencia modificaría el ángulo de contacto y por tanto en resumen, la historia posterior la deposición también juega un papel relevante en la forma que adaptan las gotas tras alcanzar un equilibrio final.

Así pues, dicho esto el balance energético expuesto en la ecuación 3. 349 se presenta insuficiente ya que no abarca todas las energías involucradas en el proceso de deposición de la gota sobre el sustrato y su posterior interacción. Dicho esto, a continuación se describe las condiciones necesarias y las modelizaciones que describen la fenomenología involucrada en la deposición estable de gotas sobre un sustrato atendiendo al tamaño de las mismas.

### **2.7.3. Modelización del proceso de contacto de las gotas con el sustrato**

Tal y como se afirmó anteriormente en donde se expone el fenómeno de la histéresis del ángulo de contacto, la historia previa juega un papel importante en la conformación del ángulo de contacto y por tanto en la mojabilidad y la forma de la gota tras alcanzar su estado de equilibrio, situación que suele tener lugar antes del inicio del cambio de fase de los fluidos en este caso de las tintas.

El comportamiento de una gota de un fluido tras impactar con una superficie sólida a bajos números de Mach donde la compresibilidad del fluido es despreciable puede ser descrito mediante un conjunto de procesos físicos en las que intervienen fuerzas inerciales, fuerzas capilares y fuerzas gravitacionales. En el estudio de dichos procesos físicos recurrimos a distintas agrupaciones adimensionales como son el número de Reynolds, Weber, Bond y Ohnesorge, al igual que en los apartados anteriores donde estudiamos la generación de las gotas, desde su eyección a su comportamiento y trayectoria.

Por otro lado, es necesario resaltar que puesto la historia previa juega un papel importante en la conformación de los depósitos funcionales, se ha considera oportuno hacer un inciso en la línea establecida hasta el momento y centrar ésta en la fenomenología asociada a la deposición de las gotas pero referido a los materiales susceptibles a ser impresos mediante los sistemas Inkjet DOD.

### 2.7.3.1. Fluidos susceptibles a ser impresos por sistemas Inkjet DOD

Como hemos podido apreciar en apartados precedentes el comportamiento de los fluidos eyectados depende de sus propiedades, la reología de las tintas o fluidos eyectados condiciona no solo la formación de las gotas sino también su forma geométrica, su volumen y velocidad. Parámetros éstos que a su vez influye en el vuelo (trayectoria parabólica que describen hasta impactar sobre el sustrato) y finalmente puesto que son procesos que van encadenados afectan al comportamiento de las gotas durante la deposición (impacto y esparcimiento) de las mismas sobre un sustrato y en consecuencia en la reproducción de los patrones deseados hasta que los procesos de fijación entran en juego (cambios de fase).

Así pues, debido a la importancia de las propiedades físicas, químicas y reológicas de las tintas empleadas a continuación trataremos de particularizar algunas de estas al caso estudiado, es decir, al uso de tintas funcionales y en concreto al de uso de suspensiones metálicas y dentro de estas al de una tinta conductora cargada de nano-partículas de plata. Es evidente que químicos e ingenieros de materiales en este aspecto podrían ahondar en las características y requerimientos de las mismas en profundidad, sin embargo, en el presente documento abordaremos de manera sencilla y superficial algunos de las solicitudes impuestas por los sistemas Inkjet.

En este sentido con el objetivo de imprimir pistas metálicas continuas partiendo de la deposición controlada de gotas a voluntad, podemos decir que la eficiencia del proceso aumenta a medida que mayor sea la fracción de partículas suspendidas en la tinta. Por otro lado, es bien conocido que la viscosidad de los fluidos en suspensión aumenta a medida que aumentamos la fracción de partículas, así para suspensiones diluidas (típicamente >2% en volumen) basándonos en la ecuación generalizada de estados de estado de Einstein podemos definir la viscosidad como [285]:

$$\mu = \mu_0(1 + (A\phi)) \quad 3. 366$$

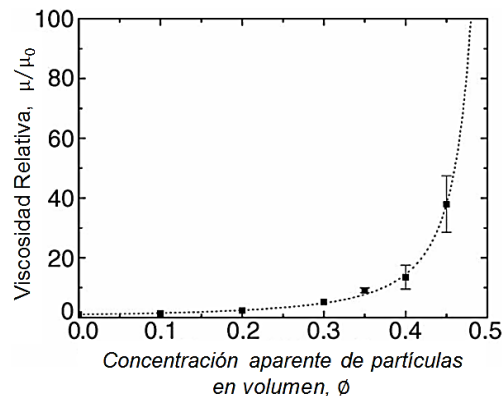
Donde  $\mu$  representan la viscosidad dinámica de la suspensión,  $\mu_0$  la viscosidad dinámica del vehículo,  $\phi$  la fracción volumétrica de las partículas en la suspensión, y donde A es una constante la cual depende de la forma de las partículas. Sin embargo, afín de generar depósitos metálicos de forma eficiente, la proporción de partículas en el fluido ha de superar los valores de los sistemas diluidos anteriores, anulando la validez de la ecuación anterior (válida para:  $0\% < \phi < 10\%$ ). Así, para suspensiones con altos contenidos en sólidos a menudo se utilizan otras relaciones, en este caso la ecuación modificada de Krieger-Dougherty [286] expuesta a continuación puede ser traída a colación como ejemplo.

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{\phi}{\phi_{max}}\right)^{-n} \quad 3. 367$$

Donde  $\phi_{max}$  representan concentración máxima en volumen de partículas en suspensión admisible (rango del 50-60% en donde la interacción de las partículas equiaxiales permiten

que la suspensión se comporte como un sólido elástico),  $\phi$  la proporción volumétrica real (en nuestro caso la tinta empleada posee partículas de plata de escala nanométrica y de dimensiones variadas afín de favorecer la continuidad eléctrica de los depósitos tras su sinterización, sin embargo podemos decir que poseen una carga en peso del 34,86%) y finalmente  $n$  una constante empírica respectivamente.

La dicotomía que se presenta en el desarrollo de las suspensiones para sistemas Inkjet puede verse representada en la Figura 248, en donde se puede apreciar que afín de aumentar la eficiencia del sistema se busca maximizar la proporción de partículas en la suspensión pero al mismo tiempo ésta no debe exceder los límites impuestos por los sistemas Inkjet para una correcta generación y eyectabilidad de las gotas. Un fenómeno similar a este pudo apreciarse en el desarrollo de los barbotinas fotosensibles donde el incremento de la proporción de partículas cerámicas de LTCC en la mezcla incrementaba notablemente la viscosidad de la misma.



**Figura 248:** Viscosidad de una suspensión de partículas coloidales de Alúmina en parafina como medio fluido [285].

Por otro lado, se ha de resaltar que generalmente las suspensiones tienen un comportamiento no newtoniano, es decir, en donde su viscosidad no es proporcional y varía en función de la temperatura y la tensión cortante a la que se ve sometida. En los sistemas Inkjet DOD, debido a que a las altas frecuencias en las que opera en donde las velocidades de las ondas de presión generadas por los piezoeléctricos son elevadas y por tanto el fluido se ve sometido a grandes esfuerzos a cizalla se antoja especialmente difícil hacer medidas experimentales de la viscosidad de las suspensiones, es por ello que se recurre a extrapolaciones a partir de mediciones realizadas en condiciones menos extremas. Por otro lado, en el diseño de las suspensiones se ha de tener en cuenta no solo la proporción de partículas funcionales en la suspensión, sino también el tamaño y la forma de éstas afín de no perder la fluidicidad bajo estas solicitudes. Con el fin de minimizar este riesgo y las posibles obstrucciones del flujo debido al cuello de botella que el nozzle supone, Derby y Reis [285] plantean que el tamaño máximo de las partículas debe ser significativamente menor que el diámetro del orificio, haciendo una analogía con un flujo de polvo seco, el

diámetro de las partículas debe ser no mayor que  $1/20$  del diámetro del orificio [287] y en el caso de los cartuchos Dimatix empleados como ya se ha comentado, Fujifilm recomienda que éstas (las partículas) sean menores a  $1/100$  veces el tamaño del nozzle lo que nos lleva a partículas nanométricas (inferior a  $0,2 \mu\text{m}$ , ver Figura 153). En este aspecto muchos diseños de impresoras comerciales utilizan un filtro en línea dentro del sistema de suministro de fluido para asegurar este requisito.

Por otra parte, debido a que tanto la densidad como la viscosidad de una suspensión aumentan con el contenido de las partículas sólidas, el Reynolds del mismo en consecuencia decrece a una velocidad constante, esto limita y condiciona la imprimibilidad de estas suspensiones que como se verá más adelante.

De forma que, entre los parámetros físicos más importantes a tener en cuenta en los fluidos a ser eyectados para impresión tenemos: la velocidad del sonido, la cual determina la velocidad de propagación de las ondas de presión, la viscosidad, la densidad y la tensión superficial. La utilización de agrupaciones adimensionales de variables junto con modelos y métodos numéricos de simulación por CFD (computational fluid dynamics) permitió que se identificasen los requisitos y condiciones que hacen de un fluido susceptible a ser impreso mediante un sistema Inkjet DOD. Uno de los primeros trabajos realizados en este sentido fue llevado a cabo por Fromm [221], en él se identificaba al número de Ohnesorge (Oh) como una de las agrupaciones de constantes físicas más acertadas en la caracterización de la formación de las gotas, aunque en realidad confusamente Fromm utilizaba su inversa el parámetro  $Z=1/\text{Oh}$ , años más tarde Reis & Derby [288] mediante la simulación numérica de la formación de las gotas propusieron que para formar gotas de forma estable éstas debían generarse en el rango de  $10 > Z > 1$ , donde a bajos valores de Z la disipación viscosa evita la eyección de las gotas mientras que altos valores de Z el chorro de tinta viene a menudo acompañado de gotas satélites.

En el caso que nos ocupa, puesto que utilizamos una suspensión de nanopartículas de plata altamente cargada ésta posee un valor del inverso del número de Ohnesorge de  $Z= 1,32$  lo cual representa que nos encontramos ante un material con una disipación viscosa alta y cuya Z se acerca de los límites establecidos de eyectabilidad para algunos de los sistemas Inkjet DOD, más para los accionado por piezoeléctricos puestos que éstos ofrecen una mayor flexibilidad en cuanto a materiales y en nuestro caso puesto que el cartucho Dimatix empleado se encuentra provisto de un sistema calefactor dicha aportación térmica al fluido facilita su eyectabilidad. Por otro lado, el valor de Z es tan bajo ya que el volumen eyectado es muy pequeño entorno a los  $10 \text{ pL}$  lo que supone un diámetro de gota de  $26,73 \mu\text{m}$ .

Otra de las limitantes en la generación de las gotas tiene que ver con la tensión superficial existente en los nozzles. Las gotas han de tener suficiente energía para superar dicha barrera durante el proceso de eyección, a este hecho Duineveld et al. [289] sugirió que a tal fin la velocidad mínima de salida de estas debía de ser al menos de:

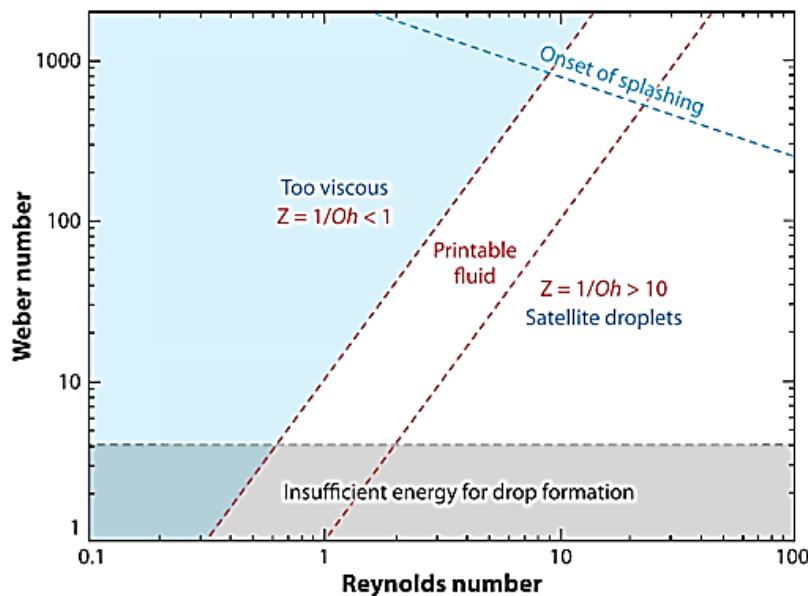
$$v_{min} = \left( \frac{4\gamma}{\rho d_n} \right)^{1/2} \quad 3.368$$

Donde  $d_n$  representa el diámetro del nozzle que en términos del número adimensional de Webber dicha condición de valor mínimo de velocidad de salida puede expresarse como:

$$\sqrt{W_e} = v_{min} \left( \frac{\rho d_n}{\gamma} \right)^{1/2} > 4 \quad 3.369$$

Que en nuestras condiciones bajo el uso de la tinta de plata ANP establece una velocidad mínima de flujo para que se produzca la eyección de  $v_{min} = 2,1746 \text{ m/s}$  y un Webber de  $W_e = 1,1646$ , que como se ha podido apreciar en apartados anteriores dichos valores se superan ampliamente en el caso que nos ocupa.

Finalmente, a continuación se introduce la interacción de las gotas eyectadas con los sustratos bajo las condiciones requeridas por los sistemas Inkjet, y puesto que como ya se ha comentado el comportamiento de los depósitos se ven influenciados por la historia previa a la deposición misma, mediante el uso de los números adimensionales: Reynolds y Webber. De modo que, se han establecido una serie de umbrales afín de identificar los límites para los cuales la generación y deposición de las gotas se realizan de forma satisfactoria es decir, sin gotas satélites ni salpicaduras a la hora del impacto (ver Figura 249).



**Figura 249:** Fluidos susceptibles a ser impresos por sistemas Inkjet DOD [290].

Se ha de decir que, por otro lado, los límites de ocurrencia de las salpicaduras (splashing) han sido estudiado por múltiples autores en donde tanto Mundo et. Al [291] y Stow y

Hadfield [247] coinciden en que el splashing ocurre cuando un valor  $K$  excede un valor crítico  $K_c$  [292], Stow y Hadfield establecieron dicho límite mediante la siguiente expresión:

$$K_c = \sqrt{We\sqrt{Re}} = Oh Re^{1.25} \quad 3. 370$$

Donde  $K_c$  representa el valor crítico el cual depende de las condiciones de impresión, de la reología de la tinta, las condiciones del sustrato y temperatura. En este aspecto debido a la influencia de la rugosidad del sustrato en este fenómeno, B. Derby [290] cuyo umbrales se expone en la figura anterior, plantea dicho límite  $K_c$  como una función de la rugosidad superficial del sustrato, es decir:

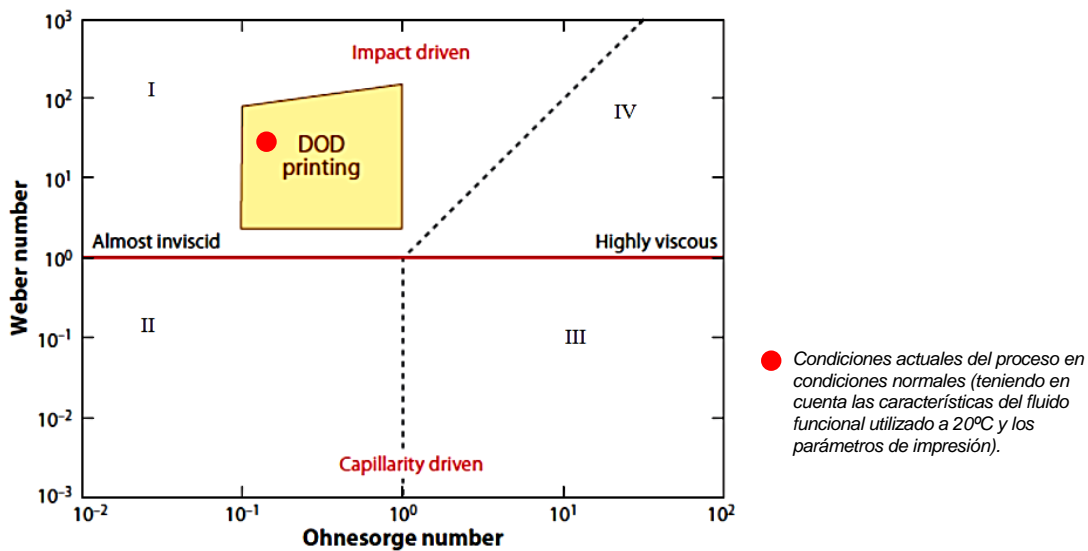
$$\sqrt{We\sqrt{Re}} > f(R)$$

Así, las salpicaduras se producirán cuando se cumpla la inecuación anterior y donde  $f(R)$  es una función únicamente de la rugosidad superficial, relación que ha sido estudiada por numerosos autores. En superficies planas y lisas Bhola y Chandra [293] estableció experimentalmente  $f(R) \approx 50$ . Por otro lado, la ec. 3. 365 puede a su vez ser utilizada para determinar las condiciones reológicas de los fluidos susceptibles a ser impresos o depositados sobre dicho sustrato (ver Figura 247).

### 2.7.3.2. Deposición estable de las gotas.

Continuando con la fenomenología presentada en la deposición de gotas sobre un sustrato y con el objetivo de que esta sea lo más estable posible numerosos estudios han sido llevados a cabo al respecto, en 1997 Schiaffino y Sonin [294] estudiaron el impacto de gotas con bajos números de Weber, aunque si bien su análisis fue para estudiar la solidificación de estas gotas, en su estudio asumieron que las etapas iniciales después del impacto deberían ser las mismas para todos los fluidos. Schiaffino y Sonin propusieron que el comportamiento de la gota en el impacto se puede dividir en dos regímenes: esparcimiento por impacto, en donde las fuerzas inerciales dominan y esparcimiento por capilaridad, en las que las velocidades de la caída inicial ya no son importantes. El mapa de deposición estable propuesto por estos investigadores mostraron 4 áreas de interés (ver Figura 250), utilizando los números adimensionales de  $We$  como función del  $Oh$  y produjeron un mapa adimensional cuyo eje horizontal es independiente de la velocidad de impacto.





**Figura 250:** Mapa de deposición estable de gotas sobre sustratos sólidos, establecido por Schiaffino y Sonin [294]. Dentro de esta gráfica se resalta también las condiciones reológicas requeridas por los sistemas Inkjet DOD tomadas de la Figura 249 [290].

Este enfoque presentado por Schiaffino y Sonin sobre las fenomenologías ocurridas durante la deposición de las gotas tiende a sobre simplificar su comportamiento ya que en la realidad no existe un límite discreto entre las regiones sino un proceso gradual de transición entre los distintos límites, aun así supuso un paso muy importante en la comprensión de la fenomenología que tienen lugar tras el impacto de las gotas.

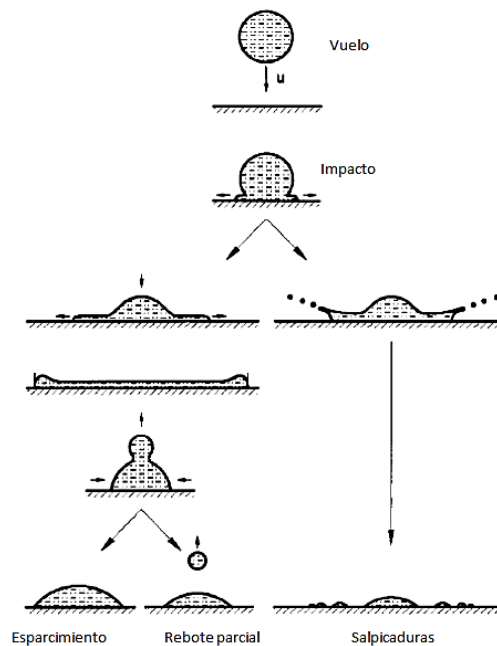
En la imagen anterior podemos apreciar las cuatro regiones que componen dicho mapa de estabilidad. La región I representa a los fluidos no viscosos donde el esparcimiento es producto de las fuerzas inerciales es decir, la mayor parte del esparcimiento se produce en un corto período de tiempo donde el flujo es impulsado por la presión dinámica del impacto, seguido de oscilaciones amortiguadas durante un periodo de tiempo mayor, así la viscosidad del fluido influye en la amortiguación de las oscilaciones y en la ralentización del avance de la línea de contacto, efectos que tienen lugar cuando la propagación principal ha finalizado. Por otro lado, bajo las condiciones actuales de impresión establecidas en el sistema Inkjet del equipo Nhibrid32D para el uso de las tintas de plata ANP empleadas y haciendo uso del mapa mostrado en la Figura 250 podemos apreciar que previsiblemente el comportamiento de las gotas será próximo al descrito en la región I.

La región II representa a los fluidos no viscosos donde el esparcimiento es producto de las fuerzas capilares, es decir en donde la influencia del impacto en el esparcimiento de la gota debido a las bajas velocidades es insignificante. En este caso la duración de las oscilaciones poco amortiguadas es del mismo orden o incluso ligeramente superior a la propagación o el esparcimiento de la gota sobre el sustrato como en el caso anterior.

La región III por otro lado, representa a fluidos muy viscosos donde el esparcimiento es fruto de las fuerzas capilares en la línea de contacto. En este caso las oscilaciones inerciales se encuentran sobre-amortiguadas por la viscosidad del fluido mostrando una duración muy corta y en donde la influencia del impacto en el esparcimiento de la gota es despreciable.

Finalmente, la región IV representa a los fluidos muy viscosos cuyo esparcimiento es principalmente una consecuencia de la presión dinámica producida en el impacto donde la velocidad de la gota es superior a la región III.

Además de Schiaffino y Sonin [294],[295], otros autores también han reportado que el comportamiento de las gotas al impactar el sustrato sólido están influenciados por su números de  $We$ , Van Dam y Le Clerc [296] demostraron que las gotas se deforman y se aplanan cuando  $We < 1.1$ , por otro lado Yarin [297] observó el comportamiento de las gotas al impactar a grandes velocidades 1-30 m/s y comprobó que las gotas depositadas en el rango de  $100 < We < 1000$  producían salpicaduras confirmado los límites establecidos anteriormente por Schiaffino y Sonin. En la imagen de a continuación se resumen y esquematiza los distintos escenarios que se pueden presentar en la deposición de las gotas [298], escenarios que se reducen a uno si nos mantenemos en el primer cuadrante mostrado en el diagrama de Schiaffino y Sonin y dentro de las condiciones para los sistemas DOD Inkjet establecidas anteriormente (como es nuestro caso) en cuyo situación la deposición de la gota mostrará un esparcimiento de forma estable por capilaridad, evitándose los rebotes y las salpicaduras, que tal y como han podido ser demostrado son producto de las condiciones del sustrato, afinidad líquido-sólido, la reología de la tinta y como esta ha sido depositada.



**Figura 251:** Diagrama esquemático de los distintos escenarios que se pueden presentar en la deposición de las gotas [298].

## 2.7.4. Impacto y deposición de gotas milimétricas

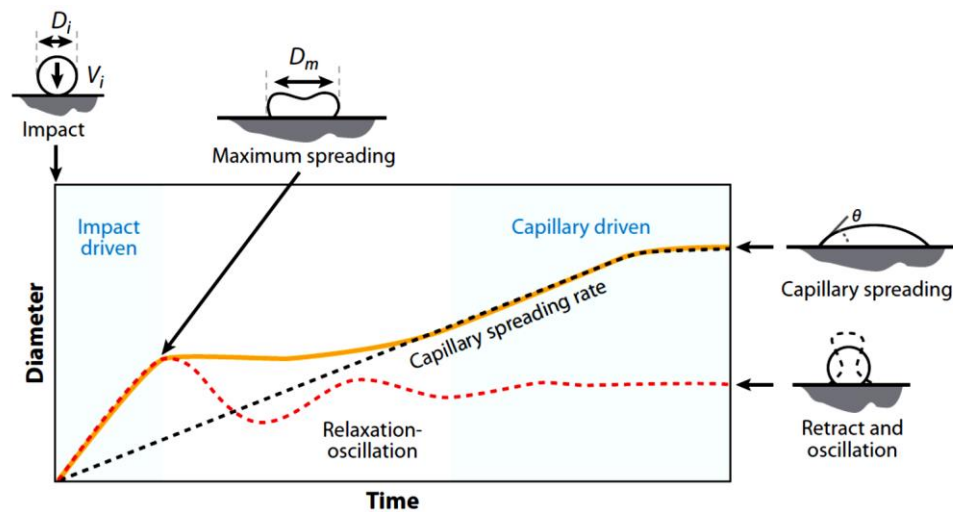
Existen muchas aproximaciones aritméticas que permiten estimar el esparcimiento de la gota tras impactar con el sustrato, a grandes rasgos todas ellas parten de un balance energético en el cual intervienen las energías superficiales y la energía cinética producto de la caída de la gota [299], frente a la energía superficial de una gota deformada y el trabajo viscoso realizado durante la deformación de la misma tras su impacto [299], [300], [301], [302]. En la tabla de la figura de a continuación se resumen algunas de estas modelizaciones.

Modelo	Expresión	Comentario
<b>Scheller &amp; Bousfield (1995)</b> [303]	$\beta \sim 0.61(Re^2 Oh)^{1/6} = 0.61Re^{1/5}(WeRe^{-2/5})^{1/6}$	Ley empírica basada en resultados experimentales
<b>Pasandideh-Fard et al. (1996)</b> [301]	$\beta = \sqrt{\frac{We + 12}{3(1 - \cos \theta_a) + 4 \left( \frac{We}{\sqrt{Re}} \right)}}$	Balance energético detallado, incluyendo ángulo de contacto de avance ( $\theta_a$ ) y las condiciones iniciales
<b>Ukiwe &amp; Kwok (2005)</b> [304]	$(We + 12)\beta = 8 + \beta^3 \left( 3(1 - \cos \theta_a) + 4 \frac{We}{\sqrt{Re}} \right)$	Extensión de la modelización anterior, con $\theta_a$ como ángulo de contacto dinámico durante el esparcimiento
<b>Clanet et al. (2004)</b> [305]	$\beta \approx We^{1/4}$	Balance de masa usando la longitud por esparcimiento capilar.
<b>Son et al.</b> [306]	$\ln(\beta) = 0,09\ln(We^*) + 0,151$	Modelización basada en el modelo de Ukiwe y Kwok, mediante el ajuste del $n^\circ$ de We.
<b>Roisman (2009)</b> [307]	$\beta \sim 0.87Re^{1/5} - 0.4Re^{2/5}We^{-1/2}$	Fórmula obtenida utilizando un modelo dinámico en donde el esparcimiento de la gota está influenciado por la viscosidad en la capa límite.
<b>Eggers et al. (2010)</b> [308]	$\beta = Re^{1/5}f(P)$	Enfoque similar a la de Roisman (2009); donde número de Impacto $P$ se define por $P = We Re^{-2/5}$

**Figura 252:** Diferentes modelos desarrollados para la estimación del coeficiente de esparcimiento  $\beta$  [309].

A continuación, se expone la modelización de esparcimiento de la gota derivado del principio de conservación de la energía y la masa.

El principio de conservación de la energía y de la masa ha sido ampliamente utilizado debido a su simplicidad y su practicidad en el planteamiento de ecuaciones analíticas, pero antes de plantear dichas ecuaciones se ha considerado necesario hacer un nuevo inciso y exponer la secuencia de eventos que tienen lugar durante la deposición de las gotas. Dicha secuencia de eventos puede ser apreciada en la Figura 253, donde se exponen la evolución de la gota cronológicamente tras entrar en contacto con la superficie del sustrato.



**Figura 253:** Ilustración esquemática de la secuencia de eventos que tienen lugar en la deposición de gotas sobre un substrato rígido [290].

Como se puede apreciar en la Figura 253, la deposición estable de las gotas dentro de las condiciones establecidas por Schiaffino y Sonin para sistemas DOD, es decir en el primer cuadrante, pasa por varias etapas. La primera de ellas está influenciada por los efectos dinámicos acordes con las fuerzas inerciales producidas tras el impacto, es en este punto donde se alcanza el diámetro máximo de la huella en caso de que el fluido no moje al substrato, posteriormente debido a la viscosidad del fluido tienen lugar una amortiguación de las oscilaciones y una ralentización del esparcimiento del avance de la línea de contacto y por tanto del diámetro de la gota en el caso de que esta moje al sustrato, a este fenómeno se le conoce como relajación. Posteriormente teniendo en cuenta la cronología de los sucesos, tiene lugar los fenómenos de mojado dominado por la capilaridad, finalmente se alcanza un estado de equilibrio donde en algunos casos da comienzo a los fenómenos de evaporación de los solventes y solidificación de las tintas, estos procesos de cambio de fase a su vez suelen diseñarse teniendo en cuenta dicha cronología pudiendo presentarse en el transcurso de diferentes etapas.

Una vez conocida la cronología de los fenómenos involucrados en la deposición de las gotas, podemos establecer el balance energético en el que se aglutinen dichos fenómenos. Basándonos en el balance energético inicial planteado en la ecuación 3. 349 y resumido en la ecuación 3. 352 podemos ampliar dicho balance involucrando ahora la historia previa a la deposición de la gota que, como se ha dicho anteriormente influye directamente en el ángulo de contacto y por tanto en la interacción líquido-substrato. De esta forma dicho balance se puede expresar como:

$$E_0 = \underbrace{E_{K0} + E_{P0} + E_{S0}}_{\text{Antes del impacto}} = \underbrace{E_{K1} + E_{P1} + E_{S1} + E_D}_{\text{Después del impacto}} \quad 3. 371$$

En donde el subíndice representa el estado inicial y final de la gota 0,1 respectivamente. Así  $E_0$  representa la energía de la gota antes de entrar en contacto con el substrato es decir, cuando está en el vuelo y está constituida por su energía cinética, potencial y su energía superficial ( $E_{K0}$ ,  $E_{P0}$  y  $E_{S0}$  respectivamente). De igual modo, al otro lado de la igualdad se ubican los términos referidos a las energías cinética, potencial, superficial y el trabajo o la energía disipada producto de los esfuerzos viscosos en el esparcimiento de la gota tras el impacto ( $E_{K1}$ ,  $E_{P1}$ ,  $E_{S1}$  y  $E_D$  respectivamente).

Por otra parte, debido a las dimensiones de las gotas, el balance anterior puede verse simplificado despreciando los términos potenciales, ya que en gotas pequeñas con bajos números de Bond como es el caso de los sistemas Inkjet dichos valores no suponen una influencia a tener en cuenta [299]. Por otro lado, durante el esparcimiento de la gota en la etapa de relajación la energía cinética de la gota tiende a cero ya que eventualmente al alcanzar el estado de equilibrio la línea de contacto deja de avanzar hasta detenerse siendo este punto donde se alcanza el diámetro máximo de la huella que por definición hemos llamado estado 1 (suponiendo claro que nos encontremos ante un sustrato mojable por la tinta empleada y siendo ambos sistemas termodinámicamente constantes y químicamente inertes entre sí). Así pues, la ecuación anterior puede verse reescrita como:

$$E_{K0} + E_{S0} = E_{S1} + E_D \quad 3.372$$

En donde la energía cinética de la gota es definible como:  $E_{K0} = 1/2 mv^2$ , teniendo en cuenta que la densidad es:  $\rho = m/V$  y en una gota esférica el volumen de la misma se define como:  $V = \pi\phi_0^3/6$  la energía cinética de la gota puede expresarse como:

$$E_{K0} = \frac{1}{12} \rho \pi \phi_0^3 v^2 \quad 3.373$$

Del mismo modo la energía superficial de la gota antes del impacto es:  $E_{S0} = \gamma_{FL} A_0$  donde  $A_0$  representa la superficie exterior de la gota la cual es definida como:  $A_0 = \pi\phi_0^2$ . Así, la energía superficial de la misma puede expresarse como:

$$E_{S0} = \gamma_{FL} \pi \phi_0^2 \quad 3.374$$

Del otro lado de la igualdad, tras el impacto de la gota con la superficie del substrato el líquido es impulsado radialmente hacia la línea de contacto produciéndose cambios en el volumen de la gota y en su superficie. En primer lugar, distintas observaciones han demostrado que la forma superficial de la gota en su máxima extensión puede variar de una superficie esférica a bajos números de  $Re$  y  $We$ , a una superficie toroidal a medida que aumenta el  $Re$  y el  $We$  [310], [306]. A pesar de esta discrepancia muchos modelos han considerado que la forma final de la gota es la de un disco a modo de simplificación, el cual cumple con el principio de conservación de la masa siempre y cuando ésta no evolucione (evaporación de los solventes) y los fenómenos de cambio de fase no hayan dado inicio. Así el primer término del estado 1 referido a la energía superficial puede ser expresado como

$E_{S1} = S^{LS} A_1$ , donde  $S^{LS}$  representa el coeficiente de expansión o la energía libre cedida por la gota por unidad de área y como se ha descrito anteriormente en la ecuación 3. 354, la cual representa la expresión que gobierna la expansión de la gota en función de un ángulo de contacto y la tensión superficial de la interfase fluido-líquido en superficies ideales, es decir; planas, lisas, no porosas, rígidas, homogéneas e inertes químicamente con la tinta.  $A_1$  por otro lado, representa el área de la huella definida como  $A_1 = \frac{1}{4} \pi \phi_{max}^2$ , siendo  $\phi_{max}$  el diámetro alcanzado de la huella en el estado de equilibrio. Teniendo en cuenta las expresiones anteriores y utilizando la ecuación 3. 354, la energía superficial puede reescribirse como:

$$E_{S1} = [\gamma_{FL} \cdot (\cos(\theta_{eq}) - 1)] \cdot \left(\frac{1}{4} \pi \phi_{max}^2\right) \quad 3. 375$$

Donde  $\theta_{eq}$  representa ángulo de Young o de contacto en equilibrio, aunque muchos autores han propuesto el uso del ángulo de avance [311], [301], [300], como una solución más racional debido al dinamismo de la línea de contacto, esta asunción implica la presencia de una superficie ideal es decir, plana, lisa y homogénea químicamente. Por este motivo y siguiendo las consideraciones propuestas por Ukiwe y Kwok [304] donde aclara que el ángulo de contacto de la gota en el estado de equilibrio en realidad no es ni el ángulo de Young ni el ángulo de avance ya que está sujeto a la irregularidades del sustrato y por tanto, tras su observación apreciaremos el ángulo aparente sujeto a múltiples metaestados de equilibrio superados por la inercia en la etapa dinámica, pese a ello debido a que la expresión 3. 375 proviene de la sustitución de la ecuación de Young y tensiones superficiales en el punto trifásico (sólido-fluido-líquido) mantendremos el  $\theta_{eq}$  por su facilidad de medición. Así pues, tras esta consideración, reordenando la Ec. 3. 372 ésta se puede expresarse ahora como:

$$\left(\frac{1}{12} \rho \pi \phi_0^3 V^2\right) + (\gamma_{FL} \pi \phi_0^2) = - \left[ [\gamma_{FL} \cdot (\cos(\theta_{eq}) - 1)] \cdot \left(\frac{1}{4} \pi \phi_{max}^2\right) \right] + E_D$$

Donde  $E_D$  como se ha comentado anteriormente ha sido calculado de diferente forma por los investigadores a lo largo de los años. Entre ellos el trabajo de Pasandideh-Fard [301] supuso importante avance al refinar el trabajo previo de Chandra y Avedisian [300], en el que se expresa al trabajo viscoso realizado durante la deformación de la gota hasta su equilibrio, como una disipación viscosa en el contorno de contacto de la misma expresándose como:

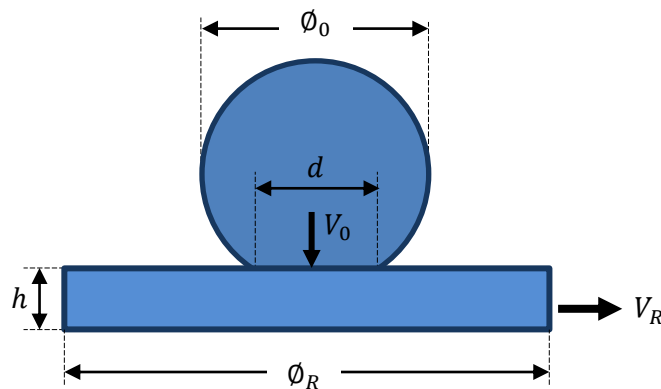
$$E_D = W = \int_0^{t_c} \int_{\Omega} \phi \partial \Omega \partial t \approx \phi \Omega t_c \quad 3. 376$$

Donde  $\Omega$  representa el volumen del fluido viscoso (tinta),  $t_c$  el tiempo de expansión hasta alcanzar el equilibrio y  $\phi$  representa ahora la disipación viscosa, magnitud que puede ser estimado como [300]:

$$\phi \approx \mu \left( \frac{v_0}{l} \right)^2 \quad 3.377$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad absoluta o dinámica del fluido,  $v_0$  representa la velocidad inicial de la gota y  $l$  la longitud característica en dirección vertical, en este sentido Chandra y Avedisian asumieron  $l = h$ , siendo  $h$  la altura del disco (forma de la gotas tras alcanzar el equilibrio ver *Figura 254*), aunque dicha asunción sobreestimaba el valor del diámetro máximo o de equilibrio en gran medida. Pasandideh-Fard en este aspecto propuso utilizar el espesor de la capa límite  $\delta$  en el cálculo de la disipación viscosa, obteniendo la siguiente expresión analítica:

$$\delta = \frac{2\phi_0}{\sqrt{Re}} \quad 3.378$$



**Figura 254:** Modelo planteado por Chandra y Avedisian [300] y refinado por Pasandideh-Fard [301].

Bajo el principio de conservación de la masa podemos decir si  $\dot{m}_0 - \dot{m}_1 = 0$  siendo la densidad del fluido constante y el caudal volumétrico  $\dot{V}_i = A_i v_i$  podemos decir que:

$$\frac{1}{4} \pi d^2 v_0 = \pi \phi_R h v_R \quad 3.379$$

Donde  $\phi_R = f(t_c)$ , y  $v_0, v_R$  la velocidad de impacto de la gota en vertical y la velocidad radial de expansión respectivamente, por otro lado teniendo en cuenta que el fluido no es compresible y por tanto la densidad como su volumen son constantes podemos decir:

$$\frac{1}{6} \pi \phi_0^3 = \pi \phi_{max}^2 h \quad 3.380$$

Es decir, podemos igualar los volúmenes inicial y final de la gota. Por otro lado, debido a que el diámetro  $d$  (ver *Figura 254*) varía tras el impacto de la gota ( $0 < d < \phi_0$ ) este modelo asume  $d \approx \phi_0/2$ . Así, combinando las ecuaciones 3.379 y 3.380 podemos obtener la siguiente expresión:

$$2v_R = \frac{3v_0\phi_{max}^2}{16\phi_R\phi_0} \quad 3.381$$

Donde  $v_R$  como ya se ha comentado representa la velocidad radial de la gota y por tanto la expresión 3. 381 puede ser reescrita como:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = 2v_R = \frac{3v_0\phi_{max}^2}{16\phi_R\phi_0} \quad 3.382$$

Tras resolver la ecuación anterior en donde se define el crecimiento del diámetro de la gota siendo  $\phi_R$  una función del tiempo tenemos:

$$\phi_R(t) = \pm\sqrt{2} \sqrt{C_1 + \left(\frac{3v_0\phi_{max}^2 t}{16\phi_0}\right)} \quad 3.383$$

Dónde:

$$\phi_R(t) > 0 \quad \forall t$$

Y bajo la suposición donde:

$$\phi_R(t); \quad t = 0 \rightarrow \phi_R(t = 0) = \phi_0$$

$$\phi_0 = \sqrt{2}\sqrt{C_1 + 0} \rightarrow C_1 = \frac{\phi_0^2}{2}$$

La ecuación 3. 383 puede ser reescrita como:

$$\frac{\phi_R^2(t)}{2} = \frac{\phi_0^2}{2} + \frac{3}{16} \frac{\phi_{max}^2 v_0 t}{\phi_0}$$

A partir de este punto el modelo desarrollado por *Pasandideh-Fard* adimensionaliza el tiempo con el fin de aportar simplicidad, mediante la ecuación:

$$t^* = t \frac{v_0}{\phi_0} \quad 3.384$$

De esta forma el crecimiento del diámetro de la gota puede ser descrita de la siguiente manera:

$$\phi_R^2(t^*) = \phi_0^2 + \frac{3}{8} \phi_{max}^2 t^* \quad 3.385$$

Así considerando que  $\phi_R(t^*) \geq \phi_0 \forall t^*$  y por tanto el diámetro inicial de la gota es una constante a partir de la cual la huella evoluciona (crece), de manera que adimensional a través de la ecuación anterior se puede establecer indistintamente de las dimensiones iniciales de la gota eyectada que:

$$\frac{\phi_R(t^*)}{\phi_{max}} = \sqrt{\frac{3}{8} t^*}$$

Y por tanto cuando:



$$\phi_R(t^*) = \phi_{max} \rightarrow t^* = \frac{8}{3} \rightarrow t_c = \frac{8\phi_0}{3v_0}$$

Dicho esto y retomando la modelización de Pasandideh-Fard, la expresión 3. 376 puede ser rescrita tomando en cuenta la disipación viscosa aportada por Chandra y Avedisian (Ec. 3. 377) y el uso del espesor de la capa límite (Ec. 3. 378) y junto con la expresión anterior, el trabajo viscoso realizado durante la deformación de la gota hasta su equilibrio puede definirse como:

$$W \cong \phi \Omega t_c = \mu \left( \frac{v_0}{\delta} \right)^2 \left( \frac{1}{4} \pi \phi_{max}^2 \delta \right) \left( \frac{8\phi_0}{3v_0} \right)$$

Expresión que permite al ser introducida en el balance energético inicial (3. 372) obtener una ecuación determinada por los diámetros inicial y final en el que intervienen las energías cinéticas, superficiales y viscosas, dicha expresión se muestra a continuación.

$$\left( \frac{1}{12} \rho \pi \phi_0^3 V^2 \right) + (\gamma_{FL} \pi \phi_0^2) = - \left[ \gamma_{FL} \cdot (\cos(\theta_a) - 1) \right] \cdot \left( \frac{1}{4} \pi \phi_{max}^2 \right) + \left[ \mu \left( \frac{v_0 \sqrt{Re}}{2\phi_0} \right)^2 \left( \frac{1}{4} \pi \phi_{max}^2 \left( \frac{2\phi_0}{\sqrt{Re}} \right) \right) \left( \frac{8\phi_0}{3v_0} \right) \right]$$

Que tras ser reordenada y adimensionalizada mediante los números de Re y We puede ser expresada como:

$$Re = \frac{\rho \phi v_0}{\mu}$$

$$We = \frac{\rho v^2 \phi}{\gamma}$$

$$\frac{(We + 12) \sqrt{Re}}{(3\sqrt{Re}(1 - \cos(\theta_a))) + (4We)} = \left( \frac{\phi_{max}}{\phi_0} \right)^2$$

Teniendo en cuenta que el coeficiente de expansión es:  $\beta = \phi_{max}/\phi_0$ , la ecuación anterior concuerda con la expresión obtenida Pasandideh-Fard la cual se puede apreciar en la expresión 3. 386 que a continuación se expone:

$$\beta^\infty = \frac{\phi_{max}}{\phi_0} = \sqrt{\frac{(We + 12)}{(3(1 - \cos(\theta_a))) + \left(4 \frac{We}{\sqrt{Re}}\right)}} \quad 3. 386$$

La modelización de Pasandideh-Fard ha sido ampliamente testada en un rango de  $26 < We < 641$  y  $213 < Re < 35.339$  aportando resultados con un error inferior al 15% las mayores discrepancias ocurrieron a grandes y pequeños Re (cuando el supuesto de la capa límite ya no es válida, nuestro caso), estimándose en otras publicaciones que:

$$We \gg 12 \rightarrow \beta_{max} = 0,5 Re^{0,25}$$

$$We \rightarrow \infty \rightarrow \beta_{max} = Re^a; \quad 0.167 < a < 0,2$$

Posteriormente ha habido múltiples aportaciones en busca de aumentar la correlación entre los resultados prácticos y las estimaciones teóricas tal y como se muestra en la Figura 254. En este aspecto Ukiwe y Kwok [304], asumieron que en el punto de máximo esparcimiento la gota presenta un perfil de esfera truncada en vez del perfil de un disco cilíndrico, esta aportación aumento la precisión del modelo pero presenta la desventaja de requerir la utilización de un ángulo de contacto dinámico alcanzable solo experimentalmente.

Por otro lado, si bien el modelo de Pasandideh-Fard tiende a sobrestimar el  $\phi_{max}$  alcanzado en la etapa de equilibrio cosa que ha sido observado en múltiples estudios, Van Dam y Le Clerc en el 2004 [296] atribuyeron dicha imprecisión a las pérdidas dinámicas producidas en las oscilaciones iniciales las cuales su modelo no tenían en cuenta, en este aspecto Roisman [310] aportó un modelo teórico en el que incorporo los efectos inerciales. Clanet [305], por otro lado analizo el impacto de una gota en el límite de la menor viscosidad y menor mojabilidad (sobre superficies súper-hidrofóbicas) llegando a la conclusión de que en estas condiciones el coeficiente de esparcimiento puede expresarse en función únicamente del  $We$ .

Posteriormente Son et al. [306] realizaron un estudio donde confirmaron la sobrestimación del  $\phi_{max}$  en el modelo Pasandideh-Fard, y del mismo modo plantearon ajustar dicho modelo mediante las aportaciones de Ukiwe y Kwok, es decir, se asumió que la forma final de la gota no es cilíndrica sino de esfera truncada cuyo ángulo de contacto dinámico está comprendido entre  $\theta_{Re} < \theta_d < \theta_{Av}$ , así el coeficiente de expansión puede reescribirse como:

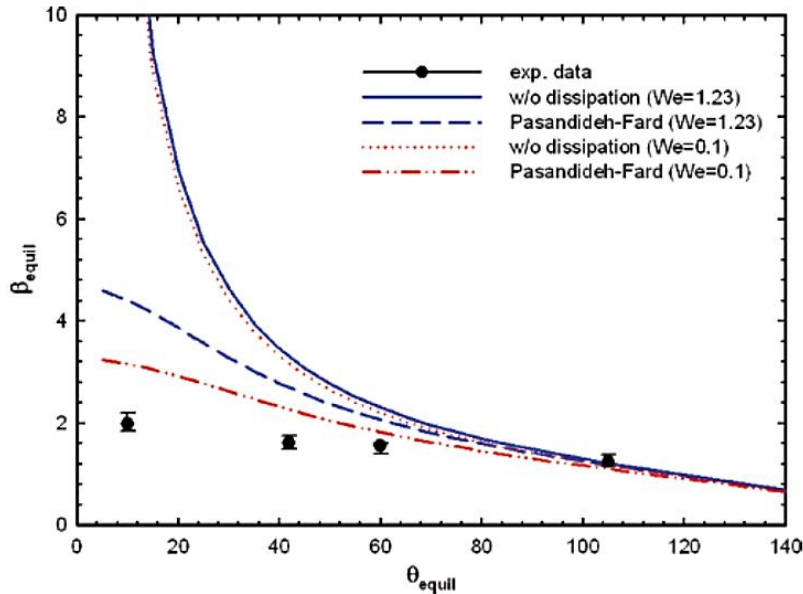
$$\beta^* = \frac{\phi_{max}}{\phi_0} = \sqrt{\frac{(We + 12)}{(3(f_s - \cos(\theta_d))) + \left(4 \frac{We}{\sqrt{Re}}\right)}} \quad 3. 387$$

Donde  $f_s$  corresponde al coeficiente asociado a la superficie de la interficie liquido-fluido expresada como:

$$f_s = 1 + \left(1 - \left(\frac{\cos(\theta_d)}{\cos(90 - \theta_d)}\right)\right)^2$$

El modelo de Ukiwe y Kwok predice el diámetro final de la gota mediante la expresión 3. 388, pero al igual que el modelo de Pasandideh-Fard presenta sobrestimaciones de  $\beta^\infty$  haciéndose más evidente esta desviación a medida que el ángulo de contacto decrece, dicha apreciación puede verse en la Figura 255 tomada de los estudios de Son et al. [306], esta apreciación implica en gotas de dimensiones reducidas como es el caso de los sistemas Inkjet la influencia de las energías superficiales son mayores y la disipación energética en la línea de contacto no se puede despreciar sobre todo cuando nos encontramos con superficies hidrófilas donde el ángulo de contacto es pequeño, lo cual concuerda con las aportaciones de Van Dam y Le Clerc [296].

$$(We + 12)\beta = 8 + \beta^3 \left[ 3(1 + \cos \theta_d) + 4 \frac{We}{\sqrt{Re}} \right] \quad 3. 388$$



**Figura 255:** Comparación entre las estimaciones del modelo de Pasandideh-Fard con la medición experimental a distinto números de Weber, en función del ángulo de contacto en equilibrio [306].

Como se puede apreciar en la Figura 255 a medida que reducimos el ángulo de contacto las estimaciones de la huella tienden a desviarse haciéndose mayores, cosa que es debido a que estos modelos energéticos subestiman la disipación viscosa producto de las energías superficiales en las oscilaciones de la fase dinámica y como ya se ha comentado, éstas poseen una mayor influencia a medida que las gotas son de menor tamaño. Así pues, el ajuste planteado por Son et al. [306], sin querer entrar en modelos numéricos complejos para analizar la etapa dinámica y puesto que las energías cinéticas, superficiales y viscosas no dominan a las inercias en dicha etapa, proponen en la predicción del máximo esparcimiento en vista de la importancia de la energía superficial líquido-sólido ajustar el número de Weber mediante la sustitución de la tensión superficial entre el líquido y el aire por la energía de superficie de la gota en el equilibrio después del impacto de la siguiente manera:

$$We^* = \frac{We}{(f_s - \cos(\theta_d))} \quad 3. 389$$

Tras este ajuste el modelo desarrollado por Son et al. [306] establece una relación entre el  $We^*$  y el coeficiente de expansión  $\beta^\infty$  (ecuación 3. 390), esta nueva modelización presenta una menor desviación y una mejor correlación con las mediciones experimentales en comparación con los modelos anteriores.

$$\ln(\beta^\infty) = 0,09\ln(We^*) + 0,151$$

3. 390

Por otro lado, a continuación se muestra otra modelización basado en el principio de conservación de la masa desarrollado por Van Dam y Le Clerc [296], en el cual nos hemos basado en la estimación de la expansión de la gota cuando éstas son de dimensiones reducidas, siendo este modelo el que se ha utilizado para el desarrollo de los sistema de control del dispositivo de impresión híbrido multimaterial 3D 2D del presente en este trabajo de investigación.

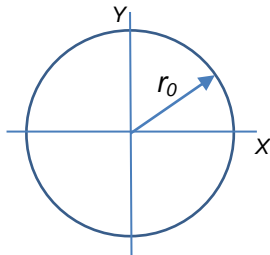
### **2.7.5. Impacto y deposición de gotas de dimensiones reducidas (Sistemas Inkjet DOD)**

Como se ha podido apreciar con anterioridad los fluidos utilizados en sistemas chorro de tinta o sistemas Inkjet suelen tener una densidad relativa de cercana a 1 y una energía superficial inferior a los  $0,1 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ , y en sistemas DOD como es nuestro caso, las gotas suelen tener diámetros inferiores a las 100 micras, es decir  $Bo \ll 1$ , y por otro lado, teniendo en cuenta las condiciones establecidas por Schiaffino y Sonin [294] para obtener una deposición estable de las gotas sobre los substratos rígidos, éstas deben poseer valores bajos de números de Weber y Ohnesorge. Atendiendo a estas características se ha de decir, que el número de estudios y modelos para estas condiciones en particular donde las gotas son de dimensiones muy pequeñas y con bajos valores de  $We$  no son numerosos [168], principalmente debido como ya se ha comentado anteriormente a la gran influencia de las energías superficiales difíciles de cuantificar sobre todo en la fase dinámica amortiguada por la viscosidad del fluido, habiendo sido más ampliamente estudiado en los impacto de gotas de dimensiones milimétricas con números de  $We$  más altos.

Como se ha comentado anteriormente la disipación viscosa producto de las energías superficiales en las oscilaciones en la fase dinámica de los modelos de gotas milimétricas es una de las razones por las cuales los modelos basados en balances energéticos tienden a sobreestimar el coeficiente de esparcimiento en gotas, y en gotas de dimensiones reducidas esta sobre estimación se hace más evidente. Clanet. et al [12] en su estudio del impacto de gotas sobre superficies super-hidrofobicas afín de eliminar la influencia de la mojabilidad, muestra que el esparcimiento máximo es alcanzado a  $We^{0,25}$ . Posteriormente Son et al. [306] modelizaron el comportamiento de la gota basándose en los trabajos de Ukiwe y Kwok. Por otro lado, dejando al margen la histéresis del ángulo de contacto en el proceso de expansión, Van Dam y Le Clerc [296], establecieron un modelo de esparcimiento de la gota en función de ángulo de contacto basada en el principio de conservación de la masa, donde las gotas depositadas alcanzan una forma de esfera truncada y donde debido a las pequeñas dimensiones de las gotas  $Bo \ll 1$  las fuerzas gravitacionales son despreciables. Así pues, el modelo de Van Dam y Le Clerc expresa el coeficiente de expansión mediante la Ec. 3. 393 mostrada a continuación.

Por otro lado, antes de mostrar dicha expresión afín de facilitar la comprensión de dicho modelo se ha considerado oportuno hacer un pequeño inciso y establecer los términos volumétricos en los cuales se sustenta.

- Volumen de una esfera:

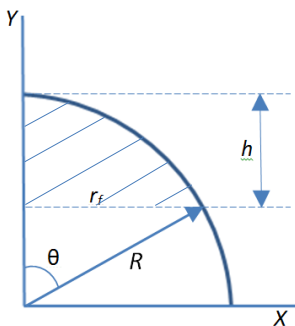


$$x^2 + y^2 = r_0^2$$

$$V = \int_a^b \pi (f(x))^2 dx \rightarrow V_{esf.} = \frac{\pi}{6} \phi_0^3 \quad 3. 391$$

**Figura 256:** Representación de una circunferencia en analogía a la forma de la gota en su estado previo al impacto [Fuente: Elaboración propia].

- Volumen de un casquete esférico:



$$x^2 + y^2 = R^2$$

$$x^2 + (R - h)^2 = R^2$$

$$V = \int_{R-h}^h \pi (R^2 - y^2) dy \rightarrow V_{casq.esf.} = \pi \left( R^2 h - \frac{h^3}{3} - \left( (R^2 (R - h)) - \frac{(R-h)^3}{3} \right) \right)$$

$$h = R(1 - \cos(\theta)) \quad ; \quad R = \frac{r_f}{\text{sen}(\theta)}$$

**Figura 257:** Representación de casquete esférico [Fuente: Elaboración propia].

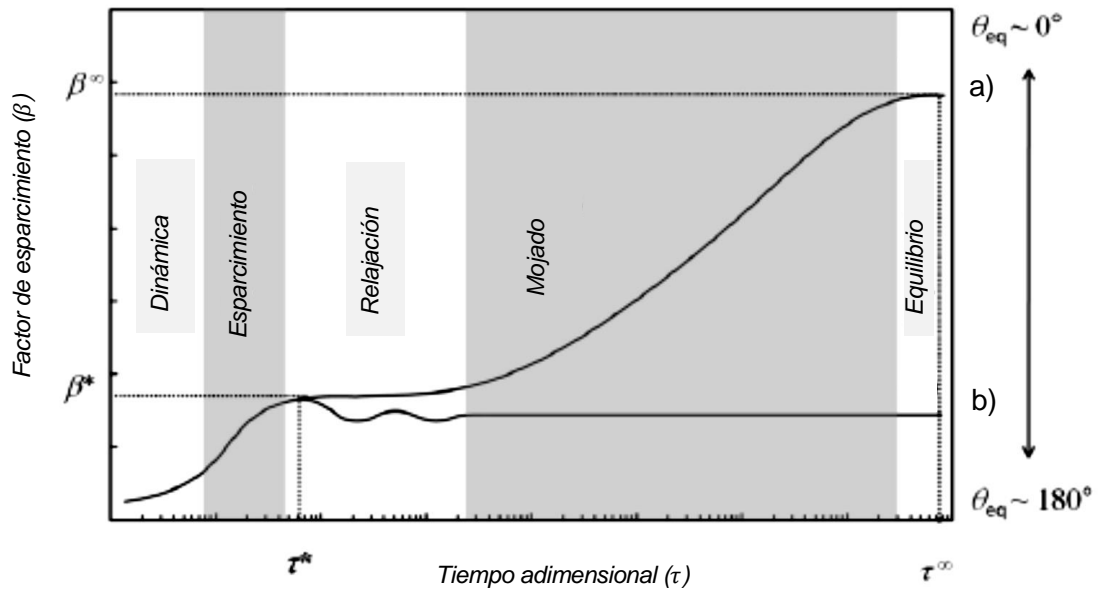
$$V_{casq.esf.} = \frac{\pi}{3} \frac{r_f^3}{\text{sen}^3(\theta)} (1 - \cos(\theta))^2 (3 - (1 - \cos(\theta))) \quad 3. 392$$

Así pues, basándonos en el principio de conservación de la masa y por tanto del volumen utilizado por Van Dam y Le Clerc en su modelización donde  $V_{esf.} = V_{casq.esf.}$ , el coeficiente de expansión puede ser expresado de forma sencilla como:

$$\beta^\infty = \frac{\phi_{max}}{\phi_0} = \sqrt[3]{\frac{8}{\tan\left(\frac{\theta_{eq}}{2}\right) \left(3 + \tan^2\left(\frac{\theta_{eq}}{2}\right)\right)}} \quad 3. 393$$

Por otro lado, como se ha podido apreciar en las distintas modelizaciones comentadas anteriormente sin importar las dimensiones de las gotas en el cálculo del coeficiente de expansión no necesariamente tiene por que involucrar al estado inicial y el estado final de la gota, como comenta Rein [312], el coeficiente de esparcimiento podría ser expresado en términos de diámetros al final de cada fase en la secuencia de eventos, en este aspecto la Figura 258 ilustra esquemáticamente la evolución del coeficiente de expansión en relación a

un tiempo adimensional hasta alcanzar su valor máximo en la fase de equilibrio, teniendo en cuenta la afinidad del fluido con el sustrato es decir, la mojabilidad.



**Figura 258:** Representación esquemática de la evolución del coeficiente de expansión en función de la mojabilidad en un tiempo adimensionalizado a) sustratos hidrófilos b) sustratos hidrofóbicos [313].

Como se puede apreciar en la ilustración anterior el coeficiente de expansión en la superficies hidrófobas donde el ángulo de contacto en equilibrio es superior a  $\pi/2$ ,  $\beta^\infty$  sufre una disminución al tras superar el relajamiento lo cual quiere decir, que debido a que el líquido no moja a la superficie este retrocede disminuyendo su huella y por tanto reduciendo el área de contacto. De manera inversa, cuando nos encontramos ante un sustrato hidrófilo ( $\theta_{eq} > \pi/2$ ) por capilaridad tras el impacto y la transición dinámica la gota, ésta se esparce aumentando su área de contacto y por tanto el coeficiente de expansión hasta el límite definido como  $\beta^\infty$ .

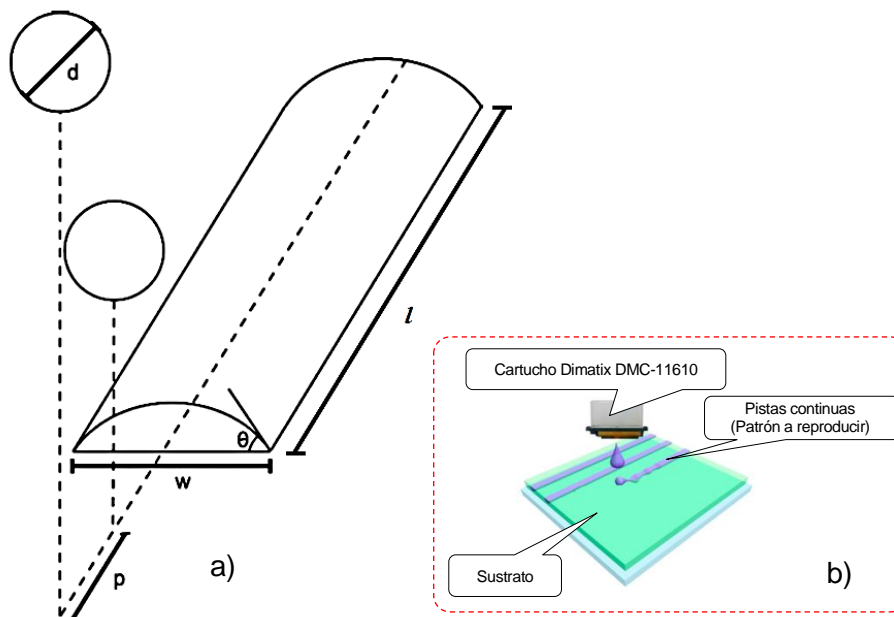
Por otro lado, es necesario comentar que pese a que la Ec. 3. 393 defina el límite máximo de esparcimiento, éste está sujeto al ángulo de contacto, el cual como ya se ha comentado es móvil, solo que conceptualmente en el límite dicho ángulo dinámico tomará el valor del ángulo de equilibrio global siempre y cuando consideremos a la superficie como ideal.

### 2.7.6. Reproducción de líneas y patrones de forma estable, mediante la deposición de gotas de dimensiones reducidas

En los últimos años con el desarrollo de la sustancia impresa y la atribución a ésta de nuevas funcionalidades ha generado un interés notable en los sistemas Inkjet materializándose en una intensa investigación y ella el desarrollo de nuevas aplicaciones y

en campos muy dispares desde la reproducción de geometrías tridimensionales a dispositivos electrónicos o tejidos en el campo de los biomateriales y la medicina.

A diferencia de los sistemas Inkjet tradicionales para aplicaciones gráficas donde los patrones se constituyen mediante la deposición discreta y aislada de gotas (gotas individuales separadas), en estas nuevas aplicaciones las gotas a menudo requieren de su coalescencia, es decir, para poder generar línea o patrones ya sean en 2D u objetos en 3D, las gotas han de estar en cierta medida solapadas y fusionadas unas con otras afin de asegurarse la continuidad entre ellas, sin que ello cree inestabilidades que afecten a la reproducción de los patrones. Por otro lado, debido a que las piezas finales son elementos sólidos todos los mecanismos y la fenomenología asociada a la deposición de las gotas deben llevarse a cabo antes de los procesos de cambio de fase. Así, para que la reproducción de los patrones, imágenes o mediante la superposición de capas objetos y piezas tridimensionales se realice de forma exitosa es imprescindible la comprensión de los requisitos necesarios para inicialmente reproducir una línea y/o patrón bidimensional de forma estable.



**Figura 259:** Relación tenida en cuenta en la modelización de la anchura de la pista final [314] a), Esquema del proceso desde un punto de vista general b)

[Fuente: elaboración propia].

Continuando con el modelo de Van Dam y Le Clerc y en línea con el criterio de la conservación de la masa y por tanto del volumen en las etapas de deposición ( $\rho = cte$ ), Smith et. Al [315] desarrollaron un modelo capaz de predecir el ancho del cordón teniendo en cuenta el ángulo de contacto, así mediante la deposición de gotas adyacentes las cuales

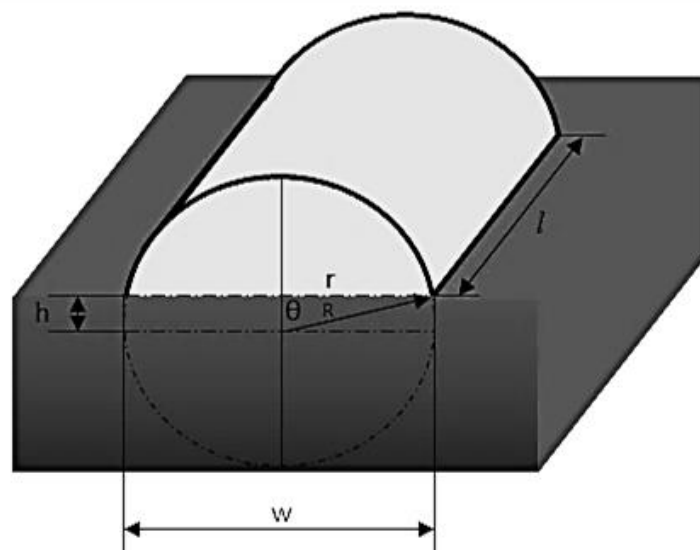
tienden coalescer (unirse) un tren de gotas formará una línea o un cordón lo cual puede expresarse de la siguiente manera:

- a) Teniendo en cuenta la conservación la masa y puesto que la densidad es constante tenemos:

$$V_0 N = V_f \quad 3.394$$

Donde  $N$  representa el número de gotas y  $V_0, V_f$  el volumen de la gota y el volumen final del cordón respectivamente, definibles como:

$$V_0 = \frac{\pi}{6} \phi_0^3 \quad ; \quad V_f = \left[ (\theta R^2) - \left( \frac{W R \cos(\theta)}{2} \right) \right] l$$



**Figura 260:** Representación esquemática de un cordón [Fuente: elaboración propia].

Y teniendo en cuenta que  $\text{sen}(\theta) = \frac{r}{R}$  ;  $\text{cos}(\theta) = \frac{R-h}{R}$  ;  $W = 2r = \phi_f$  (ver Figura 260), la expresión 3.394 puede expresarse como:

$$\left( \frac{\pi}{6} \phi_0^3 \right) N = \left[ \left( \frac{\theta \phi_f^2}{4 \text{sen}^2(\theta)} \right) - \left( \frac{\phi_f^2 \text{cos}(\theta)}{4 \text{sen}(\theta)} \right) \right] l \quad 3.395$$

- b) La distancia entre las gotas depositadas secuencialmente (drop spacing) puede definirse mediante la relación  $P = l/N$ .
- c) Por otro lado, la anchura de un cordón ( $w$ ) generado mediante la deposición de un tren de gotas establece que siempre que el líquido moje y no exista retroceso de la línea de contacto  $W(t) \geq \phi_f$ , en este aspecto para que la reproducción del cordón sea estable mediante gotas colocadas a una distancia  $P$ , la anchura del cordón puede expresarse como [315]:



$$W = \phi_f = \sqrt{\frac{2\pi\phi_0^3}{3P\left(\frac{\theta_{eq}}{\text{sen}^2(\theta_{eq})} - \frac{\cos(\theta_{eq})}{\text{sen}(\theta_{eq})}\right)}} \quad 3. 396$$

Donde la anchura del cordón ( $W$ ) puede ser adimensionalizada mediante el coeficiente de expansión  $\beta$  de la siguiente forma:

$$W^* = \frac{W}{\beta\phi_0} = \sqrt{\frac{2\pi\phi_0}{3P\beta^2\left(\frac{\theta_{eq}}{\text{sen}^2(\theta_{eq})} - \frac{\cos(\theta_{eq})}{\text{sen}(\theta_{eq})}\right)}} \quad 3. 397$$

Así la expresión anterior es similar a la obtenida por Schiaffino y Sonin [316], Dunieveld [317] y Stringer and Derby [318]. Por otro lado, la expresión 3. 396 puede ser reordenada con el objetivo de definir el máximo drop spacing asumible, para conseguir una reproducción estable de los cordones líquidos. De manera que, el máximo drop spacing puede expresarse como:

$$P_{max} = \frac{2\pi\phi_0}{3\beta^2\left(\frac{\theta_{eq}}{\text{sen}^2(\theta_{eq})} - \frac{\cos(\theta_{eq})}{\text{sen}(\theta_{eq})}\right)} \quad 3. 398$$

De igual modo, el máximo drop spacing asumible ( $P_{max}$ ) puede a ser adimensionalizado utilizando la misma normalización anterior quedando de la siguiente forma:

$$\left(\frac{P_{max}}{\beta\phi_0}\right) = \frac{2\pi}{3} \left( \frac{1}{\beta^3\left(\frac{\theta_{eq}}{\text{sen}^2(\theta_{eq})} - \frac{\cos(\theta_{eq})}{\text{sen}(\theta_{eq})}\right)} \right)$$

Así el drop spacing máximo asumible adimensional puede re-expresarse de forma sencilla como:

$$P_{max}^* f(\theta_{eq}) = \frac{2\pi}{3} \quad 3. 399$$

Donde;

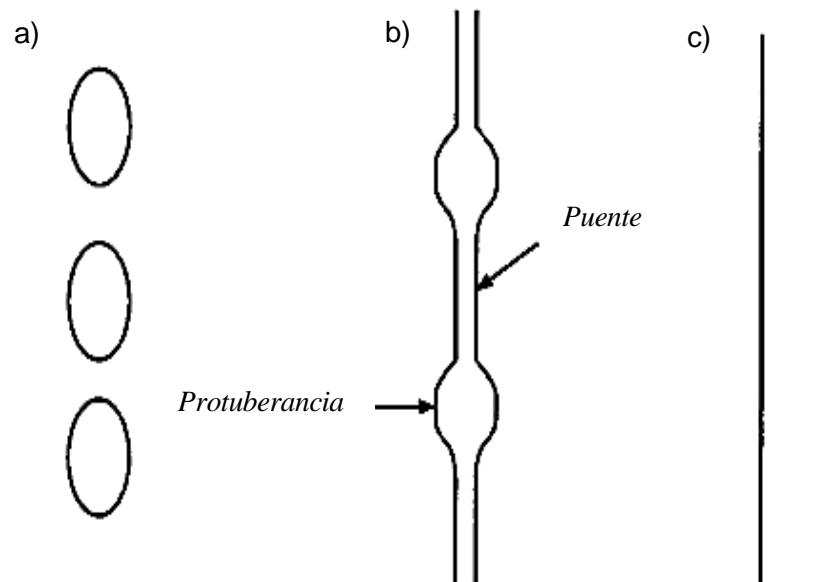
$$f(\theta_{eq}) = \beta^3 \left( \frac{\theta_{eq}}{\text{sen}^2(\theta_{eq})} - \frac{\cos(\theta_{eq})}{\text{sen}(\theta_{eq})} \right) \quad 3. 400$$

De esta forma, mediante la expresión anterior (3. 399) podemos establecer las condiciones necesarias para reproducir líneas y patrones estables con líneas de contacto paralelas y de un ancho determinado, mediante la deposición de un tren de gotas adyacentes las cuales al interactuar y por efecto de la coalescencia formaran dichas líneas continuas (dos gotas juntas fusionadas al unirse tienden a generar un casquete esférico mayor el cual tiende a minimizar su energía libre y por tanto su superficie).

La ecuación (3. 399) anterior nos lleva a las siguientes conclusiones:

- a.  $P_{real} > \phi_f \rightarrow$  Gotas separadas pistas no conductoras.
- b.  $P_{max} < P_{real} < \phi_f \rightarrow$  Pistas conductoras, pero de perfil irregular (Aparecen gotas unidas por puentes).
- c.  $P_{real} \leq P_{max} \rightarrow$  Pistas estables con líneas de contacto paralelas, regulares y conductoras.
- d.  $P_{real} \ll P_{max} \rightarrow$  Pistas conductoras más anchas con irregularidades.

Así pues, como podemos apreciar nos podemos encontrar con 4 posibles situaciones en donde todas ellas depende de la forma en que las gotas han sido depositadas, pero a su vez dependen de la afinidad fluido-sustrato al estar influenciado por el ángulo de contacto. Tres de estas posibles situaciones pueden verse representadas claramente en la imagen de a continuación tomada del trabajo de Duineveld [317].



**Figura 261:** Representación esquemática del comportamiento de un tren de gotas depositadas secuencialmente de forma adyacente con el objeto de reproducir líneas (cordones). a) Gotas separadas por un exceso en el drop spacing (pista no continua), b) Pistas conductoras pero de perfil irregular debido a que el drop spacing no supera al valor crítico, c) Drop spacing dentro del rango y por tanto, pistas estables con líneas de contacto paralelas, regulares y conductoras [317].

Por otro lado, Davis 1980 [319], estudio el origen de la inestabilidad de un cordón o línea de gotas, estableciendo como se resume más adelante que éstas dependen de las condiciones de contorno de la gotas al impactar con el sustrato. Duineveld [317] modelizo dicho fenómeno y posteriormente Stringer y Derby [318] adaptó dicho modelo obteniendo una expresión analítica que define el origen de las inestabilidades, dicho modelo se resume a continuación.

En el caso donde  $P_{real} < P_{max}$  donde se produce una unión entre las gotas con puentes de ancho  $W = \beta\phi_0$  y por tanto supone una línea estable sin irregularidades, Duineveld propuso que esta morfología ocurre a una escala de tiempo muy inferior al del esparcimiento por capilaridad, es decir, las gotas impactan coalescen y posteriormente se esparcen. Así pues, considerando que existe un caudal  $\dot{V}$  impulsado por una diferencia de presión indistintamente de su anchura entre la gota recién llegada y el cordón, donde si  $\dot{V} \gg \dot{V}_a$  siendo  $\dot{V}_a$  el caudal aportado por la deposición de una gota. Cada nueva gota depositada preferirá fluir a lo largo del cordón, es decir allí donde exista menos presión en lugar de extender el cordón. El análisis de Duineveld asume que  $\dot{V}_a$  es mucho más lento que el flujo axial del cordón, así:

$$K_1 \dot{V}_a < \dot{V} \quad 3.401$$

Donde  $K_1$  es una constante mayor que 1 introducida convenientemente, la cual posteriormente se tendrá en cuenta. Por otro lado, teniendo en cuenta que caudal es sección por velocidad la esta puede expresarse como:

$$\dot{V}_a = V_d f \quad 3.402$$

Donde  $f$  representa la frecuencia a la que el cartucho generación las gotas y  $V_d$  el volumen de las mismas, así teniendo en cuenta que:

$$V_d = \frac{\pi}{6} \phi_0^3 ; \quad f = \frac{v_t}{P}$$

Donde  $v_t$  representa la velocidad relativa de la gota respecto al sustrato es decir, la velocidad horizontal de las gotas al impactar en el sustrato (velocidad de desplazamiento del carro de impresión menos la desaceleración que el rozamiento del aire induce a las gotas en su trayectoria parabólica) y  $P$  representa el drop spacing utilizado (parámetros de impresión), la ecuación anterior puede describirse como:

$$\dot{V}_a = \frac{\pi \phi_0^3 v_t}{6P}$$

Por otro lado, el caudal del cordón puede ser expresado mediante la ecuación de Berger 1963 [320] adaptada por Duineveld de la siguiente forma:

$$\dot{V} = \frac{2s \Delta P S^2}{\mu l_r} \quad 3.403$$

Donde  $\Delta P$  representa la diferencia de presión entre las protuberancias y los puentes,  $S$  define el área o sección de los puentes,  $l_r$  la longitud del puente y  $s$  representa el factor de forma desarrollado por Sparrow y Haji-Sheikh [321] el cual se define como:

$$s = \frac{\theta_2 - \text{sen}(\theta_2) \cos(\theta_2)}{8(\text{sen}(\theta_2 + \theta_2))^2} \quad 3.404$$

Donde  $\theta_2$  representa el ángulo de contacto dinámico del puente si las protuberancias o las inestabilidades tienen lugar a  $\theta_2 < \theta_a$ . Con el objetivo de eliminar las fuerzas capilares en el interior de los puentes puestos que éstos tienen lugar después, en otro intervalo temporal, en la modelización de Stringer y Derby se asume que el valor crítico para que el flujo axial domine al de las perturbaciones es:  $\theta_2 = \theta_a$ . Por otro lado, la diferencia de presión entre las protuberancias y los puentes en este modelo de Stringer y Derby se basa en la ecuación de Young-Laplace (3. 334), es decir:

$$P = \gamma_{LF} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Donde para un cordón con perfil de esfera truncada y longitud  $l$ ,  $R_2 = \infty$  y  $r_f = R_1 \text{sen}(\theta_a)$ , así la ecuación anterior puede re-expresarse como:

$$P = \frac{2\gamma_{LF} \text{sen}(\theta_a)}{\phi_f}$$

De forma que, la diferencia de presión entre las protuberancias y los puentes puede definirse como:

$$\Delta P = P_w - P_{\beta\phi_0} = 2\gamma_{LF} \text{sen}(\theta_a) \left( \frac{1}{w} - \frac{1}{(\beta\phi_0)} \right) \quad 3. 405$$

Siendo  $P_w$  la presión alusiva a la protuberancia y  $P_{\beta\phi_0}$  al puente. Así teniendo en cuenta la adimensionalización del ancho del cordón  $w^*$  y teniendo en cuenta que la sección o área del puente se puede expresar como  $S = \pi\phi_0^3/6P$ , la ecuación 3. 403 que define el caudal del cordón puede expresarse como:

$$\dot{V} = \frac{4S}{\mu l_r} \left( \frac{2\gamma_{LF} \text{sen}(\theta_a)(w^* - 1)}{w^* \beta \phi_0} \right) \left( \frac{\pi\phi_0^3}{6P} \right)^2 \quad 3. 406$$

La longitud del puente ( $l_r$ ) depende de muchos factores en el modelo de Duineveld mientras que en el modelo de Stringer y Derby se asume que dicho valor es igual al drop spacing  $P$ . Así pues, volviendo a la imposición inicial de la inecuación 3. 401 esta puede re-expresarse como:

$$K_1 \left( \frac{\pi\phi_0^3 v_t}{6P} \right) < \frac{4S}{\mu l_r} \left( \frac{2\gamma_{LF} \text{sen}(\theta_a)(w^* - 1)}{w^* \beta \phi_0} \right) \left( \frac{\pi\phi_0^3}{6P} \right)^2$$

De igual modo, la inecuación anterior puede ser adimensionalizada utilizando la misma normalización anterior quedando de la siguiente forma:

$$v_t^* = \left( \frac{\mu v_t}{\gamma_{LF}} \right) > \left( \frac{4\pi}{3} \frac{S \text{sen}(\theta_a) \left( \sqrt{\frac{2\pi}{3P^* f(\theta_a)}} - 1 \right)}{(P^*)^2 \beta^3 K_1 \sqrt{\frac{2\pi}{3P^* f(\theta_a)}}} \right)$$

Donde  $s, \beta, f(\theta_a)$  dependen del ángulo de contacto de avance y donde  $v_t^*$  representa la velocidad transversal adimensional la gota o del carro Inkjet respecto al sustrato una vez la

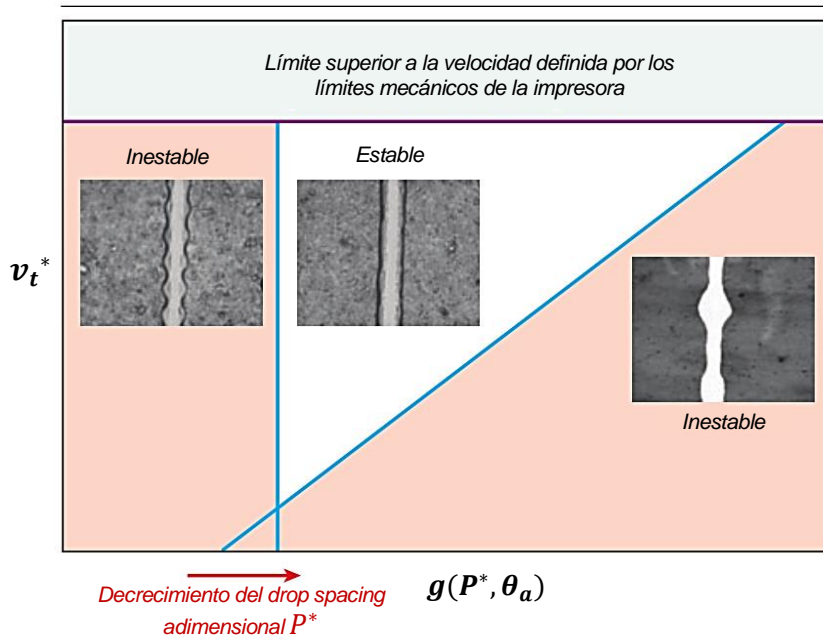
desaceleración inducida por el rozamiento del aire ha sido tenida en cuenta ( $V_{xij}$  de la modelización de la trayectoria para el incremento  $i$  final de la iteración  $j$  final). Así la inecuación anterior proveniente de la expresión 3. 401 se puede nuevamente reexpresar de forma sencilla como:

$$v_t^* > g(P^*, \theta_a) \tag{3. 407}$$

Donde  $P^*$  es el drop spacing adimensional en dirección x bajo los eje del equipo Nhibrid32D y  $\theta_a$  es el ángulo de contacto de avance:

$$g(P^*, \theta_a) = \left( \frac{4\pi S \operatorname{sen}(\theta_a) \left( \sqrt{\frac{2\pi}{3P^* f(\theta_a)}} - 1 \right)}{3(P^*)^2 \beta^3 K_1 \sqrt{\frac{2\pi}{3P^* f(\theta_a)}}} \right) \tag{3. 408}$$

Las modificaciones aportadas al modelo de Duineveld por Stringer y Derby hacen de ésta una herramienta simple y aplicable en la definición de los parámetros de impresión necesarios para la reproducción de cordones continuos estable o patrones bidimensionales mediante la deposición secuenciada de trenes de gotas. La cual tiene en cuenta la velocidad lineal ( $V_x$ ), el drop spacing, el ángulo de contacto de avance y las características reológicas de las tintas funcionales empleadas así como las características del sustrato. Por otro lado la representación gráfica de este modelo permite establecer un mapa o diagrama de requerimientos donde se representa los límites que delimitan la aparición de las inestabilidades (ver Figura 262).



**Figura 262:** Mapa de la estabilidad de los cordones reproducidos mediante la deposición de gotas por sistemas Inkjet, modelo de Stinger y Derby [318].

En la Figura 262 se representa gráficamente en escala logarítmica la inecuación 3. 407 la cual nos genera 3 límites. En primer lugar, un límite vertical éste representa la máxima velocidad asumible por el cabezal Inkjet a nivel mecánico. En segundo lugar se aprecia un límite horizontal el cual representa el valor límite máximo del drop spacing, es decir cuando en vez del ángulo de avance se emplea el ángulo de equilibrio y por tanto nos encontramos a un Drop spacing máximo ( $P_{max}$ ) a la izquierda de este límite los cordones serían inestables y en el caso extremo discontinuos (caso a), posteriormente y debido a que la función  $g(P^*, \theta_a)$  crece con el decrecimiento del drop spacing a izquierda de dicho límite anterior y a la derecha del límite  $g$  nos encontramos que esta función establece la fenomenología del caso b ( $P_{max} < P_{real} < \emptyset_f$ ) donde tendríamos cordones continuos pero inestables, y a la izquierda de este nuevo límite diagonal ( $g$ ) una vez superado el límite horizontal (Zona blanca) corresponde al caso c ( $P_{real} < P_{max}$ ), es decir nos encontraríamos dentro del rango estable. Por otro lado, la función  $g(P^*, \theta_a)$  muestra que para un ángulo de contacto de avance fijo (afinidad fluid-substrato constante) ésta es invariable y por tanto, el tercer límite mantiene su inclinación para todo drop spacing. De igual modo, para un drop spacing fijo caso anterior (límite horizontal) a menor ángulo de contacto la línea vertical se desplaza hacia la izquierda, es decir, supone que para un sustrato más hidrófilo (mayor mojabilidad) nos solicita un drop spacing mayor para obtener líneas estables y del mismo modo en el caso inverso menos drop spacing para sustratos más hidrófobos. Por último, en el caso de que superemos el límite inclinado (hacia la derecha) y por tanto la reproducción de los cordones muestren inestabilidad por exceso ésta corresponde al caso d donde  $P_{real} \ll P_{max}$  teniendo en cuenta claro está, la velocidad trasversal de las gotas consecuencia del desplazamiento del carro de impresión.

A modo de resume y con el objetivo de consolidar los conceptos descritos anteriormente a continuación repasamos el modelo utilizado en este último apartado y en el cual se sustenta el control de sistema de impresión híbrido multimaterial 3D 2D del presente trabajo de investigación.

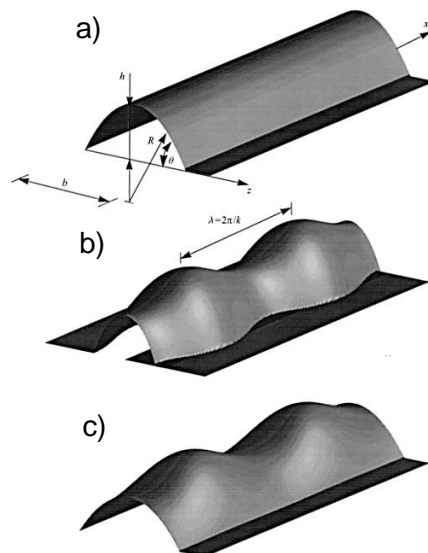
Como ya se ha comentado la impresión Inkjet se realiza mediante el solapamiento parcial de gotas adyacentes las cuales tienden a coalescer (unirse). Así un tren de gotas formará una línea o un patrón, cuando una gota cae suficientemente cerca de otra, se lleva a cabo esta unión formando una gota mayor, la cual tiende a minimizar su energía libre y por tanto su superficie exterior, modificando su forma, ángulo de contacto y el tamaño y forma de la huella (modificación de la línea de contacto), proceso que debe tener lugar antes de que llegue la siguiente gota. Se ha de aclarar que en los modelos tenidos en cuenta, éste proceso de coalescencia tiene lugar en una escala temporal mucho menor a los procesos de capilaridad y cambios de fase mucho más lentos.

En este aspecto se sabe que la capacidad de reproducir líneas o patrones estables mediante la deposición controlada de trenes de gotas sobre un sustrato plano y

homogéneo depende de las condiciones de contorno de la gota. Davis 1980 [319], consideró que la inestabilidad de un cordón o línea de gotas se pueden dar 3 posibles condiciones de contorno:

- El ángulo de contacto ( $\theta$ ) es fijo, y la línea de contacto es inestable y libre de movimiento para todo ángulo de contacto.
- El ángulo de contacto ( $\theta$ ) es una función de la velocidad de la línea de contacto con un valor límite a velocidad cero.
- El ángulo de contacto ( $\theta$ ) es libre de cambiar pero la línea de contacto es fija.

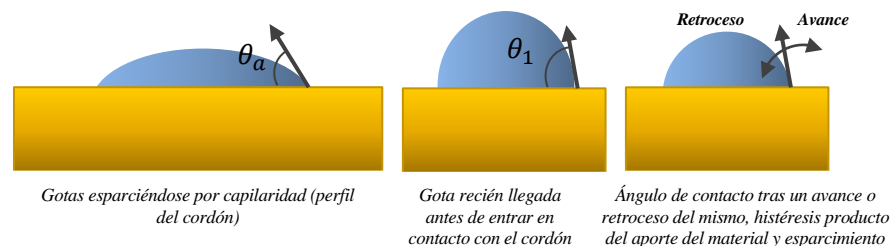
En los casos a y b los cordones, patrones o líneas se ven sometidos a una inestabilidad de Rayleigh con la complejidad adicional introducida por la línea de contacto líquido-sustrato. Si bien el caso a donde el ángulo de contacto es fijo y la línea de contacto es móvil no ha sido encontrado en la práctica, el caso b si se ha podido estudiar y verificar en profundidad y gracias al modelo de Stinger y Derby [318] el resultado de ambas situaciones quedan contempladas. En el caso c, Davis [319] estableció que teóricamente un cordón con líneas de contacto fijas puede ser estable siempre que su ángulo de contacto  $\theta < \pi/2$ . Esta condición predicha por Davis fue estudiada y confirmada posteriormente mediante una verificación experimental realizada por Schiaffino y Sonin [294], en donde se utilizó gotas de cera caliente depositadas sobre un sustrato frío (debido a un cambio de fase sumamente rápido no existe movimiento de la línea de contacto). Por otro lado, también estudiaron el comportamiento de las gotas de agua al intentar reproducir cordones y confirmaron la inestabilidad predicha por Davis en los casos a y b (ver Figura 261).



**Figura 263:** Comportamiento del fluido en la reproducción de líneas. a) Reproducción de un cordón sin perturbaciones (caso b idealizado), b) Cordón inestable con ángulo de contacto fijo y línea móvil (caso a), c) Cordón de línea de contacto fija y ángulo móvil (caso c) [295].

Por otro lado, Duineveld [317] investigó el comportamiento de las gotas depositadas por sistemas Inkjet sobre un rango de diferentes sustratos con diferentes ángulos de contacto, observando que la inestabilidad ocurre en las líneas o cordones cuando existe una histéresis significativa entre los ángulos de contacto de avance ( $\theta_{av}$ ) y de retroceso ( $\theta_{re}$ ) y por tanto cuando la línea de contacto es móvil. Es decir, en los casos b y c en donde su modelo consideraba las irregularidades como una consecuencia de los posibles caminos que pueden llegar a tomar una gota recién depositada al momento de interactuar con el borde delantero del cordón o línea de las gotas líquidas fusionadas. Ya que, si el esparcimiento por capilaridad es relativamente lento y ocurre en un intervalo de tiempo distinto, la gota caída en el frontal de la línea tendrá inicialmente una curvatura mayor por tanto una mayor presión hidrostática que el cordón y al entrar en contacto con éste parte de la tinta fluirá de la parte delantera hacia atrás a lo largo del cordón preexistente.

Dicho comportamiento tiene lugar si la velocidad de deposición de las gotas no es superior a la velocidad con que la difusión o el esparcimiento capilar se llevan a cabo, de esta forma la reducción de la curvatura de la gota recién depositada se realiza sin irregularidades. Así pues, el modelo de Duineveld establece que si fruto de la llegada de las gotas, el ángulo de contacto sobrepasa los límites establecido por Davis en la condición c ( $\theta < \pi/2$ ) se producirá un abultamiento y la línea dejara de ser estable, crecerá y como resultado se producirá una irregularidad (Bajos drop spacing y bajas velocidades ( $v_t$ ) para un régimen constante de generación de gotas). Por otro lado, Duineveld también apreció que se puede reproducir líneas estables en las condiciones de línea de contacto móvil, a bajos valores de ángulos de retroceso aunque no siempre, pudiendo presentarse protuberancias regularmente a lo largo de la línea impresa (ver Figura 264).

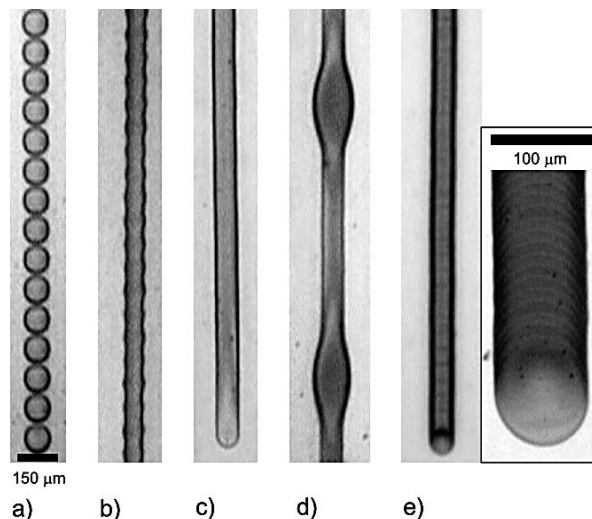


**Figura 264:** Comportamiento de las gotas depositadas con objeto de reproducir patrones o líneas [Fuente: Elaboración propia].

Las observaciones de Duineveld indicaron que existe un ancho máximo ( $W$ ) alcanzable por parte del cordón o la línea. Posteriormente Smith et. Al [315], partiendo del trabajo de Duineveld [317] estudiaron las condiciones de necesarias para reproducir líneas estables mediante el solapamiento parcial de gotas, los cuales a bajos números de Bond presentan un perfil de casquete esférico pudiendo determinarse su anchura asumiendo el principio de conservación de la masa del modelo de Van Dam y Le Clerc [296]. Así despreciando los efectos gravitacionales ( $Bo \ll 1$ ) y teniendo en cuenta que los mecanismos de solidificación



o cambio de fase ocurren a un intervalo de tiempo muy superior Soltman y Subramanian [322] llevaron a cabo estudios experimentales sobre la formación de las pistas mediante la deposición de gotas por sistemas Inkjet cuyas observaciones fueron consistentes con los trabajos de Duineveld y Smith et. Al (ver Figura 265).



**Figura 265:** Imagen del comportamiento de un tren de gotas depositadas secuencialmente de forma adyacente con el objeto de reproducir líneas (cordones). a) Gotas aisladas (pista no continua) por un exceso de drop spacing, b) Drop spacing inferior al valor crítico y por tanto pistas conductoras pero de perfil irregular, c) Pistas estables y continuas debido a un drop spacing dentro del rango, d) Pistas irregulares con protuberancias debido a drop spacing muy pequeños, e) Solapamiento de las gotas en forma de monedas solapadas debido a un aumento en la velocidad de los mecanismos de cambio de fase [322].

En la Figura 265 tomada del trabajo de Soltman y Subramanian [322], se puede apreciar que a largos drop spacing no hay solapamiento de gotas formándose gotas individuales aisladas (a). A menor drop spacing las gotas comienzan a coalescer formándose un patrón irregular más estrecho que la huella de una gota individual (b). Con un drop spacing mayor y dentro del rango crítico ya se logran reproducir cordones estables con líneas de contacto paralelas, regulares (c). Y reduciendo aún más el drop spacing se puede apreciar la aparición de protuberancias periódicas en los puntos donde se sobrepasa el ángulo de contacto límite establecido por Duineveld (d). Finalmente, tras calentar el substrato hasta un punto donde los mecanismos de solidificación tengan lugar en un tiempo inferior al periodo de eyección de las gotas se aprecia que cada gota seca individualmente sin tener en cuenta el solapamiento formando un patrón de monedas solapadas, donde el drop spacing no tiene efecto en la anchura del cordón (e).

Este trabajo demostró que existen 2 límites para la aparición de las inestabilidades respecto al drop spacing (por defecto y por exceso) incluso en las condiciones establecidas por Davis [319], donde Soltman y Subramanian comentaron que las inestabilidades propuestas por

Duineveld [317] eran dinámicas y por tanto en la estabilidad de los cordones por deposición de gotas debía tenerse en cuenta tanto el drop spacing como la velocidad a la que éstas se depositan. Dicha reflexión dio origen a que Stringer y Derby [318] bajo el principio de conservación de la masa propuesto en el modelo de Van Dam y Le Clerc [296], teniendo en cuenta la adimensionalización aportada por Schiaffino y Sonin [295] reformularan el modelo de Duineveld [317] con el cual poder predecir la formación de las inestabilidades en los cordones, fijando unas condiciones con las cuales formar un mapa de estabilidad (ver Figura 262). Unificándose así el criterio de gota con línea fija y ángulo de contacto móvil con el criterio de línea de contacto móvil y ángulo de contacto móvil o dependiente de la velocidad, el cual es sumamente útil en sistemas Inkjet donde debido a que el tiempo de fijación por cambio de fase es muy superior, presentando muy pequeños ángulos de retroceso, y por tanto se puede considerar  $\theta_a = cte$ . Y debido a que el proceso de esparcimiento por capilaridad tiene lugar en un tiempo también superior se puede decir que una línea se puede mantener constante y estable teniendo en cuenta; el drop spacing, la afinidad fluido-sustrato y la velocidad de aportación para un fluido determinado sobre un sustrato determinado. Así gotas muy juntas a intervalos de tiempo pequeños pueden dar origen a inestabilidades si  $\theta_a > \pi/2$  y en caso de gotas muy espaciadas estas no se unirán formando una línea de gotas inconexas de huella fija al momento del equilibrio y por último, si el drop spacing es un poco menor se formarían irregularidades debido al flujo existente por diferencia de presiones a consecuencia de las distintas curvaturas entre las gotas y el cordón.

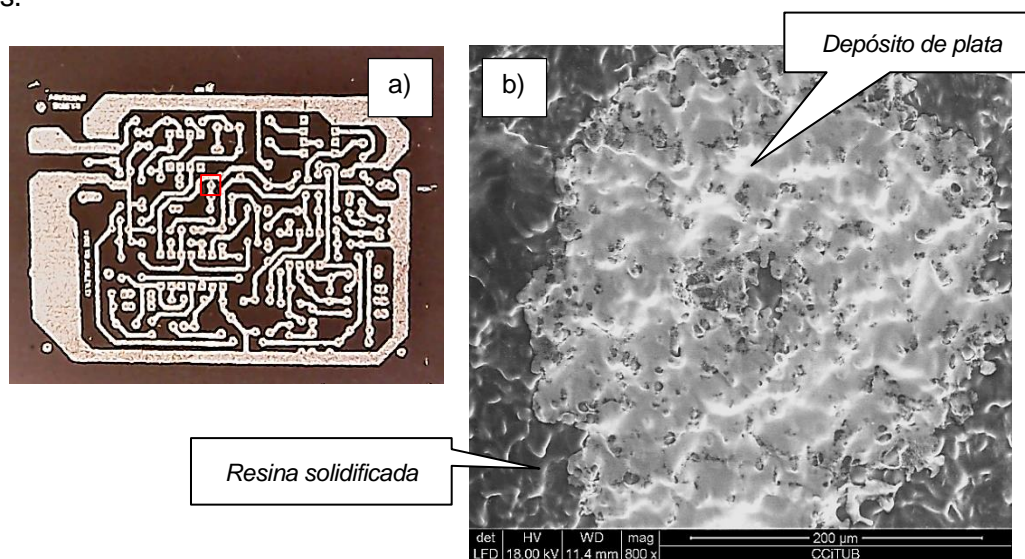
Finalmente, a través de la Figura 262 se ha podido observar el mapa de estabilidad aportado por Stringer y Derby en el que se puede apreciar 3 límites condicionados por la velocidad adimensional del carro Inkjet o la gota respecto al sustrato, el drop spacing y los ángulos de contacto de avance y equilibrio, con los cuales se puede predecir la aparición de las irregularidades en la reproducción de líneas y patrones mediante el sistema Inkjet DOD, que en nuestro caso dadas las condiciones obtenidas de la modelización de la eyección y de la trayectoria de las gotas junto con las condiciones de impresión ( $V_x = 49,93 \text{ mm/s}$  y  $f = 1.250 \text{ Hz}$ ) y las características de las tintas y del sustrato (ideal) se ha establecido que para que no se produzcan irregularidades en las líneas y patrones continuos reproducidos mediante gotas de tinta ANP silverjet DGP HRA de 10 pL cuya huella en equilibrio tras esparcirse sobre un sustrato de resina fotosensible Spot-A se encuentra según el tipo que ésta sea, y barbotina de LTCC cargada al 67% de alrededor de los  $68,5917 \mu\text{m}$  y  $56,9929 \mu\text{m}$  respectivamente, y cuya mojabilidad ( $\mu$ ) definible a través del ángulo de contacto en equilibrio de  $17,7935^\circ$  y  $30,0744^\circ$  respectivamente establece un drop spacing máximo de  $40,5359 \mu\text{m}$  para las resinas fotosensibles sin carga y de  $33,8949 \mu\text{m}$  para las resinas fotosensibles cargadas de partículas cerámicas de LTCC cuya mojabilidad es menor y por tanto sus ángulos de contacto son mayores que los de las resinas sin dopar.

Cabe destacar por otro lado, que de acuerdo con la gráfica de la Figura 262 y debido a que en el funcionamiento del sistema Inkjet del equipo Nhibrid32D se estableció como uno de los

parametros de impresión un drop spacing en direccion del desplazamiento del carro de impresión ( $x$ ) de  $40 \mu\text{m}$  en el caso de encontrarnos imprimiendo sobre un sustrato de resina fotosensible sin carga nos encontramos dentro del caso  $c$  ( $P_{real} \leq P_{max}$ ) luego atendiendo a las modelizaciones planteadas durante la reproduccion de las pistas éstas antes de que entren en juego los fenomenos asociados a las formacion y solidificacion de los depositos se han de realizar de forma estable.

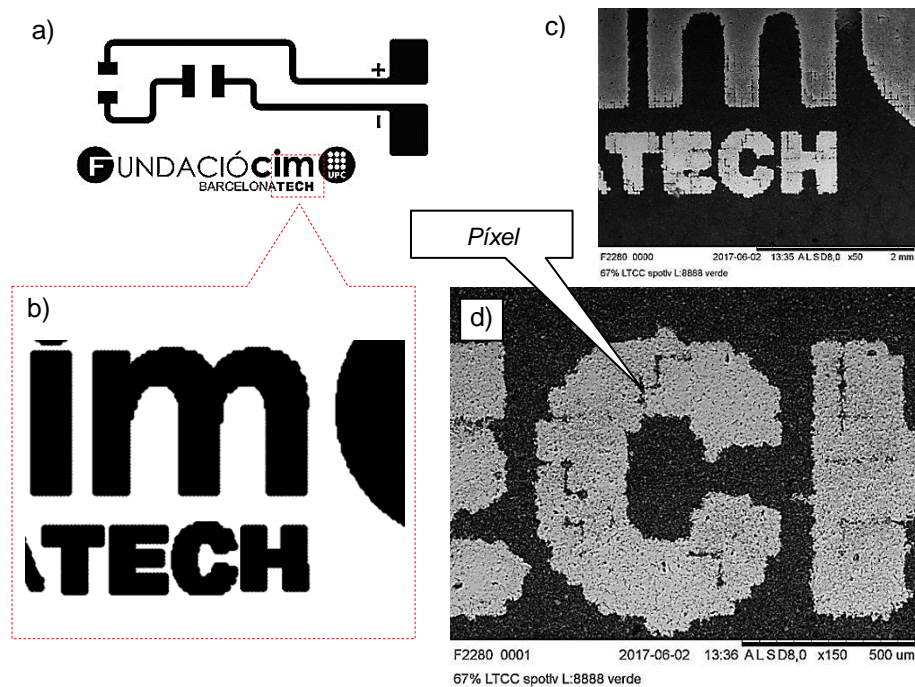
En el caso de la reproduccion de las pistas con la tinta de plata ANP Silverjet bajo los parametros de impresión establecidos y sobre un sustrato de barbotina fotosensible de LTCC al 67%, como hemos podido apreciar su menor mojabilidad establece un drop spacing máximo menor luego para éste caso; el comportamiento de las pistas según el modelo utilizado predice una ligera inestabilidad, por estar las gotas demasiado separadas, es decir, nos encontramos en presencia del fenomeno o caso  $b$  ( $P_{max} < P_{real} < \Phi_f$ ).

Por último, las pruebas realizadas a traves del equipo Nhibrid32D revelaron que las superficies de los sustratos poliméricos fotosensibles previamente impresos en 3D por el sistema DLP distan mucho de ser considerados como ideales, es decir; lisos, rígidos y homogéneos, la reproducción de los circuitos pudo llevarse teniendo en cuenta los parametros de impresión recomendados por la modelización anterior más ligeros ajustes introducidos por la experimentación y por tanto tras el ensayo y el error. En las imagen de a continuación (Figura 266) se puede apreciar un circuito impreso sobre un sustrato de resina fotosensible FunToDo del tipo Deep black y a través del microscopio SEM la realidad topográfica de la superficie de dicho sustrato previamente impreso. Cabe destacar tal y como se comenta en el capítulo 4 que existe una interacción química entre los solventes de la tinta y el sustrato que dificulta la reproducción de los patrones aumentando la huella de las gotas.



**Figura 266:** Circuito de prueba impreso sobre un sustrato de resina fotosensible (a) e imagen ampliada vista con el microscopio SEM (b) [Fuente: Elaboración propia].

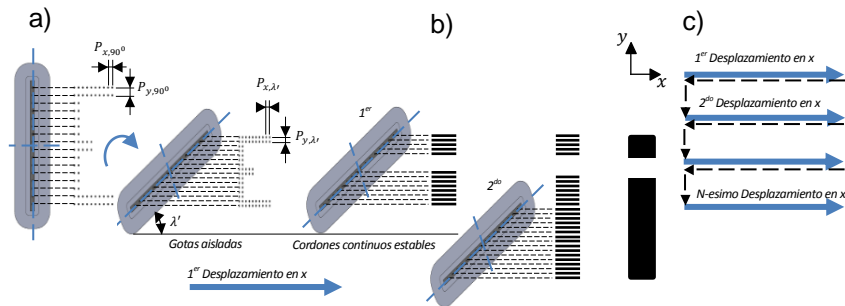
En cuanto a las resinas cargadas el comportamiento de las gotas depositadas sobre estas fueron bastante más próximas al modelo teórico debido a que el sustrato presentada una superficie más regular, siendo las partículas cerámicas glutinadas dentro de la matriz polimérica las que aportaban rugosidad al mismo induciendo una cierta variabilidad. Cabe destacar también la anisotropía de los elementos generados por los procesos de impresión por DLP, fenómeno observado por Monzón et al. [323] y evidenciado en las imágenes de la Figura 267, donde debido a que la proyección de la luz sobre la superficie libre de la resina líquida a solidificar se realiza a través de los microespejos que constituyen al chip DMD de los sistemas DLP, la superficie de las piezas o estructura fotopolimerizadas o conformadas tridimensionalmente en verde, presentan un relieve patronizado en forma de cuadrículas del ancho del píxel de la imagen proyectada y por tanto, modifica la realidad topográfica de la superficie requiriéndose múltiples capas con secados intermedios afín de asegurar la continuidad de las pistas y superar las crestas y los valles del mismo.



**Figura 267:** Imagen digital a reproducir (a) y reproducción simulada mediante la superposición de gotas (b). Imagen al SEM de la reproducción física de la imagen digital mediante una única capa de tinta de plata ANP sobre un sustrato previamente impreso de barbotina de LTCC (c), y finalmente, vista ampliada de la reproducción donde se aprecia las crestas patronizadas producto del píxel blending (d) [Fuente: Elaboración propia].

Por otra parte y afín de concluir este apartado de reproducción de patrones mediante la deposición estable de un tren de gotas secuenciadas, éstos (los patrones) al estar constituidos por un conjunto de líneas discretas (una por nozzle) en un sistema multinozzle requiere del establecimiento de un drop spacing vertical ( $P_Y$ ) el cual en nuestro caso se ha establecido mediante la rotación del cartucho en el interior del carro de impresión ( $\lambda'$ , ver

Figura 285), inclinación a su vez condicionado a la precisión de los saltos discretos del carro en dirección Y tras recorrer el ancho del plano de impresión, es decir (ver Figura 268):



**Figura 268:** Representación conceptual de la reproducción monocromática de la letra E a), y i mediante la deposición estable de un tren de gotas secuenciadas a través del sistema Inkjet DOD alojado en el interior del carro móvil del equipo Nhibrid32D b), finalmente esquema del proceso [Fuente: Elaboración propia].

## **2.8. Solidificación de las gotas y formación de los depósitos del material funcional**

En apartados precedentes como ha podido apreciar se han abordado las distintas etapas que constituyen el proceso de impresión digital mediante los sistemas Inkjet DOD. Sin embargo, tras la eyección, el vuelo y la deposición queda una última fase o etapa a tener en cuenta; la fijación. Con este nuevo concepto nos referimos a la ubicación inamovible de las gotas sobre el sustrato, generalmente asociado a un cambio de fase de las tintas y/o a la penetración de las mismas en un sustrato poroso haciendo está el papel de aglutinante en algunos casos de la impresión 3D.

Tanto en la impresión gráfica (bidimensional) como en el printing electronics o aún más en la impresión tridimensional la fijación de los depósitos constituye, sino la etapa más importante, una de las más importantes. En dicha fase se culmina el proceso de reproducción y en él se fundamenta la función o la finalidad del elemento impreso. En los sistemas de impresión tridimensionales el modo en el que se establece la unión entre los materiales depositados (sean éstos únicos o múltiples) que constituyen al objeto reproducido establecen la función del mismo es decir, discierne entre un prototipo (modelo no funcional, incapaz de satisfacer las solicitudes de un elemento comercial (cumple una finalidad estética) y por tanto perteneciente al Rapid Prototyping) y un objeto funcional (capaz de resistir las solicitudes impuestas por el mercado y por tanto perteneciente al Additive Manufacturing).

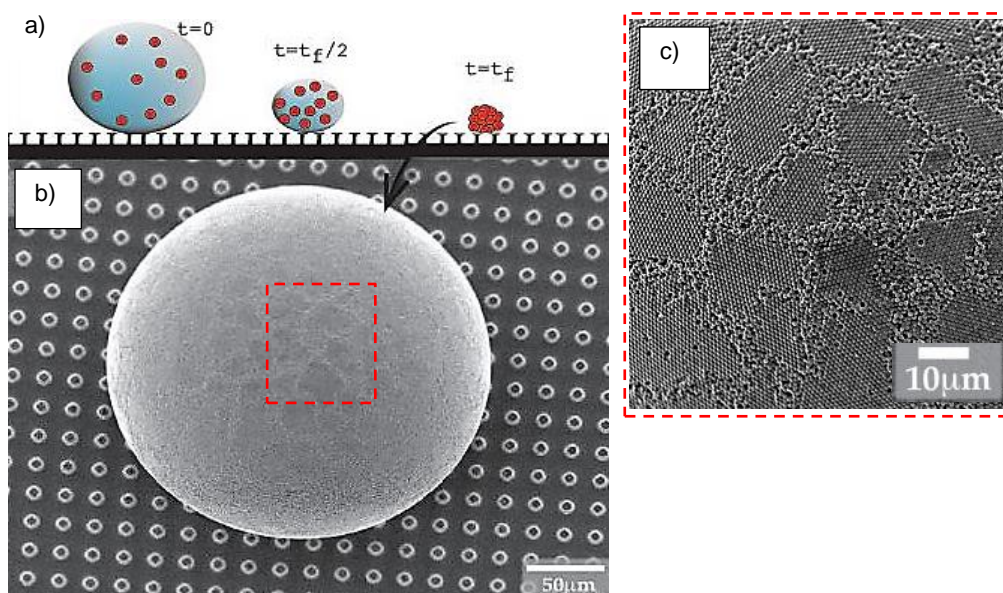
### **2.8.1. Efecto de la mancha de café en tintas funcionales (suspensiones)**

La formación de los depósitos puede llevarse a cabo mediante múltiples mecanismos, ya sea por el enfriamiento de las gotas al entrar en contacto con el sustrato (tintas metálicas de bajo punto de fusión o a base de céridos, etc.), por evaporación de solventes o por reacción química y radiación (especialmente por foto-polimerización). Sin embargo, en nuestro caso, donde la reproducción de los cordones continuos y estables se realizan mediante la deposición controlada de un tren de gotas secuenciadas a través del uso de una tinta funcional con fines electrónicos, en el empleo de una suspensión constituida por nanopartículas de plata inmersas en un medio fluido requiere que afín de que dichos cordones sean continuos eléctricamente, la formación de los depósitos de plata sea llevados a cabo en dos fases.



En una primera fase se produce la deposición de las gotas en cuyo interior se encuentran libres y suspendidas las nano-partículas de plata, durante esta fase una vez alcanzadas la estabilidad de los cordones da comienzo la evaporación de los solventes y en nuestro caso dicha evaporación es acelerada mediante una fuente de calor cercana afín de aumentar la productividad del equipo Nhibird32D (ver Figura 272). Sin embargo, durante dicho proceso puede llegar a aparecer el indeseado fenómeno de las manchas de café (migración de las partículas desde el centro al contorno de una gota cuyo medio fluido se encuentra en proceso de evaporación) dicho fenómeno modifica el perfil final de las huellas y en consecuencia de los patrones a reproducir, generando depósitos anulares, heterogéneos e irregulares de las partículas de plata pudiendo éstas llegar a estar inconexas dentro de los cordones o patrones reproducidos (perdiendo su función de conductor eléctrico).

A modo de curiosidad a continuación se muestra una gota sécil constituida de una suspensión con solventes volátiles cuya deposición ha sido llevada a cabo sobre un sustrato hidrofóbico.

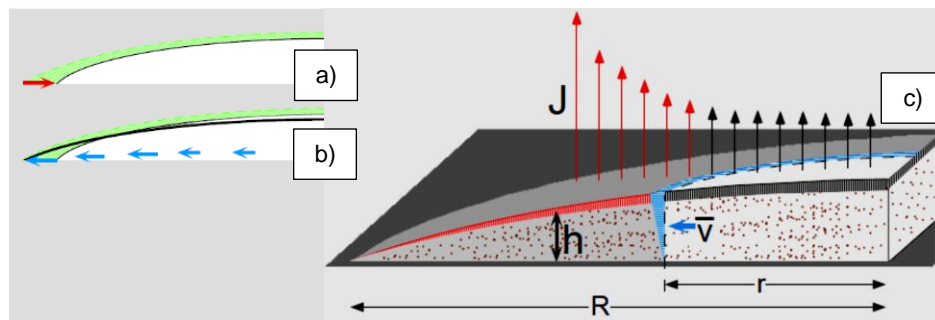


**Figura 269:** Imagen de la gota de una suspensión depositada sobre un sustrato hidrofóbico visto al SEM. Representación en alzado de la evolución de la misma tras la evaporación de los solventes (a), vista tras alcanzar el equilibrio final (b) y en detalle superficie del depósito (c) [324].

Tras la culminación de la primera fase de la etapa de fijación donde las nano-partículas de plata se encuentran depositadas y débilmente adheridas sobre el sustrato empleado (a diferencia del caso mostrado en la figura anterior) se procede a la segunda etapa; la solidificación completa de los depósitos por sinterización. La aportación térmica a los depósitos fomenta la coalescencia entre las partículas incrementando la continuidad eléctrica de los cordones ahora pistas de un circuito eléctrico y la adherencia de las mismas al sustrato. El desarrollo de la sustancia impresa ha permitido que dicho proceso final tenga

lugar a bajas temperaturas (entorno a los 200 °C en el caso de las tintas de plata) de hecho, afín de minimizar posibles daños en sustratos sensibles a la temperatura, el desarrollo de tintas organometálicas constituidas por solventes volátiles ha sido fundamental. Entre las tintas organometálicas desarrolladas con el fin de establecer un depósito conductor eléctricamente hablando, las más comunes son las tintas de plata, oro y cobre.

Volviendo a la primera fase y al efecto de la mancha de café, en 1997 Deegan et al. [325] publicaron en la revista Nature un estudio del fenómeno morfológico conocido como la mancha de café, resaltando que dicho fenómeno tenía lugar en cualquier sustancia constituida por un elemento volátil en cuyo interior existen solutos no volátiles. Deegan y sus colegas de la universidad de Chicago mostraron que la formación de ésta tenían lugar a consecuencia de la combinación de varios factores: primero tras el impacto se genera un flujo radial donde las partículas tiende al igual que el solvente a esparcirse. En segundo lugar, el hecho de que durante la evaporación se produce una pérdida de masa la cual reduce la altura del depósito y si este flujo no es compensado eventualmente hará retroceder la línea de contacto dejando atrás las partículas sobre el sustrato débilmente fijas y en tercer lugar otro de los factores a tener en cuenta es que el ratio de evaporación es superior a medida que nos acercamos dicha línea de contacto o borde de la huella.



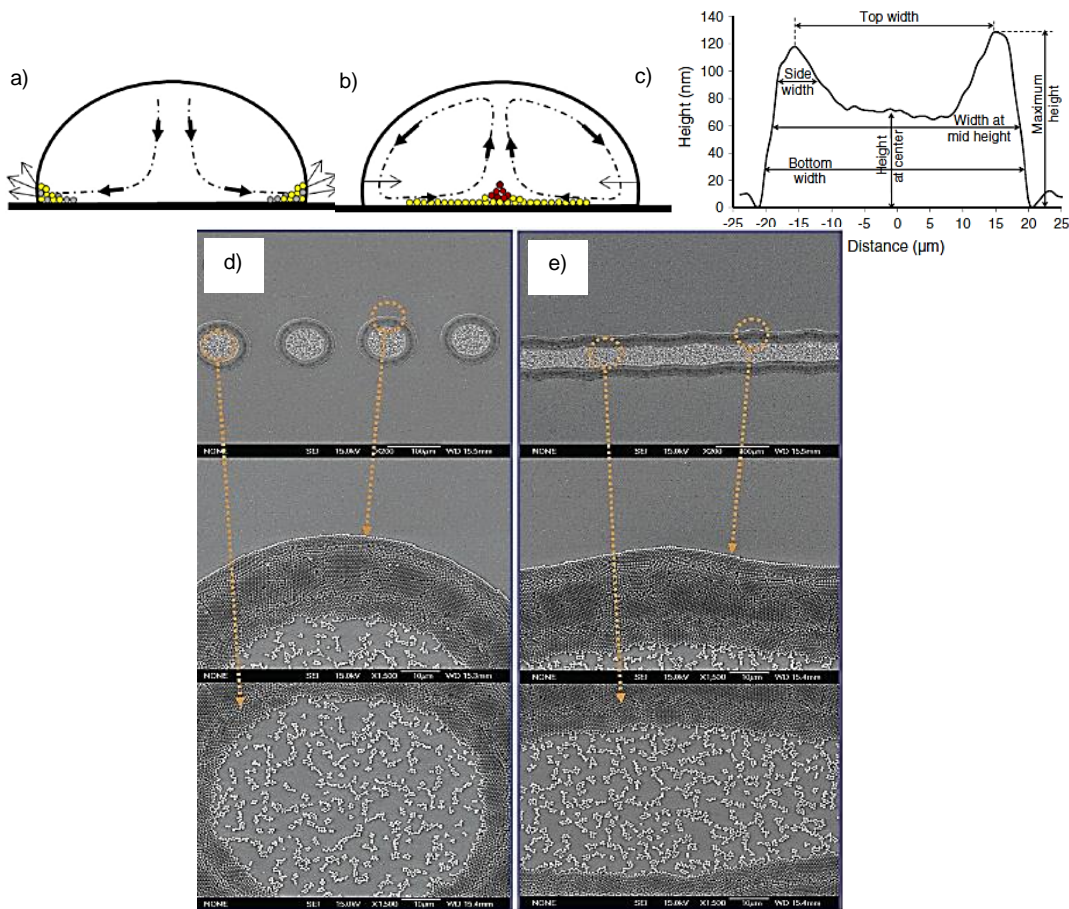
**Figura 270:** Análisis del fenómeno de la mancha de café en una gota sésil de una suspensión constituida por un fluido volátil cargado de partículas no solubles realizado por Deegan et al. a) Retroceso de la huella debido a la pérdida de masa, b) Consideración del flujo de marangoni como compensación a la evaporación, y c) Modelización del fenómeno [325].

Como se puede apreciar a través de la figura anterior la interpretación del fenómeno de la mancha de café aportado por Deegan et al., pasa por una velocidad de evaporación variable por unidad de superficie  $J(r)$  dicho flujo tras un incremento temporal hace disminuir la altura del perfil de la gota  $h(r)$  debido a la evacuación de un volumen dado (región rallada). Partiendo de la base de que la huella tras alcanzar el equilibrio no retrocede y puesto que el volumen evacuado es superior al volumen del área sombreada se establece un flujo radial (rayas azules) afín de compensar dicha evacuación. Dicho flujo proporcional o de Marangoni



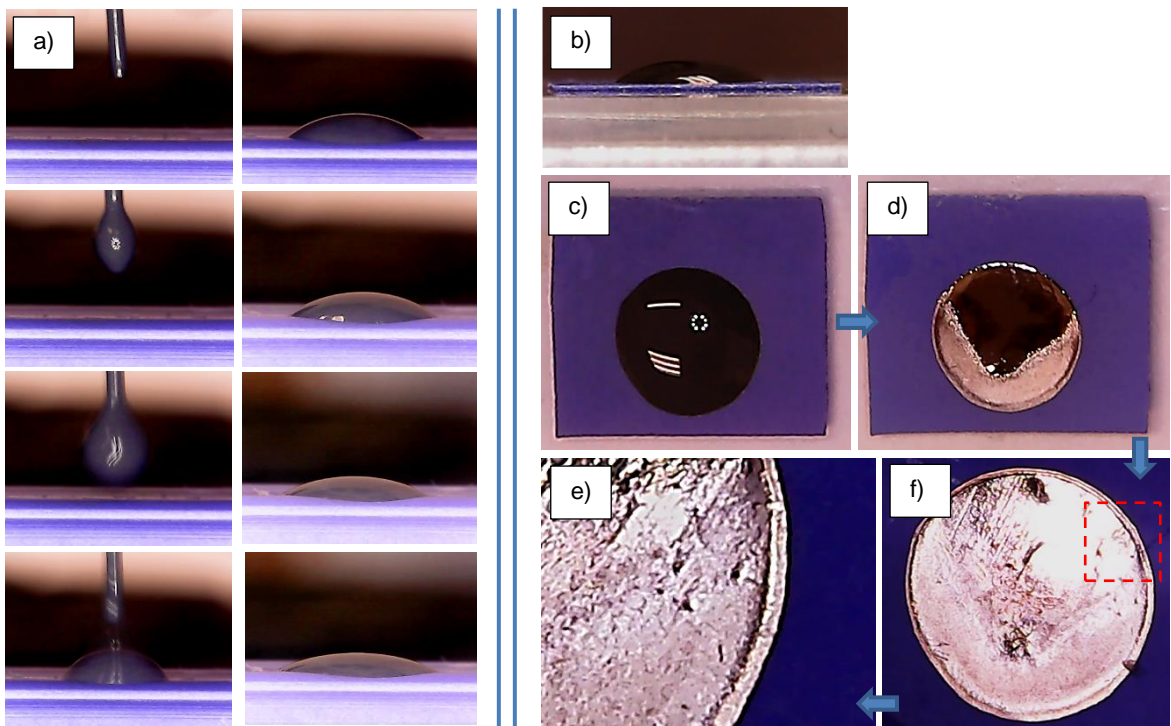
fomenta el desplazamiento de las partículas hacia el borde anular y genera el perfil de velocidad  $v(r)$ .

Estudios posteriores ha revelado la importancia de la forma de las partículas afín de evitar el fenómeno de las manchas de café Yunker et al. [326], así como también la velocidad con la que se produce la evaporación de los solventes y mediante la adición de surfactantes o tensocativos disminuir los efectos del flujo de marangoni, finalmente también se emplean combinaciones de distintos solventes afín de modificar el sentido de dicho flujo favoreciendo la dispersión de las partículas coloidales en el interior de los depósitos.



**Figura 271:** Representación esquemática del proceso de dispersión de las partículas coloidales durante la deposición y fijación de las gotas. Efectos dinámicos producidos en el impacto y en consecuencia, la aparición de la mancha de café a). Flujo de Marangoni como resultado de elementos de distinta tensión superficial b) [327]. Perfil mostrado por un cordón 40  $\mu\text{m}$  de ancho tras su fijación reproducido mediante el uso de tinta de plata depositado sobre un sustrato de PET (Tereftalato de polietileno) [328] c) y finalmente a modo de ejemplo un caso extremo de dicho fenómeno, en la deposición de partículas de silica para la reproducción de cordones d) y e) sobre un sustrato hidrofílico [329].

El fenómeno conocido como macha de café tiene una influencia significativa en el comportamiento eléctrico de las pistas reproducidas mediante la deposición de las gotas eyectadas por un sistema Inkjet, tal y como se puede intuir en el caso extremo mostrado en las imágenes de la Figura 271. Sin embargo, si bien dicho fenómeno ha tenido lugar en la reproducción de las pistas conductoras mediante el uso de la tinta de ANP debido principalmente al forzado de la evaporación y en consecuencia a la rápida inmovilización de las partículas en el interior de depósito sus efectos no han sido determinantes (ver Figura 272). Cabe destacar por otra parte que el curado de dicha tinta se ha llevado a cabo a una temperatura de 70°C durante 20 min mientras que posteriormente cuando las múltiples capas han sido depositadas éstas han sido expuestas a 200°C durante 20 min atendiendo a las recomendaciones del fabricante. Durante dicho proceso de curado (evaporación de los solventes) las gotas experimentan una reducción de masa del 65,14% aproximadamente.

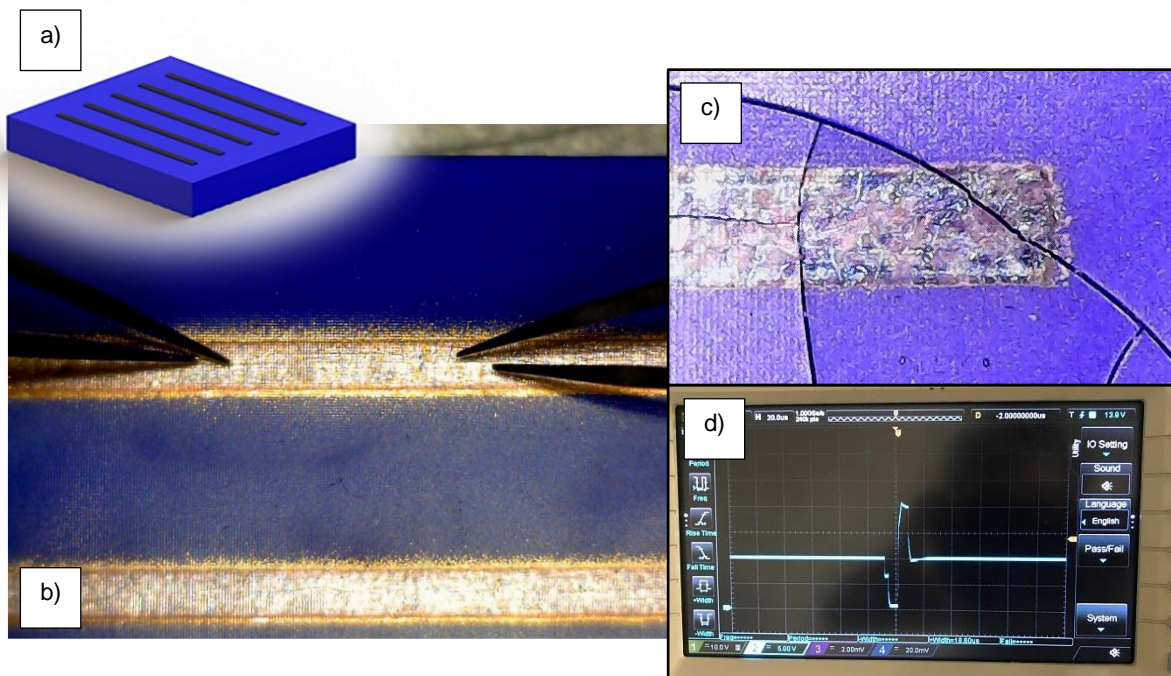


**Figura 272:** Evolución completa de la deposición de una gota sésil de tinta ANP silverjet DGP HRA depositada hasta alcanzar el equilibrio sobre un sustrato de barbotina fotosensible del LTCC en verde a). Posteriormente, prueba de realizada con los mismos materiales de la primera etapa del proceso de fijación. Vista de perfil b) y en planta de la gota en estado húmedo c) y durante el proceso de evaporación forzada de los solventes de la tinta c), tras su secado completo d) y vista en detalle del anillo exterior fruto del flujo de Marangoni e) [Fuente: Elaboración propia].

Superadas las problemáticas asociadas a la deposición estable de las gotas y tras estas, la formación de los depósitos mediante la fijación inicial de las nano-partículas partículas de

plata y su posterior sinterización, proceso en el cual se fundamenta la funcionalidad de estas suspensiones metálicas, a continuación abordaremos la calidad de las mismas es decir, en cuanto a reproducción (haciendo alusión a algunos de los problemas que hemos hecho rente y que algunos de ellos aún se han de superar) y en cuanto al nivel de continuidad eléctrica alcanzado de las líneas y/o patrones reproducidos mediante el usos del sistemas Inkjet DOD accionados por piezoeléctricos empleado en el equipo Nhibrid32D sobre un sustrato polimérico fotosensible y una barbotina cerámica de LTCC en verde previamente impreso en 3D.

Como se podrá apreciar en el apartado 2.9 el funcionamiento del sistema Inkjet del equipo Nhibrid32D es un poco particular, a diferencia de una impresora normal de tinta (gotas discreta aisladas y depositadas a voluntad sobre un sustrato) en ésta al requerirse la solapación parcial de las gotas el modo en el que se controla y reproduce un archivo digital es distinto. La simpleza del equipo que, por tratarse de un proyecto de investigación que busca en principio solo validar un concepto, ha hecho que tengamos que hacer frente a múltiples retos y problemas, junto con algunas limitaciones de medios y equipos aunado con un desconocimiento inicial. Por este motivo a continuación se muestra algunos de ellos, en cuanto a la calidad o fidelidad de la reproducción; tras reproducir 50 líneas horizontales de 1 mm de ancho separadas verticalmente 4 mm y de 25 mm de largo, en lotes de 5 con capas de entre 1 y 9 capas con la tinta ANP silverjet DGP HRA sobre un sustrato de resina fotosensible Spot-HT de Spot-A Materials, y secada a 70°C durante 20 min, a continuación se muestra los resultados de la precisión de la reproducción y algunas de las conclusión.



**Figura 273:** a) Imagen renderizada de la pieza reproducida por el equipo Nhibrid32D. b) Imagen de una de las pistas conductoras reproducidas con multiples capas superpuestas. c) Evidencia de la fractura del sustrato fruto de su inestabilidad térmica en torno a la

*temperatura de sinterización de la plata (pista de 1 capa de tinta). d) Imagen tomada del osciloscopio Rigol DS1104z en donde se muestra la Waveform real aplicada a los piezoeléctricos del cartucho [Fuente: elaboración propia].*

Como puede apreciarse en la imagen anterior (Figura 273d), la falta de atenuación del ruido en la señal de excitación de los piezoeléctricos (Waveform) distorsiona a ésta y dado la sensibilidad del sistema Inkjet, el ángulo descrito por el chorro respecto a la superficie del nozzle durante la eyección y la repetitividad de las trayectorias descritas por las gotas eyectadas se ve cuestionada. Por otro lado, dicho ruido en la Waveform también tiene influencia en la aparición de gotas satélites y en conjunto a medida que más veces se reproduce una de las pistas afín de incrementar el contenido de plata en el deposito (superposición de capas) la imprecisión del sistema se hace más evidente (ver Figura 273b), sin embargo la magnitud de sus efectos no es siempre la misma por motivos que aún desconocemos, quizás la evaporación de los solventes en las inmediaciones de los nozzles a consecuencia de la temperatura en la tinta podría ser el causante.

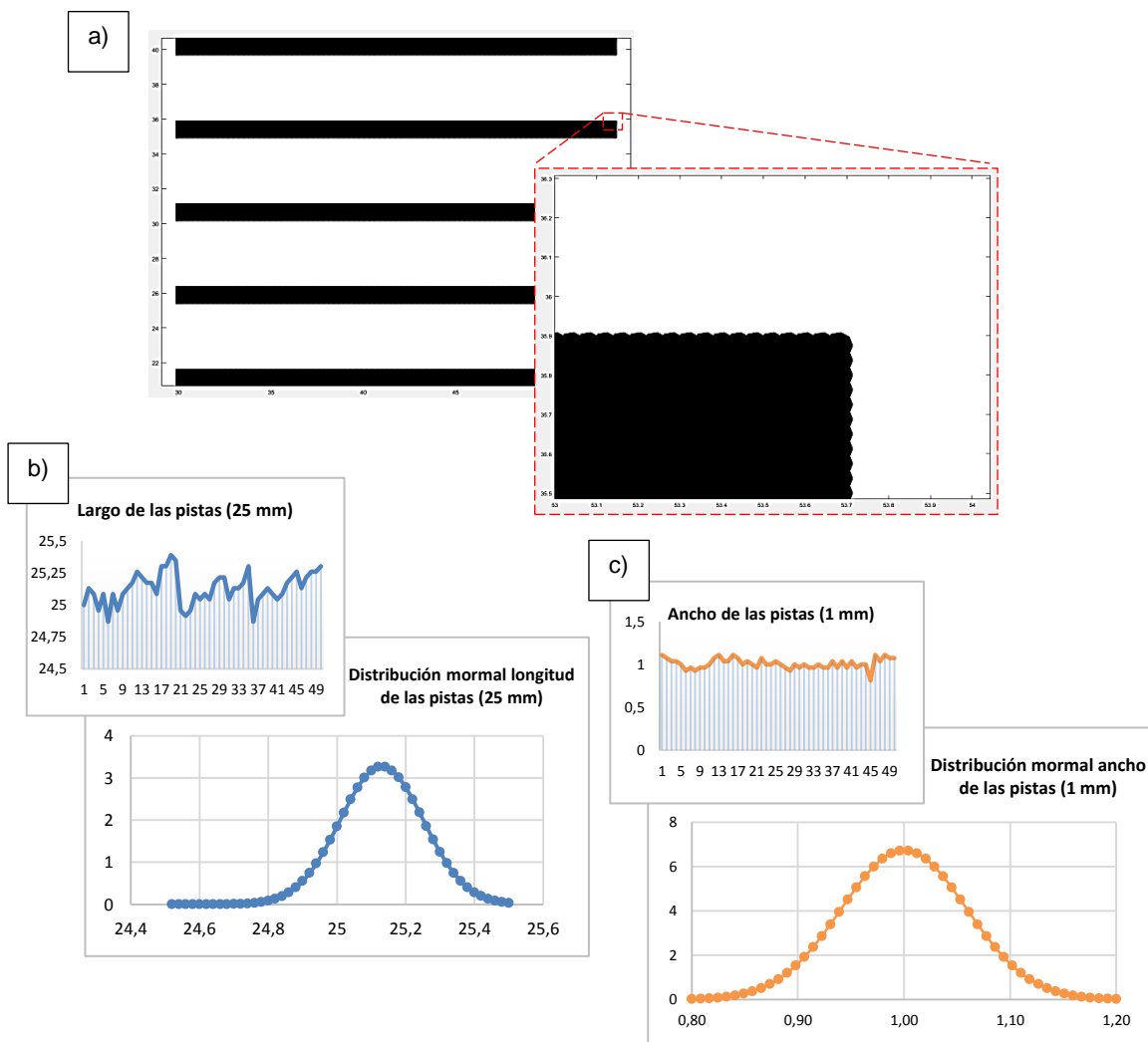
Por otro lado, se ha de resaltar que el sustrato no es inerte a los solventes de la tinta (ver Figura 371 del capítulo 4), y que como se puede apreciar en la imagen Figura 273b también se da el fenómeno del anillo exterior fruto del flujo de Marangoni. Las pistas reproducidas con un drop spacing de 40 y 25  $\mu\text{m}$  en horizontal y vertical respectivamente, con gotas de 10 pl cuyas huellas sobre el sustrato tras alcanzar su equilibrio tienen un diámetro 68,5917  $\mu\text{m}$  (simulación de la reproducción mostrada en la figura de a continuación) también se ven influenciadas por la rugosidad del sustrato previamente impreso en 3D dificultando la estabilidad de las capas en estado húmedo (antes de la fijación de por evaporación forzada de los solventes a 70°C, para posteriormente ser llevadas a sinterizar a 180-200°C).

Finalmente, la temperatura de sinterización también juega un papel fundamente en la reproductibilidad de los archivos digitales (tanto en fidelidad como en funcionalidad) en un sustrato determinado y con una tinta determinada. En este aspecto como se podrá apreciar en apartados subsiguientes, la estabilidad del sustrato de resina fotosensible se ve condicionada en el intervalo de temperatura requerido para la sinterización de la plata, produciéndose dilataciones y contracciones que a menudo destruyen la continuidad de las pistas llegando incluso a fracturar el sustrato, como se puede apreciar en la imagen de la Figura 273c.

	Valor medio	Varianza	Desviación estándar	Coef. de variación	Valor min.	Cuartil 1	Mediana	Cuartil 2	Cuartil 3	Valor max.	Moda
Ancho de la pista	1,00963	0,00352	0,05930	0,05874	0,81481	0,96296	1,00000	1,00000	1,03704	1,11111	0,96296
Largo de la pista	25,12934	0,01488	0,12197	0,00485	24,86979	25,05425	25,13021	25,13021	25,21701	25,39063	25,08681

**Tabla 8:** Análisis estadístico de las pistas reproducidas [Fuente: elaboración propia].





**Figura 274:** a) Representación de la ubicación de las gotas que conforman las pistas reproducidas y que previamente has sido definidas por un archivo digital y representadas en la imagen anterior. b) Ancho de las pistas impresas y distribución normal de las mismas de una población de 50. c) Longitud de las mismas y distribución normal [Fuente: elaboración propia].

Como puede apreciarse a través de las gráficas de distribución normal el posicionamiento de las gotas en sentido horizontal presenta una mayor imprecisión, aunando los motivos anteriormente comentados, a éstos también debería añadirse la falta de planitud en el sustrato impreso previamente producto de la tensión superficial de la resina en fase líquida contenida cuba, que al polimerizarse es transmitida a la pieza, a pesar del uso recoater. La inclinación en los extremos fomenta la imprecisión en la locación de las piezas puesto que estas en su trayectoria parabólica realizan un recorrido mayor (ver Figura 230).

## 2.8.2. Conductividad eléctrica de las líneas y patrones estables reproducidos mediante la deposición secuenciada de un tren de gotas cuyo material funcional constituye una suspensión altamente cargada de nanopartículas de plata

La conductividad eléctrica es una propiedad intrínseca del material o sustancia y cuantifica la capacidad de un material para conducir una corriente eléctrica, la resistividad por otra parte es la inversa de ella.

La conductividad depende de la estructura atómica y molecular del material. Los metales son buenos conductores porque tienen una estructura donde muchos de sus electrones poseen vínculos débiles, y esto permite su movimiento. Los mecanismos de continuidad difieren entre los distintos estados de la materia luego dependen de otros parámetros como por ejemplo de la temperatura.

Así pues, la conductividad de un material se define por la relación entre la densidad de corriente y el campo. Cuando se coloca un conductor en un campo eléctrico, los flujos de carga minimizan la diferencia de potencial, es decir:

$$\sigma = \frac{j}{E} \quad 3.409$$

Donde  $\sigma$  representa la conductividad del material en Siemens por metro,  $j$  la densidad de corriente en amperios por metro cuadrado y  $E$  el campo eléctrico en voltios por metro. Al ser una propiedad inherente del material que no tiene en cuenta los parámetros físicos de tamaño o forma, puede emplearse para la obtención de la conductancia.

$$G = \frac{\sigma S}{l} \quad 3.410$$

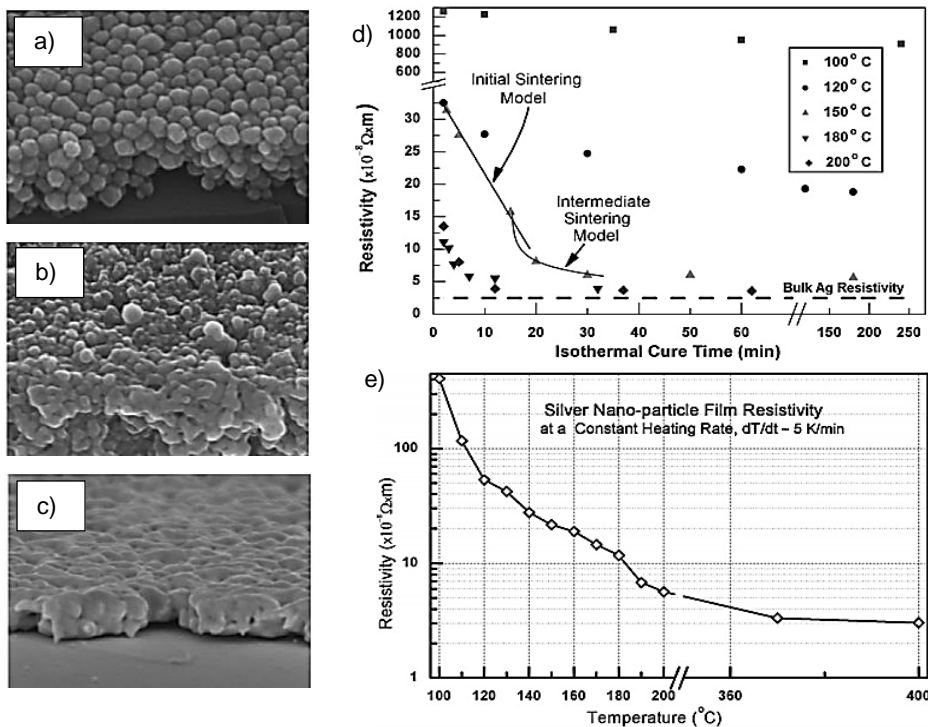
Siendo  $G$  ahora la conductancia término que hace referencia a la facilidad que ofrece un material al paso de la corriente eléctrica medida en Siemens; es decir, que la conductancia es la propiedad inversa de la resistencia eléctrica.  $S$  por otro lado, representa el área de la sección transversal de la pista conductora en este caso en metros cuadrados y  $l$  representa la longitud de dicha pista conductora en metros (S.I.).

La conductancia o en su defecto su inverso, la resistencia que ofrece una pista o dispositivo electrónico pasivo al paso de la corriente es, en definitiva uno de los parámetros más importantes desde el punto de vista de la impresión funcional con fines electrónicos después de la continuidad y estabilidad geométrica de la misma.

Cuando las pistas conductoras han sido impresas mediante un sistema Inkjet DOD, es decir, reproducido mediante la superposición parcial de un conjunto de gotas de tintas funcionales secuenciadas, que normalmente constituyen una suspensión donde en su interior se encuentran inmersas las partículas inorgánicas de alta conductividad, a menudo los valores

de conductancia de las pistas se ofrecen relativos a la conductancia del material inorgánico puro de las tintas. Esto ofrece una medida útil de la calidad de la reproducción desde un punto de vista funcional (eléctrico en este caso).

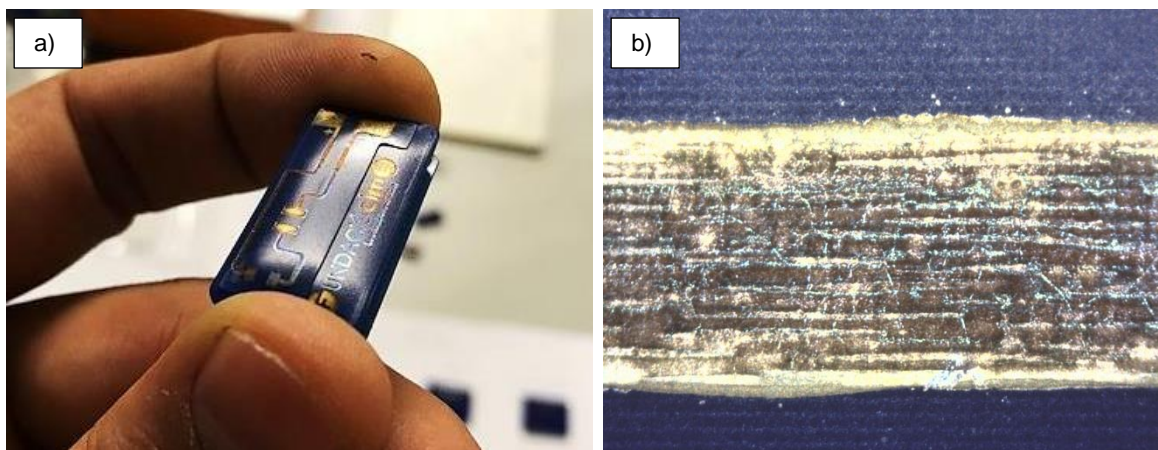
Teniendo en cuenta la realidad de los sustratos (rugosidad y heterogeneidad) así como otros posibles defectos superficiales y, por otro lado, puesto que las pistas conductoras no están constituidas por un conductor macizo del material conductor sino por un conjunto de partículas nanométricas que tras la sinterización establecen uniones rígidas que permiten la continuidad eléctrica, ésta última siempre se encuentra a algunos órdenes de magnitud inferior al del material de la partículas en suspensión. En este aspecto J. Greer y R. Street [330] analizaron los efectos de este curado térmico en el comportamiento eléctrico de las pistas reproducidas mostrando una reducción importante en la resistividad de las pistas tras superar el proceso de sinterización a distintas temperaturas (ver Figura 275). Sin embargo, siguiendo las recomendaciones del fabricante proveedor de las tintas empleadas y teniendo en cuenta la Ec. 3. 410 aumentando el área de la sección transversal de una pista conductora impresa es decir, mediante la sobreimpresión de múltiples capas y por tanto mediante una mayor deposición de material funcional, la conductividad de las pistas puede verse incrementada lo que en principio se pudo comprobar experimentalmente sobre un cristal porta muestras.



**Figura 275:** Imágenes al SEM de los depósitos constituidos de plata (a) y tras su sinterización a 150 °C durante 5 min (b) y pista cordón o pista conductora después de 3h a dicha temperatura (c). Evolución de la resistividad de las pistas impresas en función de un tiempo de curado a una temperatura de exposición constante (d) y finalmente evolución de la misma bajo un crecimiento constante de la temperatura de curado (e) [330].

Como puede observarse en la gráfica de la Figura 275d a temperaturas de sinterización superiores de los 150°C la variación de la resistividad de las pistas tras verse expuestas durante más de 30 minutos poco o casi nada cambia, lo cual concuerda con las recomendaciones del fabricante de la tinta empleada, por otra parte resaltar que nunca se alcanza los valores mínimos del bulk de plata (de material base) y que como puede apreciarse en la Figura 275e la disminución de la resistividad eléctrica de las pistas es notablemente superior a temperaturas inferiores a los 200°C a partir del cual dicha disminución se reduce haciéndose imperceptible a temperaturas superiores a los 360°C y en este aspecto cabe resaltar que, si el sustrato resiste a dichas temperaturas el punto de fusión de la plata de los depósitos se encuentra entorno a los 961,8°C.

En el caso que nos ocupa la reproducción de las pistas conductoras sobre un sustrato de resina fotosensible previamente impreso en 3D, fue llevado a cabo mediante la superposición de capas con curados intermedios, es decir, afín de evitar que por exceso se moviera la línea de contacto y en definitiva inestabilizará los patrones reproducidos. Después de cada capa depositada los solventes de la tinta han sido evaporados generando depósitos de plata débilmente fijados al sustrato pero no sinterizados. Dicho proceso se realizó a 70°C durante 20 min. Posteriormente la sinterización de las pistas conductoras propiamente dicha constituidas por múltiples capas superpuestas, se llevó inicialmente a cabo a 200°C durante 20 minutos. Cabe resaltar que a esta temperatura la incipiente degradación del sustrato fomenta la degradación del sustrato contaminando las pistas de plata, las cuales experimentaron un cambio de color, volviéndose amarillentas y en algunas zonas azuladas. La aparición de óxidos y sulfuros podrían tener la causa. En la imagen de a continuación se muestra en imágenes dicho fenómeno.



**Figura 276:** a) Contaminación de las pistas debido a la degradación del sustrato la sinterización de los depósitos de plata, b) Fracturas de las pistas reproducidas sobre este sustrato agrietadas por la contracción irregular del sustrato [Fuente: Elaboración propia].

Las mediciones llevadas a cabo sobre la resistencia de las pistas de plata reproducidas por el equipo Nhibrid32D mostraron que éstas eran conductoras y coherentes a las diversas



publicaciones existentes (como la mostrada en la Figura 275) sobre sustratos rígidos y principalmente sobre un porta muestras de cristal. Tras verificar que las pistas reproducidas son capaces de conducir electricidad, es decir que, son continuas sobre un sustrato plano y que sus valores son coherentes y proporcionales a los esperados, sucesivas pruebas fueron llevadas a cabo ahora sobre un sustrato impreso en 3D.

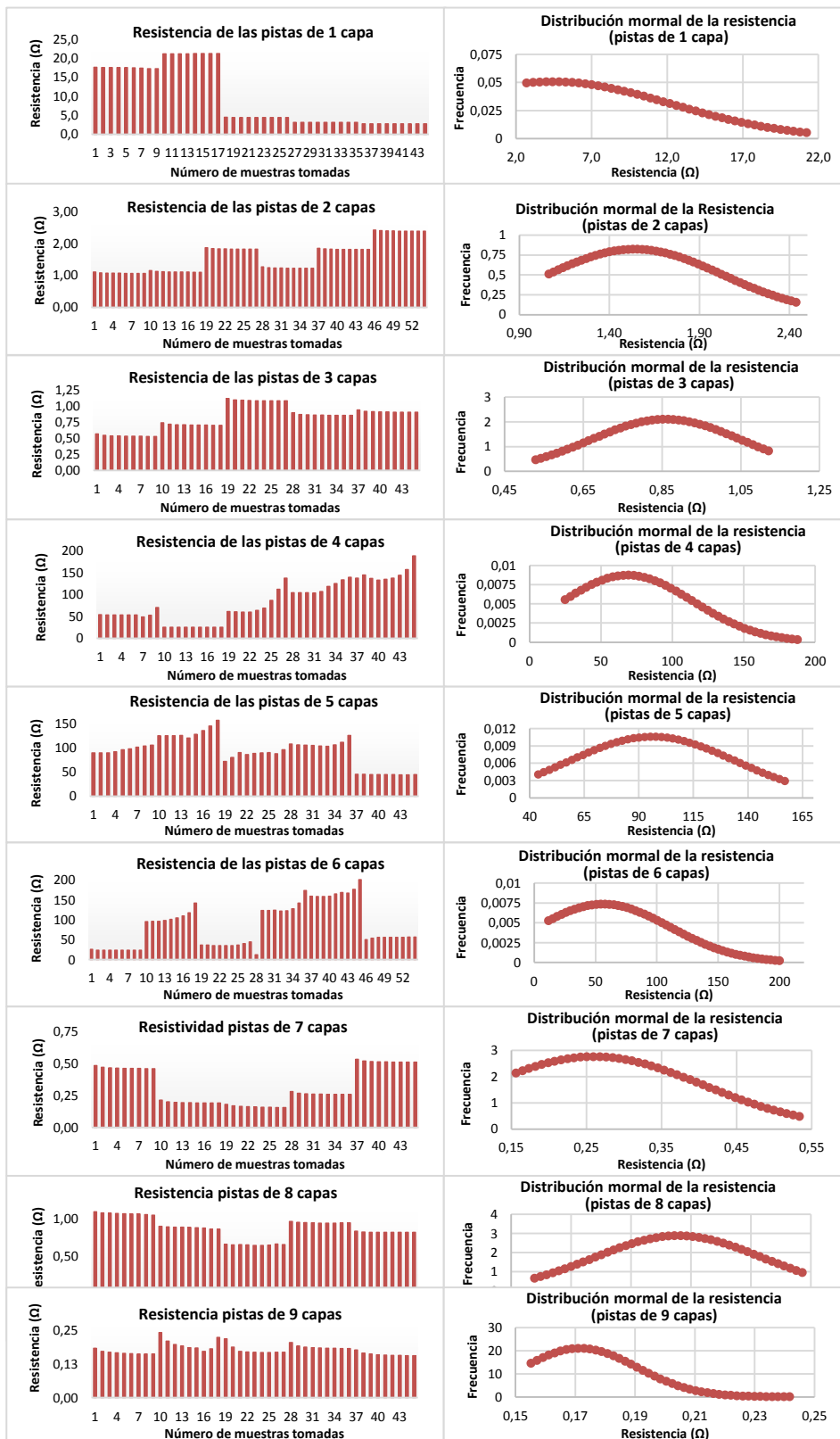
El comportamiento irregular de las resinas acrílicas fotosensibles empleadas a temperaturas superiores a los 180°C ha hecho que las pistas reproducidas sobre y dentro de estas, ofrezcan un comportamiento atípico no pudiendo afirmarse su continuidad (ver caso extremo Figura 273c). El incremento en el número de capas reproducidas con el sistema Inkjet a fin de aumentar la sección de las pistas y con ello la cantidad de plata y la continuidad de las pistas resulto infructuosa, sin embargo, es un problema que podría verse solucionado empleando resinas fotosensibles aditivadas capaces de superar el umbral de temperatura necesaria para la evaporación de los solventes y sinterización de las tintas de plata.

Así una vez validada que la problemática presentada no corresponde a la deposición sino a la degradación del sustrato y ante la imposibilidad durante el desarrollo de la presente tesis de variar la resina empleada se procedió a la reproducción de estas pistas pese a no ser continuas eléctricamente sobre topologías más complejas (ver Figura 279).

A continuación se muestra los resultados de las pruebas de medición de la resistencia de las pistas de 1 mm de ancho en función del número de capas impresas (1-9) mediante gotas de 10 pL con un drops spacing de 40  $\mu\text{m}$  en X y de 37,5  $\mu\text{m}$ , con tinta ANP silverjet DGP HRA sobre un sustrato de resina Spot-A HT y cuya sinterización se ha llevado a cabo ligeramente por debajo de los 200°C con exposiciones a intermedias para fijación (evaporación de solventes) a 70°C y medidas mediante la técnica de las 4 puntas en un multímetro Keithley 2401 SourceMeter entre dos puntos (ver Figura 273b y Figura 278).

Número de capas impresas	Valor medio de resistencia de las pistas ( $\Omega$ )	Varianza	Desviación estandar	coef. de variación	Valor min	Cuartil 1	Mediana	Cuartil 2	Cuartil 3	Valor max
1	9,53300	62,16981	7,88478	0,82710	2,73342	3,11267	4,42341	4,42341	17,54851	21,24702
2	1,58403	0,23770	0,48755	0,30779	1,06642	1,11354	1,54404	1,54404	1,83708	2,43812
3	0,82495	0,03614	0,19011	0,23045	0,52995	0,70494	0,86101	0,86101	0,91530	1,12206
4	84,03794	2105,08559	45,88121	0,54596	25,23785	53,17641	69,04423	69,04423	132,87748	187,81330
5	93,66182	898,15018	37,80781	0,40366	44,02541	85,87682	96,40056	96,40056	108,11655	157,19961
6	84,98922	2955,86293	54,36785	0,63970	12,01121	35,70386	56,64450	56,64450	123,57357	200,22637
7	0,32123	0,02107	0,14515	0,45186	0,15671	0,19243	0,26077	0,26077	0,46734	0,53420
8	0,86958	0,01924	0,13872	0,15952	0,63979	0,81453	0,87976	0,87976	0,94363	1,08674
9	0,17792	0,00036	0,01903	0,10693	0,15532	0,16446	0,17173	0,17173	0,18562	0,24181

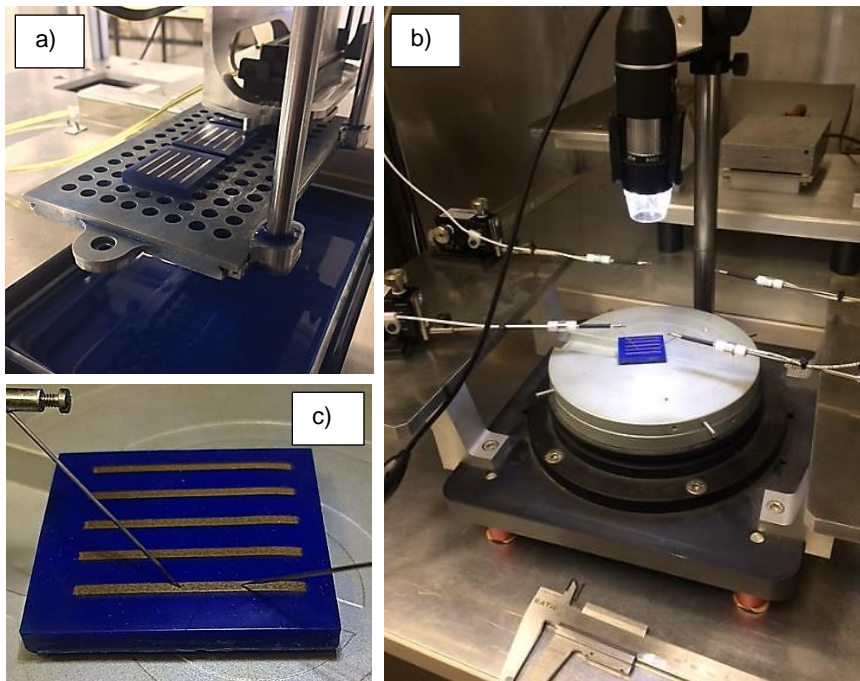
**Tabla 9:** Mediciones realizadas en las instalaciones de nanoelectrónica aplicada de la Universidad de Barcelona.



**Figura 277:** Evolución de la resistencia de las pistas de 1 mm de ancho en función del número de capas impresas mediante gotas de 10 pL con un drops spacing de 40 μm en X y de 37,5 μm, con tinta ANP silverjet DGP HRA sobre un sustrato de resina Spot-A HT y cuya

*sinterización se ha llevado a cabo ligeramente por debajo de los 200°C con exposiciones a intermedias para fijación (evaporación de solventes) a 70°C [Fuente: Elaboración propia].*

Como puede apreciarse a través de las gráficas anteriores, la conductividad de las pistas se ve cuestionada por el sustrato, (más no por la reproducción puesto que esta tinta comercial en un sustrato inerte a la temperatura de sinterización ésta presenta continuidad), cuyo comportamiento agrieta a éstas mostrando un comportamiento eléctrico irregular al esperado, tras múltiples mediciones (5 por pista y en algunos casos más) y gracias al empleo de la estadística, podemos apreciar que pese a que existe regularidad de las medidas, existen pistas que muestra una cierta continuidad, mientras que en otras bajo una misma cantidad de capas no. A continuación se muestra en imágenes dichas probetas durante su impresión y la mediación de dicha propiedad eléctrica.

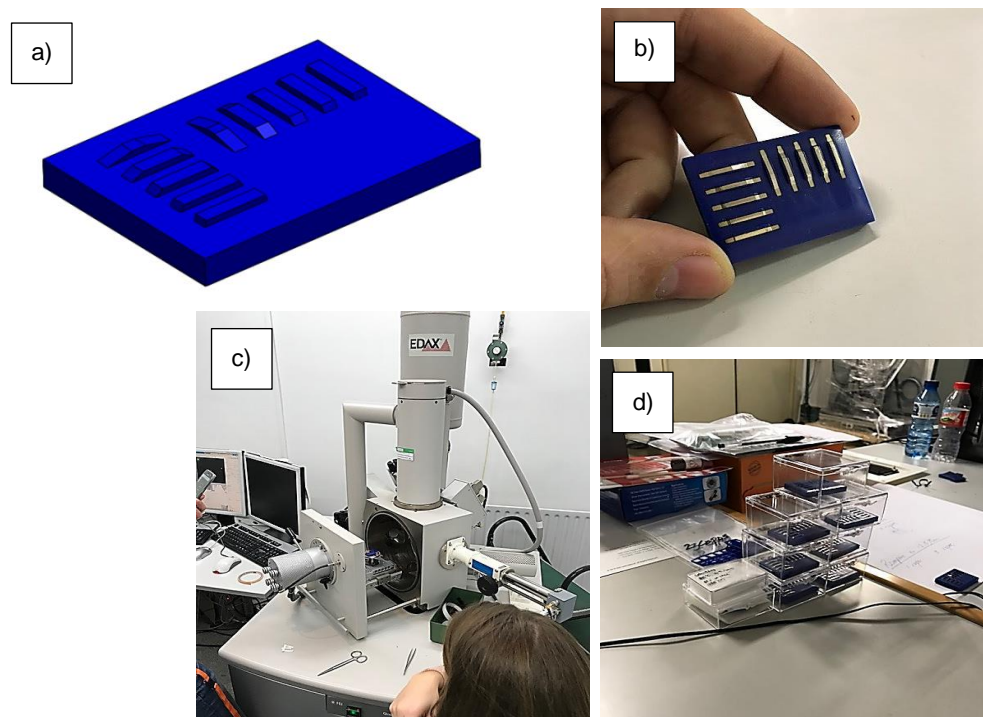


**Figura 278:** *Vista en perspectiva de la plataforma de construcción durante la reproducción de las pistas de plata de 1 mm de ancho sobre la probeta previamente impresa de Spot-HT (a). Imagen durante la medición de la resistencia de las mismas mediante 2-probe Technique realizado en un multímetro Keithley 2401 SourceMeter (b) y vista en detalle de la misma con ligera degradación de las pistas (c) [Fuente: Elaboración propia].*

Cabe destacar sin embargo, de entre las medidas registradas el conjunto de pistas con 9 capas superpuestas de tinta han ofrecido la mayor continuidad, pero como se ha comentado las posibles imprecisiones del sistema fomentan la disminución en la fidelidad de la reproducción (ver Figura 273b).

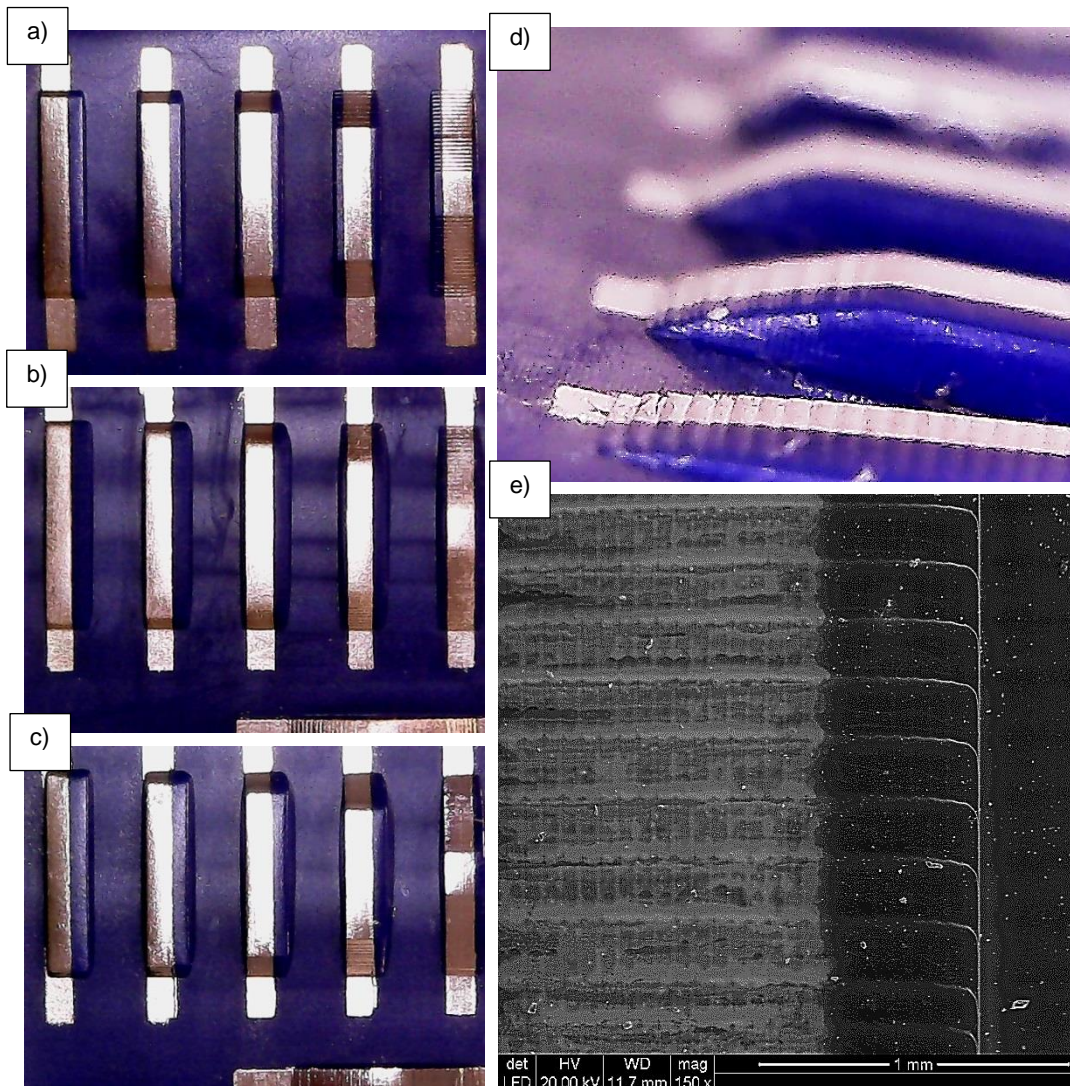
Por otro lado y como ya se ha comentado, puesto que en ambos caso; tanto la reducción de la fidelidad de la reproducción como de la estabilidad térmica del sustrato del sustrato, en el estado actual del proyecto han sido considerados como solventables en el tiempo a continuación se muestra la reproducción de dichas pistas en sobre rampas o el equivalente impreso a planos inclinados. Para ello se emplearon rampas desde  $15^\circ$  hasta  $75^\circ$  grados de inclinación dispuestas en sentido vertical y longitudinal (paralelos al sentido de desplazamiento del carro de impresión y perpendicular a éste respectivamente). Por otra parte, se emplearon distintas alturas de capa afín de disminuir el escalonado de las rampas ( $50$ ,  $25$ ,  $12,50 \mu\text{m}$ ) así como también, la deposición múltiples capas de plata mediante el sistema Inkjet fueron depositadas.

Las imágenes de a continuación muestra la geometría empleadas en donde las pistas de plata poseen una anchura de  $1 \text{ mm}$  y la altura total de las rampas indistintamente de la inclinación que estas posean también fue establecida en  $1 \text{ mm}$ .



**Figura 279:** Imagen renderizada de la geometría empleada para la validación de la impresión en rampas (a), pieza tras su reproducción ( $50 \mu\text{m}$  de altura de capa y 3 capas de plata) (b). Vista del Microscopio SEM empleado (c) e imagen de las distintas pruebas realizadas (d) [Fuente: Elaboración propia].





**Figura 280:** Vista en planta de las pistas horizontales: (a) Pieza impresa con un espesor de capa de  $50\ \mu\text{m}$  y con tres capas de plata. (b) Pieza impresa con un espesor de capa de  $25\ \mu\text{m}$  y con tres de plata. (c) Pieza impresa con un espesor de capa de  $12,5\ \mu\text{m}$  y al igual que las anteriores con 3 capas de plata. Vista en perspectivas de las rampas en la pieza impresa con  $50\ \mu\text{m}$  de espesor de capa. (e) Y finalmente imagen al SEM de la rampa de  $15^\circ$  de inclinación reproducida con un espesor de capa de  $50\ \mu\text{m}$  y con una única capa de Inkjet [Fuente: Elaboración propia].

Como se pudo comprobar a través del SEM el perfil escalonado de las geometrías impresas en 3D (mediante la superposición de capas) favoreció la reproductibilidad de las pistas conductoras en planos inclinados. En un plano inclinado cualquiera, el ángulo de avance de las gotas al interactuar con el sustrato determina la inclinación máxima a las que éstas, pueden llegar a alcanzar sin modificar la línea de contacto, y por tanto, la reproducción estable de los patrones mediante la solapación de las mismas. Sin embargo, en el caso de

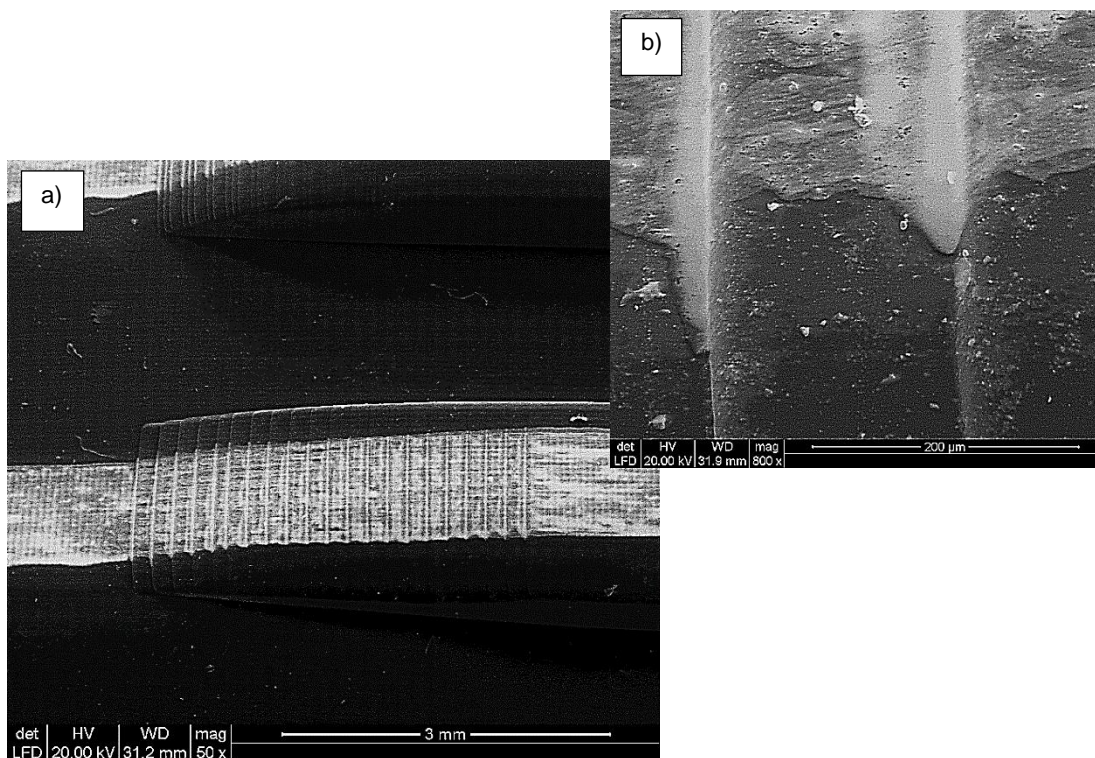
las geometrías impresas dicha situación no tiene lugar, favoreciendo así la reproducción de dichas pistas conductoras.

El espesor de las capas por otro lado, define el salto vertical entre dos capas consecutivas siendo éste el mayor obstáculo a superar en cuanto a la reproducción de patrones continuos sobre topologías complejas previamente impresas en 3D. La reducción de la misma en una proporción del 25% y del 50% mostro una notable mejoría, así como también a través de un incremento en la cuantía de plata depositada (mayor número de capas con el sistema Inkjet). A través de las imágenes anteriores se puede apreciarse que; con un espesor de capa, 4 veces inferior (caso C) respecto al del caso A, y con una deposición de 3 capas de plata, la reproducción de las pistas de plata se llevó de forma totalmente satisfactoria en todas rampas al menos desde el punto de vista óptico. Sin embargo, desde el punto de vista eléctrico solo en las rampas de 15° y 30° reproducidas con un espesor de 12,5  $\mu\text{m}$  pudo comprobarse una ligera continuidad después de las sinterización de la plata, aunque cabe destacarse que atendiendo los resultados de las pruebas precedentes sobre un sustrato plano sugieren que la degradación del mismo puede ser la causa de la falta de continuidad. En todo caso, a través de la imagen de la Figura 280.e puede observarse que la reproducción de las pistas sobre planos inclinados requiere aún de superar los saltos verticales, un mayor número de capas superpuestas.

El sentido del desplazamiento del carro de impresión respecto a las ubicaciones de las rampas por otra parte, influye en la forma en la que las gotas se depositan, ya que el drop spacing se ve afectado (situación que se analizó apartados precedentes: durante la etapa del vuelo). El empleo de drop spacings distintos respecto a los ejes X e Y en este aspecto han tenido mucho que ver en la forma y la cantidad de plata almacenada de los depósitos impresos. Sin embargo, como puede apreciarse a continuación a través de las imágenes tomadas del SEM, tanto en las rampas dispuestas horizontalmente, es decir, en paralelo al sentido del desplazamiento del carro de Inkjet en su movimiento de traslación durante la impresión, como en las rampas dispuestas en vertical (perpendicular al desplazamiento del carro), se comprobó que existe cierta tendencia por parte de las gotas en ubicarse en el talón de las 'escaleras' modificando así la regularidad del perfil de las pistas. Fenomenología que puede deberse a la rugosidad intrínseca del sustrato (patrones inducidos por los microespejos del chip DLP sobre las superficies impresas) o simplemente a consecuencia de la tensión superficial y la cantidad de masa llegada desde los escalones superiores que por gravedad se vierte a los inferiores.

Lo cierto es que nuevas pruebas deben llevarse a cabo a fin de cuantificar la continuidad de las pistas tanto en sustratos planos, como a través de una realidad topográfica discreta en planos inclinados. La altura de capa es fundamental en este caso, puesto que la reproducción en paredes verticales no es posible al menos con estos materiales cuya adherencia es insuficiente a tal fin. El sentido de la inclinación respecto a la trayectoria de las gotas también es un parámetro a tener en cuenta puesto que modifica el drop spacing, el

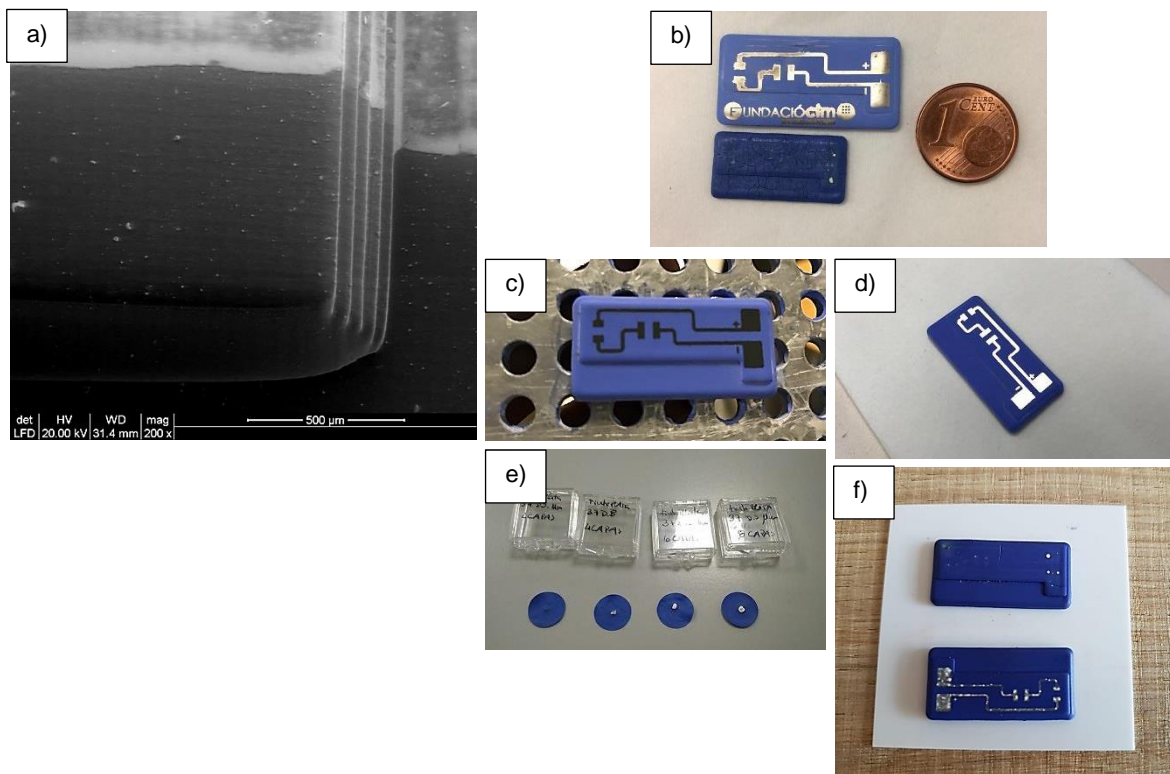
empleo de un sistema con una mayor frecuencia permitiría aumentar la densidad de punto por pulgada a una velocidad del carro de impresión constante favoreciendo la continuidad de las pistas, situación que podría llevarse a cabo distorsionando digitalmente la imagen a reproducir. De nuevo la necesidad de más pruebas vuelve a ponerse en evidencia. Finalmente, puesto que la reproducción de patrones continuos con el sistema Inkjet sobre un sustrato de barbotina cerámica se realiza como una etapa recedente a su sinterización, los niveles de continuidad eléctrica de las mismas carecen de interés puesto que en verde dicho objeto es muy frágil e inútil para cualquier fin industrial, es el estado final de las mismas tras la sinterización las que ciertamente han de cumplir las especificaciones técnicas correspondientes.



**Figura 281:** Rampa dispuesta horizontalmente de bajada reproducida mediante una única capa de tinta de plata sobre un sustrato impreso por DLP con una inclinación de  $15^\circ$  construida mediante capas de  $50 \mu\text{m}$  de espesor (a). Imagen ampliada de los escalones donde se puede apreciar la fenomenología expuesta anteriormente (b)

[Fuente: Elaboración propia].





**Figura 282:** Imagen al SEM de una rampa horizontal de subida a  $75^\circ$  de inclinación reproducida mediante una única capa de tinta presentando una conductividad nula por insuficiencia de plata en los depósitos a). Pruebas iniciales en piezas híbridas, enfatizando los problemas con la contracción irregular de las piezas durante el sinterizado b). Pruebas posteriores: Patrón estable reproducido, en estado húmedo, sobre un sustrato cerámico previamente impreso en verde c), tras el curado de la tinta gracias a la evaporación de los solventes como paso previo a la sinterización d). Distintas pruebas realizadas aumentando el número de capas impresas (2, 4, 6 y 8 de izquierda a derecha) y por tanto incrementando la cantidad de los depósitos de planta afín de reducir los efectos de la difusión de ésta, en los circuitos de la pieza tras la sinterización e) y finalmente pieza cerámica híbrida impresa y sinterizada con 3 y 4 capas de tinta de plata insuficientes para generar un depósito continuo tras la sinterización f) [Fuente: Elaboración propia].

Cabe resaltar que, recientemente se ha alcanzado un control suficiente en la estabilidad de la contracción dimensional de las piezas cerámicas impresas en 3D tras la sinterización como para que éstas sean susceptibles a llevar impresos sobre y dentro de ellas pistas conductoras o circuitos eléctricos pasivos capaces de soportar dicho proceso. Sin embargo, el número de capas, reproducidas a partir de un conjunto de parámetros de impresión prefijados y los límites en la inclinación de las rampas, junto con los espesores de capa de máximos del sistema DLP son preguntas que en el estado actual del proyecto se encuentran inconclusas. Así como la limitación impuesta por el material base (sustrato fotopolimerizado) en la reproducción de circuitos embebidos, debido a la profundidad de curado de las capas y



la altura máxima admisible por el sistema Inkjet, y en el caso de que estas sean únicamente poliméricas, como afecta el grado de polimerización local de las misma al experimentar una dilatación térmica durante el curado de las tintas y en este caso durante la sinterizado de la plata.

Lo que a priori podemos afirmar es que desde el punto de vista eléctrico mientras mayor sea el depósito de plata (más capas impresas con el sistema Inkjet) los efectos de la difusión de la misma entre los granos de la cerámica durante la sinterización afectan menos al patrón reproducido y mientras menor sea la altura de capa mejor, pero en contra, la productividad del equipo es peor. Y en sustratos poliméricos mientras más homogénea se la fotoconversión del sustrato, más regular será su comportamiento ante los incrementos de temperatura y por ende menor será su influencia en los circuitos impresos.

## **2.9. SISTEMA DE IMPRESIÓN INKJET UTILIZADO EN EL EQUIPO NHIIBRID32D**

Como bien se ha dejado patente en capítulos anteriores, la presente tesis doctoral surge como consecuencia del proyecto Nhibrid32D. Éste proyecto de investigación del programa retos colaboración del Ministerio de Economía y Competitividad (Nhibrid32D: RTC-2015-3497-7), permitió el desarrollo de un equipo de impresión híbrida en donde se combina de forma novedosa la impresión tridimensional por tecnología DLP con un sistema de deposición de gotas en régimen de eyección Inkjet accionado por piezoeléctricos.

El sistema de impresión Inkjet que a continuación se expone nace de la aplicación de los fundamentos que en apartados precedentes del presente capítulo se han expuesto. De modo que, dichos principios se ven aplicados en lo que ha supuesto la concepción de un sistema de deposición de materiales funcionales a partir de un sistema Inkjet DOD accionado por piezoeléctricos y desarrollado para ser integrado en un sistema de impresión digital híbrido. Cabe resaltar sin embargo que, que el análisis llevado a cabo de los sistemas de bombeo y el estudio de la fenomenología asociada desde la eyección hasta la fijación de los depósitos en la reproducción patrones estables y continuos sobre un sustrato cualquiera, puede sentar las bases al desarrollo de futuros sistemas de impresión con materiales funcionales, nótese el uso de materiales en plural, y en cualquier otro equipo y/o sustrato e incluso no teniendo porque ser con fines bidimensionales.

Dicho esto, se ha de resaltar que el control del sistema Inkjet desarrollado para el equipo Nhibrid32D se divide principalmente en dos partes. La primera parte es la responsable de: a partir de un archivo digital en este caso de una imagen bidimensional, generar la secuencia de instrucciones que permitirán al equipo la reproducción de dicha imagen. Por otro lado, la segunda parte es la encargada de generar las condiciones para que dicha reproducción se lleve a cabo de forma satisfactoria a través de la eyección discreta de las gotas de tinta por los nozzles del cartucho FUJIFILM modelo Dimatix DMC-11610 utilizado.

El algoritmo encargado de proporcionar al microcontrolador la secuencia de instrucciones necesarias, a través de las cuales se coordinará los distintos sistemas móviles del equipo Inkjet junto con la eyección de las gotas en sincronía para que en la descripción de una trayectoria parabólica, éstas impacten en una posición predeterminada de forma precisa secuenciada y a voluntad, ha sido desarrollado desde cero y corresponde a una tarea en la que se ha recurrido a la herramienta matemática MATLAB para su implementación, y en la cual interviene tanto el

**algoritmo de tratamiento de imágenes como algunos datos del algoritmo incremental iterativo desarrollado en la modelización del tiro parabólico, es decir, donde las gotas son eyectadas por el cartucho alojado en el carro de impresión el cual se desplaza a velocidad constante. Finalmente, en la reproducción de dichas líneas y patrones se han tenido en cuenta los fenómenos asociados a la deposición de las gotas, estableciendo a través de ellos las condiciones óptimas para que la impresión de los distintos patrones a reproducir, sean continuos y estables.**

### **2.9.1. Algoritmo para el tratamiento de imágenes**

Como ya se ha comentado una primera parte del algoritmo desarrollado consiste en la discretización de las imágenes digitales adimensionales en formato JPEG, TIFF, GIF, BMP, PNG, o XWD. Dicha discretización se lleva a cabo a través de la herramienta matemática MATLAB en donde ésta (la imagen) se subdivide en bandas discretas de altura constante ( $td$ ) correspondiente al drop spacing vertical ( $dpy$ ). De modo que, tras definir la altura que ha de tener la imagen en la reproducción ( $Y_{tot}$ ), ésta adquiere dimensionalidad bajo el principio de un píxel cuadrado en donde se mantiene una relación de aspecto constante o una misma proporcionalidad.

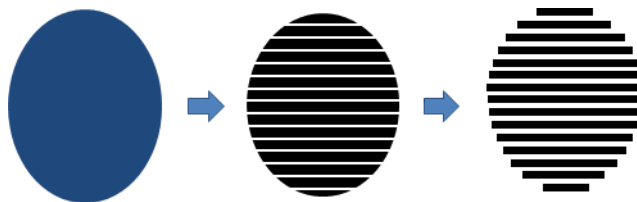
Es importante resaltar la importancia del parámetro  $td$ , el cual corresponde al grosor de las bandas discretizadoras, ya que cuanto menor magnitud tenga éste mejor será la definición de la imagen discretizada pudiendo llegar incluso a una definición sin pérdida de información si el parámetro  $td$  es menor o igual a la altura de los píxeles iniciales. Por otro lado, puesto que la reproducción de dicha imagen bidimensional se realizará bajo la premisa donde sus líneas o pistas han de ser continuas eléctricamente y por tanto, no deben ofrecer graduaciones en la densidad de puntos por píxel ni distintos niveles, además de que la deposición de las gotas eyectadas se realiza mediante un único material, se ha establecido como condición que la imagen introducida en el algoritmo debe ser monocromática (binaria) siendo este último, el algoritmo, el encargado de eliminar su profundidad de color reduciéndolo a una escala binaria (blanco (1), negro(0)).

De modo que, una vez asignado a la imagen digital una dimensión vertical ( $Y_{tot}$ ) y una vez conocido el número de píxeles que ésta posee en dicho sentido vertical nos es posible conocer el tamaño de los mismos. De manera que nos es posible definir ahora la imagen, en mapa de bits con una profundidad de color de 1 bit y con unas dimensiones asociadas. Tras la discretización de la misma en franjas de espesor constante ( $td$ ) procedemos a redefinir la imagen de forma matricialmente.

Límite sup. de la banda i en sentido vertical	Límite inf. de la banda i en sentido vertical	Píxeles de color negro Ubicación en sentido horizontal en la banda i			
$H_T$	$H_T - td$	j	k	l	m
$H_T - td$	$H_T - (2 \cdot td)$	n	o	p	q

**Figura 283:** Concepto de la matriz definitoria utilizada en el algoritmo discretizador [Fuente: Elaboración propia].

Bajo éste concepto de definición a través de una matriz en donde los píxeles representados son aquellos que poseen color (en binario aquellos que son ceros y por tanto negros). La matriz presentada muestra por filas las bandas discretizadoras y por columnas el inicio y final de la seguidilla de píxeles que constituirán una línea negra dentro de la banda, es decir en la banda 1 existen dos líneas a reproducir; la primera empieza en el píxel j y acaba en el k, la segunda empieza en l y acaba en m. De modo que, la representación de éstas línea supone dos puntos consecutivos de la matriz definitoria, cuya ubicación espacial se encuentra referenciada respecto a la esquina superior izquierda de la imagen, y en este aspecto dos líneas equivalen a cuatro puntos y un único punto (un único píxel), se representa en dos columnas dentro de una banda, y en donde en ambas casillas se representan una misma ubicación en el dominio de impresión.



**Figura 284:** Representación de la discretización de las imágenes en bandas de espesor constante, proceso realizado por el algoritmo descrito [Fuente: Elaboración propia].

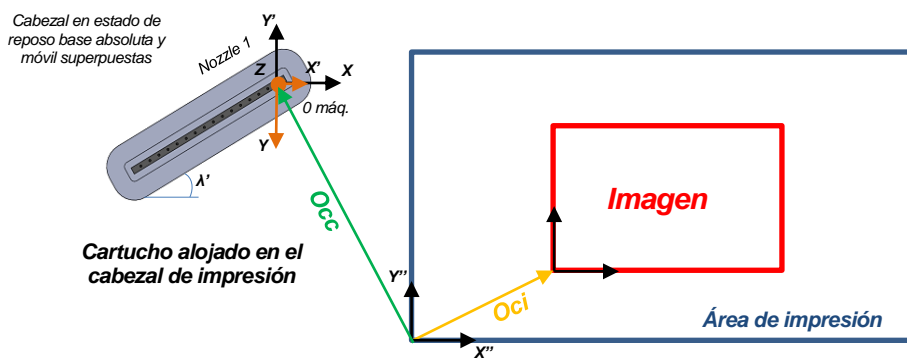
Definir a una imagen a través de una matriz en donde los píxeles son identificados por su ubicación espacial a través de una secuenciación en donde se conoce la ubicación del primer píxel y el tamaño del mismo. Y en donde, además, no se les ha añadido ningún atributo a éstos ya que solo se ubican en dicha matriz definitoria los píxeles de color negro existentes en cada banda, permite reducir las dimensiones del archivo a transmitir al microcontrolador cuya capacidad es reducida. Pero, por otro lado, evidencia la necesidad de ubicar dicho píxel inicial de referencia sobre la superficie o el dominio bidimensional definido como área de impresión.

De modo que, una vez discretizada la imagen a través de un conjunto de bandas de espesor contante ( $td$ ) constituidos por una secuencia de píxeles con un mismo atributo y definiendo matricialmente, el algoritmo de control del sistema Inkjet desarrollado entra en una segunda fase o etapa en donde se establecen las condiciones de reproducción del elemento definido en la etapa o fase anterior.

## 2.9.2. Algoritmo de reproducción

En la reproducción del archivo digital previamente discretizado, interviene un conjunto de parámetros los cuales iremos abordando secuencialmente. En primer lugar, hemos de resaltar la necesidad de referenciar la imagen dimensionalizada y definida matricialmente en una especie mapa de bits a una base fija. De forma que, ésta pueda ser interpretada por el firmware (software integrado en el equipo, necesario para controlar el hardware) y pueda ser reproducido por el sistema de deposición de materiales en régimen de eyección (Inkjet) sobre el sustrato existente en el plano de impresión.

La ubicación de dicha base fija coincide con la esquina inferior izquierda de la plataforma de construcción en donde se ubica la base móvil local  $X''$ ,  $Y''$ ,  $Z''$  (ver Figura 285). De manera que el área susceptible a la deposición de materiales por el sistema Inkjet viene definido por el plano móvil  $X''$ - $Y''$  perpendicular al eje vertical, el cual a su vez se encuentra referenciado a la base absoluta fija cuyo origen se ha definido como cero máquina. A su vez, a través éste origen (cero máquina) de la base absoluta, el cabezal de impresión puede en sus distintas traslaciones ser posicionado por medio del control de su base móvil local ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ) sobre la plataforma de construcción a través de sus grados de libertad en  $X'$ ,  $Y'$ ,  $\lambda'$ , siendo este último una rotación de ajuste en dirección  $Z'$ , en el lugar idóneo para realizar la eyección de las gotas que en conjunto impactarán en una locación concreta del área de impresión reproduciendo la imagen recién definida y discretizada.



**Figura 285:** Vectores que definen el posicionamiento de la imagen a reproducir respecto a la base local y la base móvil del cabezal de impresión, la cual a su vez se encuentra referenciada a la base absoluta [Fuente: Elaboración propia].

Cabe destacar que en el algoritmo discretizador los píxeles se referencian desde la esquina superior izquierda mientras que la imagen global una vez discretizada ahora en el algoritmo reproductor se referencia desde la esquina inferior izquierda. Por otra parte, puesto que la máquina es ciega (no tiene encoders) el posicionamiento de los elementos móviles se realiza mediante el conteo de pasos de motor, y en relación al esquema mostrado en la figura anterior se hace necesario resaltar el papel de los vectores Occ y Oci.

A través del vector  $O_{cc}$  se establece la ubicación del cabezal sobre el área de impresión, la cual se encuentra ubicada en el plano de impresión paralelo a la plataforma de construcción la cual puede estar distanciada de éste más no el sustrato que en él se erige (elemento 3D impreso). Por otro lado, el vector  $O_{ci}$ , relaciona la ubicación de la imagen a reproducir en el interior de dicha superficie de definida como área de impresión y en la cual previamente se ha de haber referenciado, ubicado y construido las capas previas de sustrato que en conjunto constituirán a la geometría tridimensional.

Por parte, tras la ubicación de la imagen a reproducir sobre el plano de impresión a través de los vectores  $O_{cc}$  y  $O_{ci}$ , dicho algoritmo reproductor solicita la definición del drop spacing (parámetro que define el distanciamiento entre gotas) en dirección al eje X, e Y. Este parámetro a su vez viene condicionado por el ángulo de inclinación del cabezal o en nuestro caso: cartucho, en el interior del carro de impresión (ver figura 332, 333 y tabla 10 del capítulo 3).

El drop spacing en sentido horizontal definido por el eje local  $X'$ , y viene impuesto por dos parámetros: velocidad del carro de impresión cuando éste alcanza una velocidad constante o velocidad de impresión tras finalizar el periodo de aceleración ( $v_{ox}$ ) el cual es fijo y conocido (impuesto por el desplazamiento del carro a través de la polea dentada y la reductora en función de la frecuencia emitida a través del driver al motor), y la frecuencia de eyección de las gotas la cual puede ser variable, de forma que:

$$\left. \begin{array}{l} v_{ox} \cdot t = dp_x \\ f_{eyec.} = 1/T \end{array} \right\} \quad f_{eyec.} = \frac{v_{ox}}{dp_x} \quad 3.411$$

Conocida la velocidad de desplazamiento del carro de impresión y fijado el drop spacing requerido, se establece la frecuencia de eyección necesaria, la cual a su vez determinará las señales de excitación de los actuadores piezoeléctricos existentes en la cámara de bombeo del cartucho, en éste caso el FUJIFILM Dimatix DMC-11610. Debiéndose comprobar que el periodo de dicha señal de excitación es superior al del de la frecuencia de resonancia del mismo. Por otra parte, debido a que la frecuencia con la que el microcontrolador envía las señales de control al driver del motor es mucho menor al de la frecuencia de resonancia del cartucho (el periodo entre flanco de subida y flanco de bajada de la señal de control del motor es mayor al periodo entre dos señales consecutivas de eyección sin tiempo de para la atenuación) permite que la introducción de una tercera señal de conmutación al cartucho que discierne entre eyección y menisco sea posible sin afectar a la primera. En este aspecto cabe resaltar que, pese a que la capacidad de posicionamiento del cabezal en dirección horizontal alcanza una precisión de las 20  $\mu\text{m}$ . El drop spacing por otra parte, en dirección al eje X puede ser muy inferior a éste al modificar la frecuencia de eyección, reduciendo el período entre gota y gota.

Por otro lado, fijado el drop spacing horizontal y la frecuencia de eyección cuya señal es condicionada por la reología de la tinta y los parámetros de impresión e introducido al

algoritmo de reproducción, a través del drop spacing vertical (dirección Y'), éste último te indica a su vez el ángulo  $\lambda'$  de rotación al que se debe manualmente ajustar el cartucho en el interior del cabezal de impresión. Dicho ángulo de inclinación viene previamente prefijado en el carro de impresión a través de un nonio, cuyos ángulos establecen 6 posibles distanciamientos todos múltiplos de  $12,5 \mu\text{m}$ , el cual es la precisión máxima que puede alcanzar el sistema en el posicionamiento del carro Inkjet en dirección al eje absoluto Y.

Como ya se ha comentado en el capítulo 2 mientras menor sea el ángulo de inclinación del cartucho en el cabezal de impresión, mayor será la resolución del sistema y por tanto mejor será en teoría la fidelidad de la reproducción, aunque el solapamiento de las gotas debido a un drop spacing vertical excesivamente pequeño puede producir la generación de cordones inestables destruyendo los patrones reproducidos y en definitiva la imagen, además de requerir de más tiempo, reduciendo la productividad del equipo. Es por ello que en el ajuste de los drop spacings se ha de tener en cuenta la interacción de las gotas eyectadas con el sustrato.

Finalmente cabe resaltar la importancia del número de nozzles activos, entre los distintos parámetros que intervienen y condicionan la capacidad reproductiva del sistema de deposición de materiales Inkjet en su proceso de reproducción del archivo digital. A través de dicho parámetro se define el número de nozzles activos, es decir, de los 16 existentes, enumerados y dispuestos linealmente en el interior del cartucho, se define cuál de éstos eyectaran gotas. Se ha de aclarar que éstos han de ser secuenciales sin nozzles inactivos en medio. De igual forma, mientras mayor sea el número de nozzles activos, mayor será el área cubierta por el cartucho en su desplazamiento horizontal y por tanto menor serán los tiempos de reproducción.

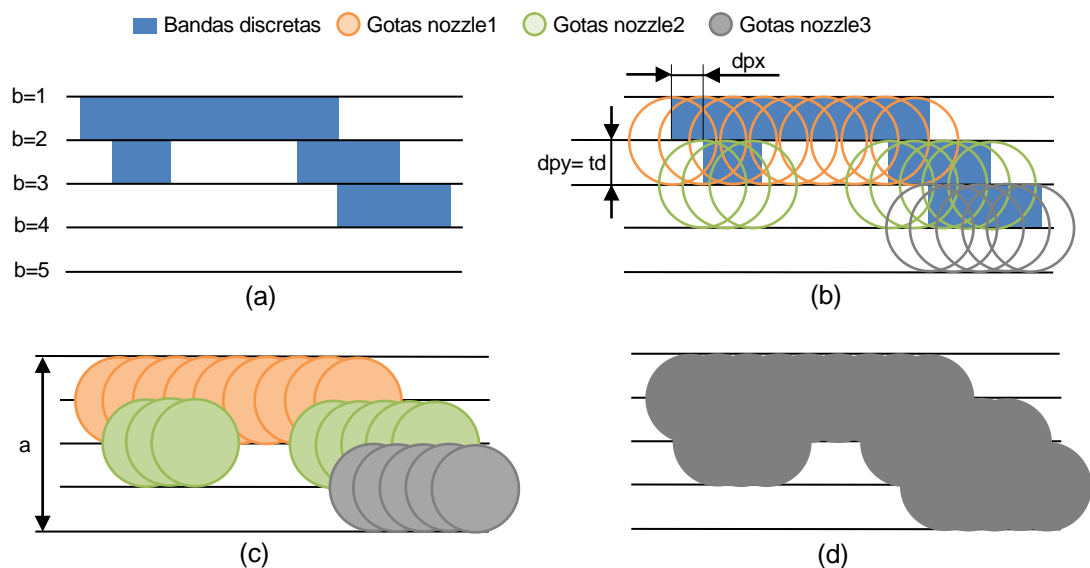
Por último, decir que en la determinación de la ubicación de los puntos sobre el plano de impresión a partir de los cuales, el cabezal de impresión en sus distintos saltos verticales (dirección eje Y) procederá a eyectar gotas de forma discreta mediante la conmutación de las señales de excitación y menisco a través de los nozzles activos, para que éstas impacten en una locación concreta y en una secuencia determinada, se ha de tener en consideración la trayectoria que éstas describen desde su eyección hasta su impacto y en consecuencia se hace uso de un parámetro correctivo determinado a través del algoritmo incremental iterativo expuesto con anterioridad y utilizado para modelizar dicha trayectoria parabólica y predecir donde éstas impactaran. Éste parámetro correctivo únicamente ajusta horizontalmente (eje X) el lugar de la eyección de las gotas para que estas impacten donde deben y en consecuencia la imagen se reproduzca en una locación concreta en el sustrato. La ausencia de este parámetro desplazaría la imagen ligeramente a la derecha, aunque en conjunto no perdería su proporcionalidad siempre y cuando el sustrato sea plano.

De modo que, éste algoritmo reproductor tras recibir del algoritmo discretizador una matriz en la que se describe la ubicación de las bandas y dentro de ellas la ubicación de los píxeles

de color negro y en conjunto definen la imagen a reproducir. Y tras referenciar ésta matriz a una base absoluta fija y tras imponer los parámetros que condicionan a la reproducción, éste (el algoritmo reproductor) procede bajo la premisa donde cada gota de material representa una porción del píxel y donde múltiples píxeles seguidos constituyen un cordón de gotas ligeramente solapadas, a generar la secuencia de instrucciones que definirán el cómo reproducir lo definido con los materiales disponibles, las cuales serán leídas por el firmware del equipo y ejecutadas por el hardware.

Tomando como referencia el primer nozzle activo del cartucho cualquiera que sea éste de los 16 (ver Figura 285), y conociendo el número de éstos activos ( $N$ ) junto con el ángulo de inclinación ( $\lambda'$ ), establecemos el número de pasadas (desplazamientos horizontales) que ha de llevar a cabo el cabezal de impresión a distintas cotas verticales separadas por el ancho de la pasada, es decir, del parámetro  $a = 254 \cdot \text{sen}(\lambda') \cdot N$ , múltiplo de  $12,5 \mu\text{m}$  afín de reproducir dicha imagen bidimensional definida en etapas anteriores.

A continuación, se muestra esquemáticamente la labor del software de control del sistema Inkjet desarrollado y constituido por los algoritmos de discretización, corrección del tiro y de reproducción.



**Figura 286:** Definición de una imagen a través de su discretización por bandas a), representación simulada mediante la deposición de las gotas eyectadas de forma discreta por el cartucho en dispersión y secuenciación b y c). Finalmente, imagen reproducida bajo las condiciones impuestas d) [Fuente: Elaboración propia].

De modo que, en un primer paso el algoritmo reproductor procede a redefinir la imagen referenciandola a la base fija absoluta del elemento reproductor (impresora). Por otro lado, en dicho proceso también se introduce la compensación de la desaceleración que experimentan las gotas al describir la trayectoria parabolica fruto del rozamiento con el aire.



En consecuencia la matriz mostrada en la Figura 283 deja de representar la ubicación física de la imagen sobre el plano de impresión, para representar en donde el carro de impresión ha de posicionarse (pasos de motor) para dar inicio a la deposición de las gotas y cuando éste ha de concluir dicho proceso, estableciendo un vínculo con el mismo y los elementos móviles que permite su desplazamiento.

Como se puede apreciar en la imagen anterior, la capacidad de discretización por bandas es superior a las capacidades de reproducción del equipo cosa que en principio en un sistema convencional supondría un problema aunque no en nuestro caso puesto que las gotas pueden y deben solaparse. Por tanto, como se puede apreciar en la figura anterior cada banda será reproducida por gotas solapadas (Figura 286a), cuya huella posee un diámetro igual al doble de su altura ( $2 \cdot td$ ). De modo que, estando éstas ubicadas en el límite inferior de dicha banda llamémosle  $i$  (Figura 286b) se asegura que por exceso las bandas superiores e inferiores se encuentren unidas y relacionadas por el drop spacing vertical (dpy). Por otro lado, la inclinación del cartucho en el interior del cabezal de impresión supone que las gotas impacten en el sustrato de forma secuenciada (Figura 286c) y en consecuencia la interacción de estas no se lleva a cabo al mismo tiempo fomentando la estabilidad de los depósitos y en consecuencia los procesos de fijación y cambio de fase también se realizan de forma secuenciada. Finalmente, valiéndonos del conocimiento de la forma que adopta la huella de la tinta empleada sobre el sustrato, es posible simular la reproducción bajo las condiciones de impresión y observar el hipotético acabado del mismo tras culminar el proceso (ver imagen esquemática de la Figura 286d).

El proceso de reproducción mostrado sin embargo, ha de pasar por un ajuste previo antes de transferir la información al microprocesador principal para que éste a través del firmware proceda a ejecutar las instrucciones que permitan al hardware reproducir dicha información. Y en este aspecto nos referimos a ajustar la altura del carro de impresión sobre el sustrato, puesto que la plataforma posee desplazamiento vertical y dicho sustrato crece con cada capa depositada por el sistema DLP, así como también se ha de ajustar la matriz compensada de puntos del sistema Inkjet, en donde se definen la ubicación de los puntos en donde se ha de conmutar las señales de accionamiento y menisco de los nozzles activos del cartucho utilizado sobre el plano de impresión, a pasos de motor alcanzables bajo las capacidades del sistema. De manera que, tras estos ajustes finales o de calibración, hemos referenciado la ubicación de la imagen a reproducir con sus correspondientes bandas discretas respecto al cero máquina y teniendo en cuenta la ubicación del sustrato sobre el área de impresión. Cabe añadir, que dichos puntos que definen el inicio y final de las bandas a reproducir y corresponden a puntos asequibles por el sistema de posicionamiento existentes en el equipo al ser considerados como pasos de motor.

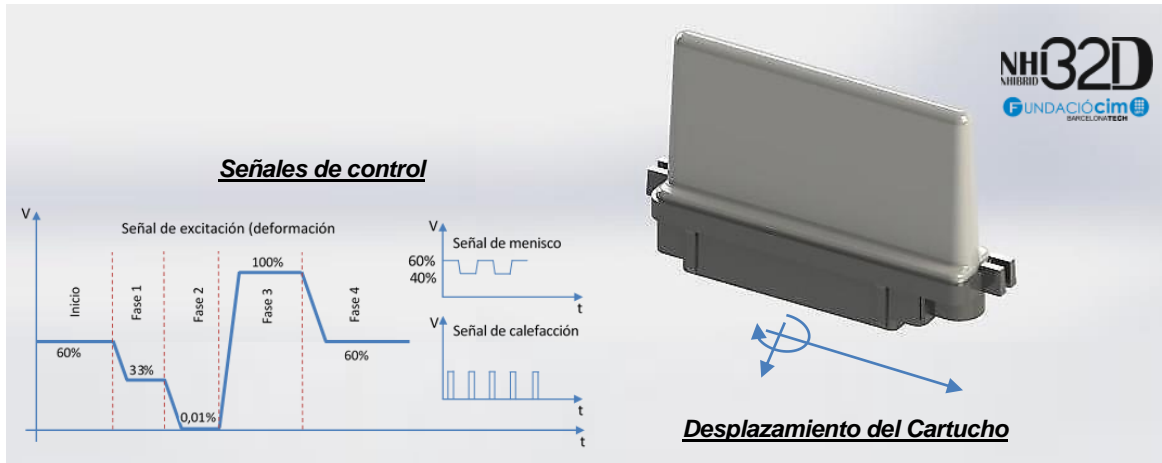
A modo de resumen, el control del sistema Inkjet desarrollado para el equipo Nhibrid32D funciona de la siguiente forma: partimos de una imagen digital adimensional, la cual es convertida en monocromática y con una profundidad de color de 1 bit/píxel. Posteriormente, se dota a ésta de dimensiones y se discretiza en bandas horizontales de altura constante proporcional al diámetro de la huella (td). A continuación, se establece una matriz en donde se identifican los punto de color de inicio y final existentes dentro de cada banda. Posteriormente, teniendo en cuenta los parámetros de impresión (vox,dpx,dpy,n,Occ,Oci,Corr\_x) el algoritmo reproductor nos devuelve el ángulo de giro al que debe posicionarse el cartucho en el cabezal ( $\lambda'$ ), y tomando la matriz de definición de la imagen anterior, nos devuelve una matriz referenciada al cero máquina y dentro del dominio de impresión, donde la imagen que representa se encuentra definida en pasos de motor.

Así, teniendo en cuenta el dominio de impresión (plano bidimensional del sistema Inkjet); cada desplazamiento vertical realizado por el carro Inkjet (mediante los motores del eje Y de 12,5  $\mu\text{m}$  de precisión por paso) tras culminar su desplazamiento horizontal, representará el inicio de la reproducción de un nuevo set bandas horizontales, tantas como nozzles tengamos activos. La culminación de la imagen digital a imprimir finaliza cuando todas las bandas han sido reproducidas por el sistema.

Cabe destacar también que el punto (paso de motor) de inicio existente en cada banda  $b$  habilita la señal de eyección (señal eléctrica de excitación del piezoeléctrico  $i$  del sistema de bombeo del cartucho ajustado a la reología de la tinta y las condiciones de impresión) en el momento en el que motor alcanza dicha posición generando la eyección del tren de gotas correspondiente al nozzle activo  $i$  ( $i = 1, \dots, 16$ ). De igual manera, el píxel final o el paso de motor que define el final de la línea de color existente en banda  $b$  deshabilita dicha señal comutandola con la de menisco la cual mantiene vibrando al nozzle afin de que este no se obture por la evaporación de los solventes de la tinta.

Finalmente, la transmisión de los datos al microprocesador (Arduino Due) se ha realizado de forma sincronizada y por bloques afin de no colapsar la memoria de éste durante las etapas de recepción, lectura y ejecución. Es decir, la matriz definitiva recibida por el microprocesador que en definitiva constituye una gran cantidad de triggers (millones en algunos casos) que habilitan y deshabilitan los nozzles activos del cartucho mientras que éste se desplaza solidario al carro de impresión, ha requerido que tanto la emisión de la secuencia de instrucciones aportadas por el Matlab como la recepción las mismas se lleven a cabo teniendo en cuenta la frecuencia del microprocesador afin de no perder información por el camino. Por otra parte, dicha información se ha enviado en bloques gestionables por dicho microprocesador afin de no saturar la memoria y por tanto la reproducción de dicho archivo digital no se realiza de forma continua sino discreta a saltos siendo cada una de

éstas pausas, las requeridas para recibir un nuevo bloque de instrucciones o lo que es lo mismo un nuevo set de bandas a reproducir sobre el plano de impresión.



**Figura 287:** Representación esquematizada del sistema de impresión de materiales funcionales aplicada en el equipo Nhibrid32D basado en el control de los cartucho FUJIFILM modelo Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia].

De esta forma y junto con las pruebas realizadas y mostradas en el capítulo 4 se valida la posibilidad de combinar dos sistemas de reproducción digital, como son el sistema DLP de impresión tridimensional con un sistema de impresión funcional Inkjet fundamentado en un sistema DOD accionado por piezoeléctricos en este caso a través de cartuchos sustituibles.

## **2.10. SISTEMAS DE REPRODUCCIÓN TRIDIMENSIONALES Y MULTIMATERIALES BASADOS EN LOS SISTEMAS INKJET**

En apartados precedentes hemos podido apreciar el desarrollo de un sistema Inkjet concebido para la reproducción de pistas conductoras mediante la deposición de un único material funcional sobre un sustrato que, debido a las peculiaridades del equipo Nhibrid32D dicho sustrato es previamente impreso en 3D y por tanto por ser un sistema híbrido, permite mediante la combinación de dos tecnologías la reproducción de dichas pistas de forma bidimensional y tridimensional tanto en la superficie de un elemento como en el interior una geometría tridimensional.

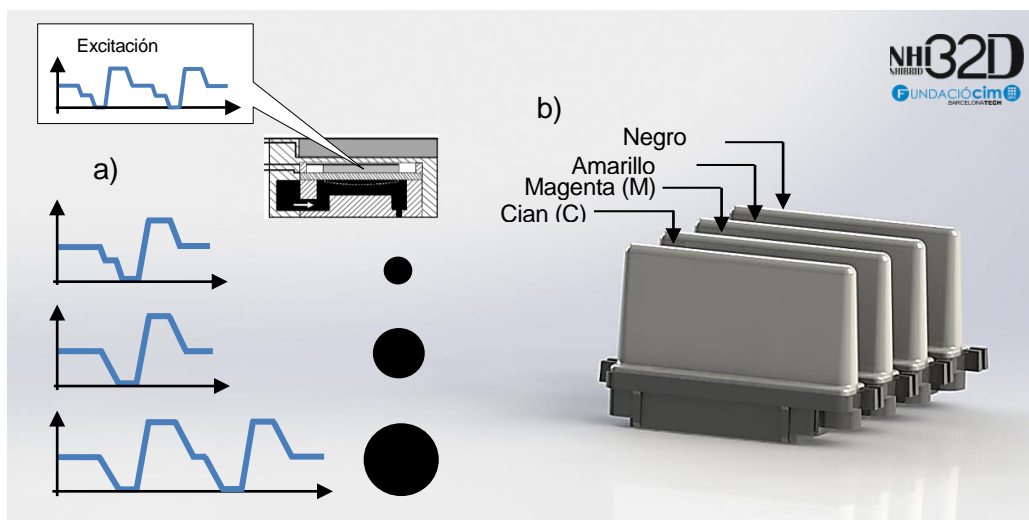
La extrapolación de dichos principios ahora en la reproducción de una geometría tridimensional mediante la deposición de trenes de gotas de forma secuenciada y a voluntad requiere que primero se aborden los principios de la impresión bidimensional a color para que, mediante la sobre impresión de múltiples capas y el uso no solo únicamente tintas poliméricas de color, se reproduzcan (impriman) a través de vóxeles dichas geométricas con los materiales disponibles en el equipo funcionales o no.

Como he se ha podido apreciar en el capítulo 1, la reproducción de imágenes a color se fundamenta en la dotación de un atributo cromático a cada uno de los píxeles que constituyen una imagen digital recurriendo a la profundidad de color. Dependiendo del modelo empleado; aditivo (RGB pantallas que emiten luz) o sustractivo (CMY impresión no emiten luz) mediante la combinación de múltiples elementos cromáticos, en nuestro caso 4 (Tinta; cian (C), magenta (M), amarilla (A) y negra (K)), se puede llegar a reproducir tantos colores (combinaciones de éstos elementos) como sea el sistema capaz de reproducir. Dicha capacidad de reproducción se fundamenta primero en la capacidad de definición del archivo digital (número de píxeles y profundidad de color) y segundo, en la capacidad de reproducción del equipo, principalmente en el tamaño de las gotas y la precisión en el posicionamiento de estas.

Centrándonos en las capacidades del equipo reproductor “impresora” y bajo la premisa de que las gotas se depositan sobre una locación fija en el dominio de impresión, en una impresora bidimensional: un mayor número de píxeles en un área finita (píxeles más pequeños) supone un aumento en la resolución del equipo. Mientras mayor profundidad de color ofrezca éste ofrezca, mayor número de subdivisiones del píxel (menor drop spacing, mayor precisión) y por tanto un mayor número de locaciones posibles de las gotas en el interior del píxel, mayor graduación de color y por tanto en conjunto mayor fidelidad cromática de la reproducción, lo que a su vez se resume nuevamente en la necesidad de

depositar gotas más pequeñas de forma más rápida (productividad) y precisa. El estado actual de la técnica a llevado en la generación de píxeles de color a no solo a modificar la densidad de puntos mediante la locación de las gotas en el interior de los píxeles sino a modificar también su huella a través de los distintos niveles. Por otra parte, desde un punto de vista tridimensional, vóxeles más pequeños en un volumen finito supone mayor fidelidad geométrica y estos con una mayor profundidad de color o de cualquier otro atributo, suponen mayor fidelidad crómica en este caso, en definitiva gotas más pequeñas y de mayor variedad volumétrica depositadas de forma más rápida y precisa, pero con la diferencia que ahora en el vóxel debe ser llenado por completo, de forma que constituya una unidad maciza formada por una amalgama de materiales.

En 2D se recurren a la capacidad integradora del ojo humano para que mediante la deposición de gotas aisladas y de distintos niveles (tamaños), éstas generen la ilusión de un tono continuo, en 3D esto no es posible, de modo que las gotas han de estar parcialmente solapadas afín de generar una superficie totalmente recubierta y mediante la superposición de éstas (capas) constituir un vóxel macizo. En la figura de a continuación basado en el cabezal analizado se muestra la forma en la que se podrían genera distintos niveles de gotas, ver Figura 288.



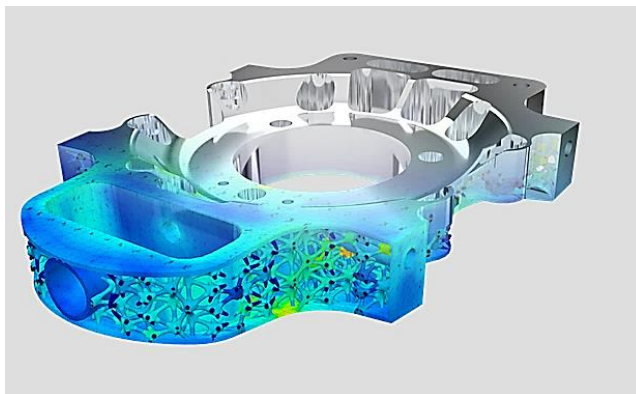
**Figura 288:** Representación conceptual de un sistema Inkjet DOD accionado por piezoeléctricos con múltiples señales de excitación acordes a distintos niveles en el volumen eyección a), y representación basada en los cartuchos empleados emulando un sistema multicolor a base de tintas CMYK b) [Fuente: Elaboración propia].

Dejando a tras este inciso y volviendo a la reproducción de geometrías tridimensionales, en primer lugar, hemos decir que; el paso previo o que antecede a toda reproducción, es la definición que viene a su vez precedido del conocimiento. En este aspecto puesto que como el humano interpreta el entorno a través de sus sentidos y tras un cúmulo de experiencias compartidas y registradas, éste ha adquirido un conocimiento que le ha llevado a definir con

más o menor acierto lo que percibe, y en la actualidad con herramientas maximizadoras de dichos sentidos iniciales (un microscopio o un telescopio por ejemplo, supone la extensión de nuestros ojos permitiendo magnificar nuestro sentido de la vista) dicha percepción se ha visto exponencialmente aumentada y en consecuencia la definición de nuestro entorno es más próxima a la realidad de lo que fue con nuestros antecesores y por ende será menor que la que podrán alcanzar sus futuros sucesores.

Nos encontramos inmersos pues, en una secuencia de hechos que ha condicionado el estado actual de la técnica. En el campo que nos ocupa por ser muy multidisciplinar, hemos de poder definir en primera instancia, para poder con los recursos que disponemos (energía, materiales) reproducir con la fidelidad que los medios técnicos actuales (impresoras) nos permita lo definido previamente.

En cuanto a la definición de los objetos a reproducir; los CAD actuales que, como resultado de un conjunto de cálculos matemáticos relativos a la posición y a la forma, permiten dotar a los objetos que representan a través de una interfaz gráfica, de un conjunto de atributos algunos de ellos superficiales y relativos a la posición, y otros más generalistas dentro del volumen que describen. En este aspecto, fundamentados en el arraigo histórico de las técnicas sustractivas o de conformación más tradicionales, hasta ahora no teníamos la necesidad de describir el interior de un objeto puesto que en principio no somos capaces de percibir el interior de un elemento sólido y tampoco éramos capaces de conformar el interior de los mismo con un cierto grado de complejidad, y en este aspecto nos referimos a estructuras internas huecas (vacías) variables localmente, o constituidas por múltiples materiales dispuestos en combinaciones y en graduaciones a voluntad. De modo que, en este sentido se ha de decir que en la actualidad a saber no existe o se encuentra en desarrollo, pero no disponible un software capaz de definir mediante atributos locales el interior de los objetos que éste define y representa.

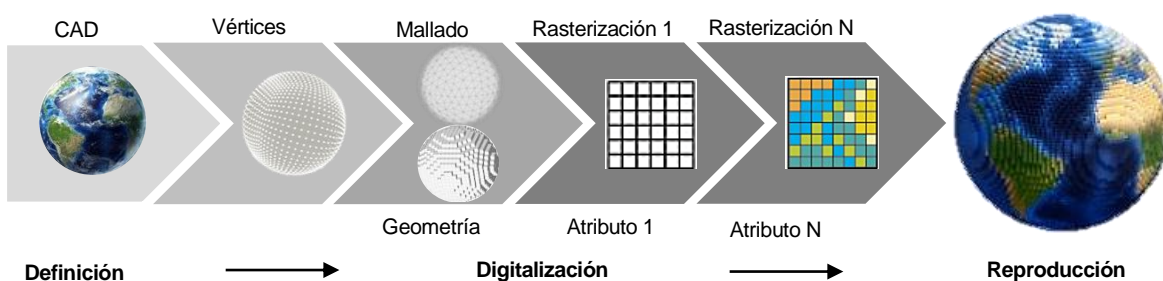


**Figura 289:** Imagen de una pieza monomaterial generada a través de la herramienta Netfab aportada por Autodesk para procesos de fabricación aditiva en el TCT show de Birmingham 2017 [331].

Por tanto, pese a que la fabricación aditiva como sistema de reproducción pueda en principio tener el potencial de materializar un objeto a través de la combinación de múltiples materiales con propiedades localizables dentro del dominio físico que conforma al objeto, generando en conjunto graduaciones de las mismas y diseñadas a voluntad. Hasta que no se creen las herramientas informáticas que nos permitan representar y en consecuencia definir los objetos que los usuarios puedan llegar a concebir, los investigadores verán mermadas las capacidades de estos sistemas de reproducción, llamémosles en éste caso de fabricación aditiva o de impresión 3D o de Rapid Prototyping.

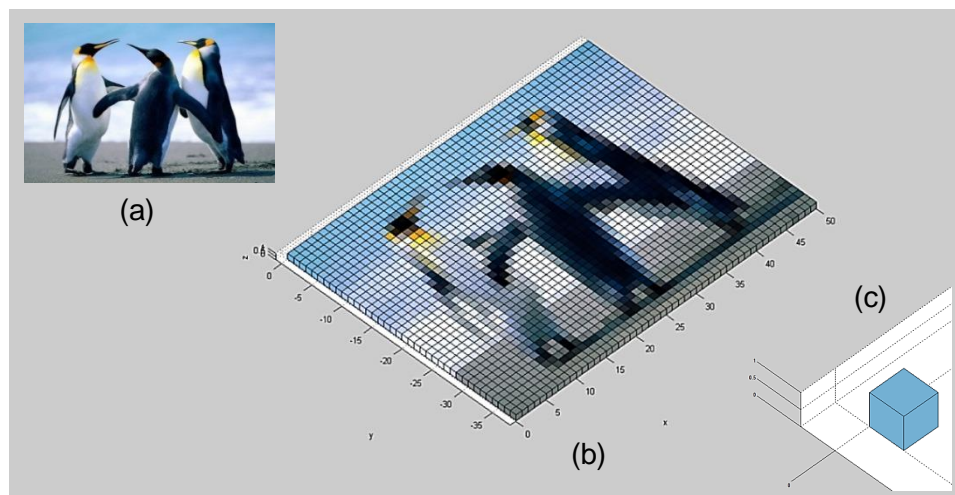
En la reproducción por otro lado, a diferencia de la definición intervienen los recursos con los que contamos para materializar lo definido y en este sentido nos referimos a la calidad de los materiales y el modo en el que la técnica actual permite manipularlos, que en el caso que ahora se plantea (la reproducción de un objeto tridimensional bajo los principios del polyjet pero con nuevos atributos gracias a la introducción de materiales funcionales en el número de variables disponibles) se llevará a cabo mediante la deposición de éstos en forma líquida o en su defecto inmerso en un medio fluido. De manera que, conocidas las limitaciones impuestas por los materiales y el modo en el que éstos se depositan, el paso de la definición digital del objeto a su materialización pasa por discretizar éste. Dicha discretización condicionará la fidelidad de la reproducción como ya se comentado anteriormente indistintamente de las capacidades del equipo reproductor y si este lo hace a través de una pantalla, o como es nuestro caso de forma física (impresión). Nos referimos en este aspecto a la píxelización de una imagen a través de un mapeado bidimensional o a la voxelización de un elemento tridimensional y cuya información debe ser transferida al firmware en una estructura binaria, en definitiva.

De modo que, continuando con esta línea, propongo volver a los archivos AMF, en cuya estructura multinivel nos proporciona una definición más detallada del elemento a reproducir, ofreciendo la posibilidad liberar el potencial creativo de los sistemas de fabricación aditiva multimaterial, indistintamente de la funcionalidad del elemento reproducido, nos referimos en este aspecto al prototipo rápido (RP) o la fabricación aditiva (AM).



**Figura 290:** Pasos en la definición de un objeto y su posterior representación voxelizada con un número  $N$  de atributos [Fuente: Elaboración propia].

Como se puede apreciar en la secuencia anterior, se propone partir de un archivo CAD capaz de definir el objeto a reproducir vectorialmente (de forma continua) y a través de un conjunto de atributos locales, pensemos en éste aspecto solo en propiedades crómicas y en materiales. Y tras la definición del mismo como un conjunto de ecuaciones y fórmulas matemáticas contenidas en un archivo digital, pasar a mallar éste y en vez de recurrir a los elementos triangulares de un stl, se propone utilizar como elemento discretizador el equivalente topológico de una esfera, es decir, en este caso un cubo. De forma que, bajo el principio de rasterización, se propone discretizar al objeto mediante un conjunto de planos paralelos equiespaciados y perpendiculares a sus tres ejes de referencia, generando una red vértices equiespaciados en un volumen que contendrá al objeto tridimensional. Cabe destacar que los planos paralelos y perpendiculares al eje Z han de estar espaciados a una distancia equivalente a un múltiplo de la altura media que poseerán las semiesferas que generan los depósitos de los materiales depositados tras alcanzar su equilibrio. Posteriormente se procede a definir cuál de éstos los cubos (elementos discretos) identificados bajo una secuencia y cuya posición es conocida, si pertenece al dominio definido por la pieza o no.



**Figura 291:** Representación conceptual de la definición de una capa cualquier de una geometría segmentada en capas a través de una imagen bidimensional. Imagen 2D cualquier definida a través de un sistema RGB de profundidad de color de 8 bit por canal a). Representación de esta a través de vóxeles con un atributo cromático b) y Resaltado el vóxel ubicado en la posición 1,1,1 c) [Fuente: Elaboración propia]

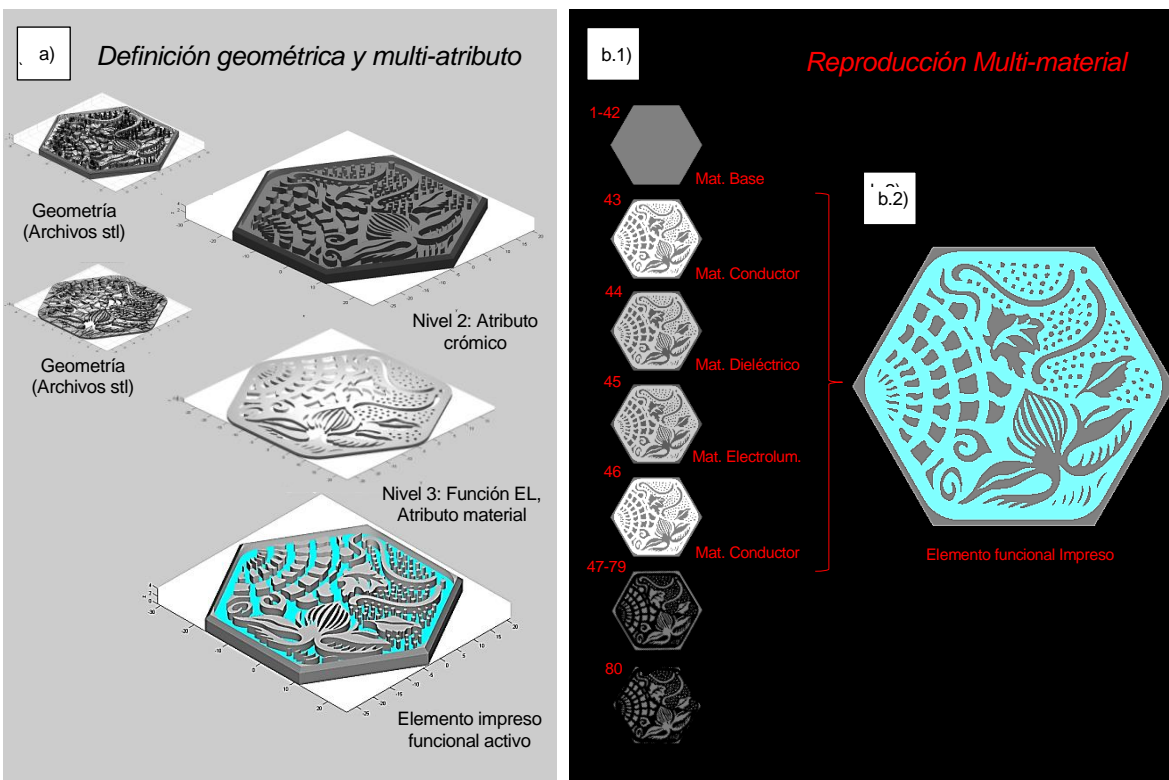
Una vez discretizada la geometría del elemento tridimensional a reproducir, y definida en un primer nivel de la estructura planteada, como una matriz tridimensional de puntos referenciados a una base local. Se procede a añadir a ésta matriz de puntos (fijada previamente las dimensiones del vóxel y por tanto la fidelidad geométrica del sistema) nuevas dimensiones, y a través de la unión de éstas en un nuevo nivel se define un atributo correspondiente c/a elemento discreto (vóxel) a través del cual se define digitalmente el



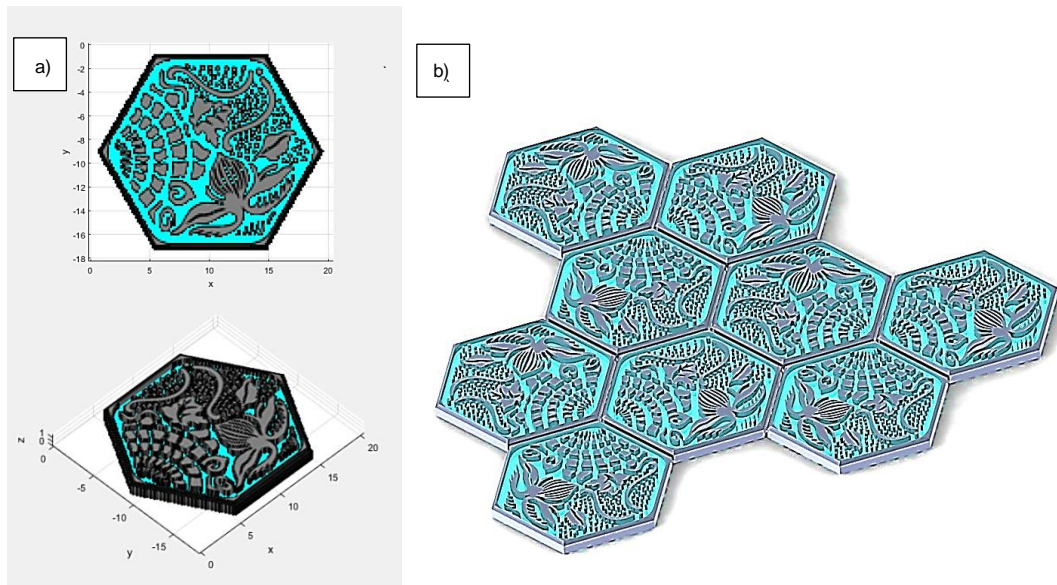
elemento a reproducir (objeto, alimento, tejido, ....), tomemos una geometría cualquiera como en el ejemplo de a continuación (Figura 292), a través del cual una vez definida la geometría y sus propiedades crómicas, en las reproducción de la misma (digitalmente no físicamente) y gracias al empleo de materiales funcionales se ha dotado a esta de la habilidad de emitir luz.



**Figura 292:** Imagen de las baldosas del Paseo de Gracia diseñadas por Gaudí como ejemplo de una geometría simple a reproducir [Fuente: elaboración propia].



**Figura 293:** Representación conceptual de la etapa de definición digital del objeto a reproducir a), y su reproducción a través de una impresora multimaterial b). Secuencia de capas a reproducir con los respectivos materiales empleados en ellas b.1), e imagen en planta del objeto reproducido con materiales funcionales b.2) [Fuente: elaboración propia].

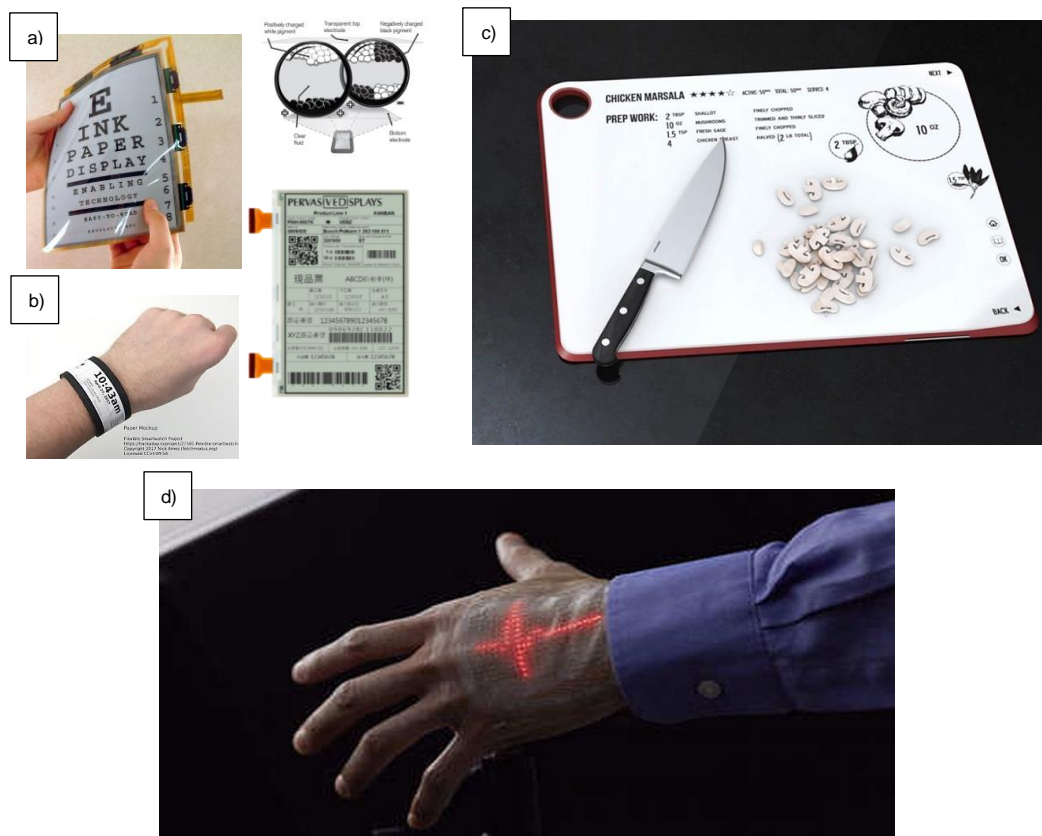


**Figura 294:** Representación de una geometría constituida por vóxeles multiatributo: Vista en planta y en perspectiva de la geometría a reproducir representada a través del Matlab con una resolución geométrica de  $1/3$  de la capacidad máxima programada a) y representación renderizada de múltiples baldosas activas dispuestas sobre una superficie plana b)

[Fuente: elaboración propia].

En este aspecto los sistemas actuales de reproducción centrados principalmente en prototipos, recurren a materiales poliméricos fotosensibles dotados de pigmentos para proporcionar a los vóxeles los atributos visuales, nos referimos en este sentido a coloración, opacidad y traslucidez, es decir una función visual. Recurriendo a los materiales funcionales, y extrapolando la habilidad de éstos sistemas de reproducción (impresoras) de depositar de forma eficiente gotas dentro de un dominio espacial, abre la posibilidad de reproducir mucho más que solo color. En este sentido el uso de un medio líquido para transportar y depositar “algo en alguna parte” magnifica la importancia del que depositar y lleva implícito el “para que”, es decir, cuál es su función quizás proporcionar rigidez, flexibilidad, conductividad, un sabor, un olor, o conferir al objeto una propiedad biocida, antimicrobiana, etc.

De forma que, desde un punto de vista más amplio podemos resumir: partimos de una geometría definida digitalmente, la cual ha sido discretizada y cuyos elementos discretos han sido dotados de múltiples atributos. La reproducción de estos elementos discretos se realiza de forma aproximada mediante la graduación y combinación de los materiales existentes o disponibles en el equipo cuya fidelidad vendrá establecida por el número de vóxeles y la profundidad del color en el caso de que tengamos un atributo crómico.



**Figura 295:** Incipientes aplicaciones a día de hoy de la impresión funcional mediante el empleo de e-Ink en la reproducción bidimensional de etiquetas inteligentes a), y brazaletes monitorización b). Ejemplo conceptual de la introducción de éstas en objetos tridimensionales, en concreto en utensilios domésticos inteligentes con una alta interacción con el usuario en este caso fundamentada en la vista c) y finalmente nuevas aplicaciones por parte de la universidad de Tokio en el desarrollo de la impresión funcional biocompatible en comunión con el internet of things para el monitoreo de pacientes en tiempo real d) [332].

Así pues basándonos en los ficheros AMF, se plantea una estructura multinivel en donde en un primer nivel se proporciona la información geométrica del elemento a reproducir (ubicación de los vóxeles). En un segundo nivel se define las propiedades cromáticas (desde un punto de vista más amplio visual) de algunos elementos discretos que constituyen al elemento a reproducir a través de su profundidad de color. En un tercer nivel se proporciona la información asociada a los vóxeles dotados de otros atributos recurriendo a la profundidad de material. El número de niveles crece a medida que conferimos más atributos al objeto a reproducir. La combinación de múltiples atributos dentro de un mismo nivel puede ser posible siempre y cuando los materiales que proporcionan dicha propiedad no sean mutuamente excluyentes, aunque por otro lado cabe resaltarse que, una mayor número de materiales combinables en un mismo nivel también hace que su unidad elemental (el vóxel) posea un mayor dimensión para un mismo tamaño de gota).

De modo que, se propone partir de una estructura preestablecida del tipo:

**Nivel 1:** Descripción geométrica discreta del elemento, mediante una matriz identificativa de dimensión, posición, identificación, por ejemplo:

$$DGD = f(:, :, :, A) \quad 3.412$$

Donde f supone una matriz tetradimensional binaria, definiéndose así la existencia y la ubicación de c/a vóxel en el interior del dominio de impresión. A través de la cuarta dimensión del nivel 1 se define el tipo de atributo (A) con éste a través de los siguientes niveles las propiedades de dichos vóxeles del objeto a reproducir.

**Nivel 2:** Definición de las propiedades cromáticas de forma discreta y a través de los recursos disponibles en el sistema (elementos básicos que el sistema posee e involucra en la dotación del atributo crómico al vóxel). Mediante una nueva matriz se identifica el color de cada píxel, si contamos con 5 elementos o variables y pongamos que cada uno de estos se pueden depositar dentro del vóxel de 15 formas distintas atendiendo a densidad de puntos sobre el sustrato y/o intensidad o nivel de volumen de las gotas dentro de un píxel y por tanto capaz de crear  $2^{(4 \times 5)} = 2^{20}$  posibles colores distintos a partir de la combinación de los elementos CMYKW y en las distintas graduaciones. De modo que el color 0 representa la ausencia de todos los elementos anteriores y por tanto un píxel sin atributo crómico, un vóxel vacío de color, y el color 1.048.575 equivale a un píxel constituido por la integración de los 5 elementos crómicos base y todos ellos en su máxima nivel intensidad.

De manera que, se plantea una matriz bidimensional en donde cada vóxel por su ubicación dentro del nivel 1 se le asocia una array de 5 posiciones y cada una de ellas se define en función de la profundidad de color, es decir la graduación de cada una de los colores disponibles en el equipo. Así mediante la superposición N capas constituidas por 5 píxeles monocromáticos en escala de grises se reproducirá dicho vóxel cromático.

Matriz principal en donde se identifica el color:  $DCD = c(:, :, :, :, :)$  3.413

					C	M	Y	K	W	Color
1.048.575	750.553	58	19		0	0	0	0	0	0
1.048.575	850	8.504	850		0	0	0	0	1	1
22	931.960	279.461	8.504		1	1	1	1	1	31
2	1	2	9.574	(a)	2	2	2	2	2	$2^{10}-1$
					4	4	4	4	4	$2^{20}-1$

(b)

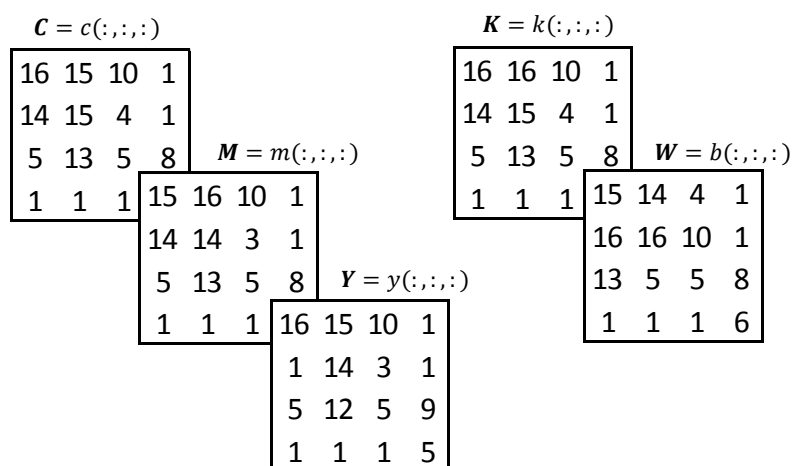
**Figura 296:** Representación de una hipotética matriz definitoria en este caso bidimensional o relativa a la capa i de 16 vóxeles capaz de definir un atributo crómico con una capacidad de reproducir una profundidad de color de  $2^{20}$  (a). A la derecha, identificación del color como una combinación de 5 elementos depositados de 4 formas distintas atendiendo a densidad

de puntos e intensidad o nivel de volumen de las gotas por elemento (b)

[Fuente: Elaboración propia].

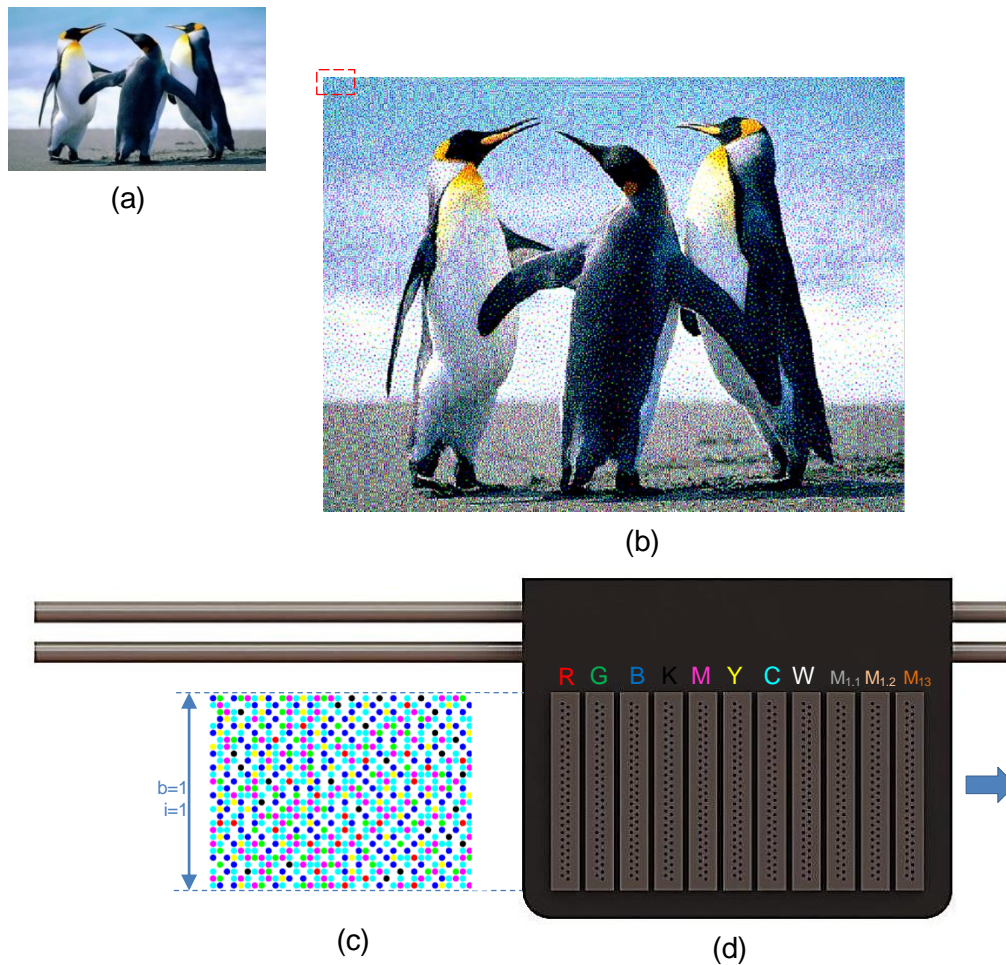
Posteriormente tras identificar los elementos que integran al color del vóxel y en su graduación (de 0 a 15 en este ejemplo), como hemos podido ver en la tabla b anterior en donde las variables CMYKW equivalentes a un material polimérico fotosensible opaco con coloración; cian, magenta, amarillo, negro, blanco se combinan para alcanzar todos los matices que éste hipotético sistema permite. Para facilitar la gestión de dicha información, volvemos a proponer el uso de matrices pero en este caso de 5 submatrices bidimensionales (correspondientes a una imagen rasterizada o capa en este caso), una por cada variable, color, o material y capaces de definir la intensidad de cada uno de éstos elementos (ver Figura 297). De forma que, tras la superposición de éstas y tras una definición previa de las locaciones de las gotas dentro de cada área (píxel) para cada graduación (intensidad) de la escala de grises, cada capa de los vóxeles queda definida pudiéndose establecer un vínculo con los cabezales o cartuchos de impresión.

Cabe destacar nuevamente que dichas graduaciones puede llevarse a cabo de tres formas: la primera: aumentando la densidad de punto (píxel de área finita y gotas de un tamaño fijo) y con ello modificar la posición de las mismas, segunda modificar el tamaño de las gotas con una locación fija en el interior de un píxel, y tercero una combinación de las anteriores, es decir, en su equivalente volumétrico, gotas de distintos volúmenes ubicadas de forma variable en el interior de un píxel volumétrico, es decir, del vóxel.



**Figura 297:** Representación de las submatrices identificativas de la graduación de los elementos involucrados en la reproducción de cada vóxel [Fuente: Elaboración propia].





**Figura 298:** Representación esquemática de un sistema de impresión multimaterial capaz de reproducir objetos vóxelizados provistos de distintos atributos. (a) Vista en planta de una capa a reproducir (imagen 2D anterior) (a). Resaltado en rojo: porción de la imagen a reproducir tras utilizar el algoritmo de Floyd Steinberg (b). Reproducción de la porción resaltada en el equipo reproductor conceptualizado visto en planta, capa  $i$  de un vóxel  $x$  constituido por 5+3 elementos base sin graduaciones (binario) perteneciente a la banda  $b$  (c). Disposición de los cabezales en un hipotético carro de impresión con 11 materiales distintos (8 cromáticos y 3 funcionales) (d) [Fuente: Elaboración propia].

Cabe resaltar por otro lado, que al igual que en el caso de los sistemas bidimensionales donde los cartuchos o en su defecto cabezales se encuentran alojados en el interior del carro de impresión, en el sistema de impresión tridimensional planteado y mostrado en la figura anterior éstos se encuentran dispuestos o agrupados en paralelo, siendo todos iguales (concepto modular). Por otro lado, los nozzles en el interior de dichos cabezales afín de alcanzar todas las posiciones en las que se ubicaran las gotas en el interior de un píxel y mediante la superposición de estos en el interior del vóxel, se encuentran ubicados de forma

matricial a tresbolillo uno respecto al otro de forma que; puesto que el desplazamiento del carro corresponde a una translación horizontal al modificar el número de nozzles activos y las frecuencias de eyección las gotas pueden ser depositadas siguiendo un patrón determinado.

Mediante la excitación de los actuadores de las cámaras de bombeo a voluntad y estando éstos alojados en el carro de impresión el cual se desplaza a una velocidad constante es posible controlar y hacer que las gotas impacten en una locación fija. Mediante la modificación de la amplitud y la forma de la señal de excitación como hemos podido apreciar, es posible modificar el volumen del material eyectado. En conjunto: volumen de gota (Nivel) y número de gotas depositadas en el interior de un área fija (píxel) o en su equivalente tridimensional en un volumen (vóxel) permite reproducir la profundidad del color mediante una escala de grises superpuesta. El número de nozzles alineados en columnas y a tresbolillo en cada cartucho o cabezal permite espaciar temporalmente más o menos dos señales de eyección consecutivas, es decir, modificando la frecuencia de eyección y alejando o acercado la posibilidad de resonancia, en consecuencia modifico productividad del sistema.

La generación de un vóxel crómico o con cualquier otro atributo, conlleva a la superposición de capas impresas en 2D, cabe destacar que cada una de estas capas ha de ser distinta a la anterior en lo que respecta a la locación de las gotas más no en la graduación del color que representa, el motivo es el de no generara patrones verticales repetitivos puesto que ahora el vóxel posee seis caras las cuales todas ellas deben ofrecer las mismas propiedades (unidad mínima de color, en éste hipotético caso donde el atributo es crómico). Por otra parte, se ha de resaltar que desde el punto de vista de la reproducción de estas gotas de mayor volumen (mayor nivel) generaran huellas mayores cuyas semiesferas tras alcanzar el equilibrio, serán mayores y por tanto la altura de capa será heterogénea, sin mencionar que éstas las gotas impactan sobre un sustrato previamente impreso y cuya topología no es plana. La idea de utilizar gotas binarias de un único nivel en donde las graduaciones se obtendrían modificando la densidad de puntos en el interior del píxel parece a priori el camino más simple en la reproducción de vóxeles con múltiples atributos.

Volviendo a los atributos y centrándonos únicamente en el sentido de la vista podemos resaltar que, además de los colores, en el mundo tridimensional somos capaces de percibir más propiedades como son: la opacidad, la translucidez, transparencia y junto con la topología la capacidad de reflexión de la luz, y finalmente tras la incorporación de materiales funcionales la capacidad de emitir luz. Esta última propiedad requiere del empleo de múltiples materiales y desde un punto de vista más amplio a través de la electroluminiscencia abre la puerta a la comunicación con el elemento impreso, la interacción hombre objeto y en consecuencia la evolución del estado del objeto impreso en el tiempo en resume impresión  $3D+D=4D$  siendo esta última del tiempo.

La importancia de los materiales cobra de nuevo relevancia, estableciéndose nuevamente como un factor limitador de estas técnicas de reproducción, ya que por ejemplo mediante el uso de tintas funcionales sería posible dotar a los vóxeles de fotoluminiscencia, electroluminiscencia, y una propiedad termocrómica, o incluso fotoeléctrica. O vayamos un poco más allá, pensemos en campos como el biomédico o el alimenticio, la posibilidad depositar lo que queramos donde queramos permitiría materializar objetos con propiedades locales diseñadas y reproducidas a partir de la combinación y en gradaciones de los elementos base iniciales a voluntad, pudiendo contribuir en gran medida al estado actual de la tecnología abriendo un nuevo horizonte para la investigación.

Cabe destacar por otro lado, que la estructura que aquí se presenta ha de desarrollarse en mayor profundidad sirviendo solo como ejemplo conceptual simplificado, ya que desde un punto de vista constructivo la interacción de las gotas tanto con el sustrato, así como con las gotas previamente depositadas de otros materiales, han ser estudiadas y tras su análisis ser lo más parecido posible afín de reducir la movilidad y variabilidad de las mismas. La fijación de los depósitos y los procesos de cambio de fase toman protagonismo, no solo en relación a la huella que estos producen sino también en la compatibilidad de los materiales. En este aspecto, éstos no deben fusionarse, o de fusionarse, en la forma deseada, afín de que las propiedades individuales de éstas no se diluyan constituyendo una amalgama elementos con propiedades discretas, dentro de una matriz que las contienen dotada de otras propiedades algunas de ellas discretas también.

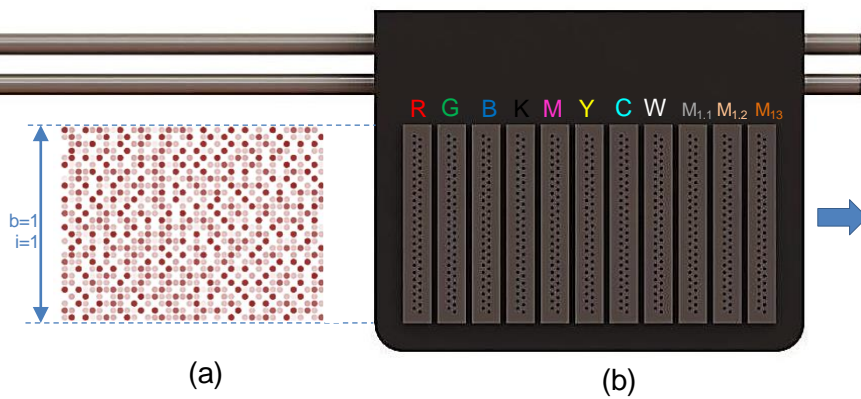
De modo que, volviendo a la estructura de los archivos multinivel en donde en un primer nivel se describe la geometría del objeto a reproducir, en un siguiente nivel los colores mediante la estructura crómica propuesta en este ejemplo, ahora en un tercer nivel describiremos los materiales que conformarán un segundo atributo y así sucesivamente hasta definir todos los atributos deseados en el objeto.

**Nivel 3:** Basados en la estructura anteriormente propuesta, en este nivel se define un segundo atributo digamos una función electroluminiscente a través del empleo de 3 materiales funcionales, por ejemplo:

1.  $M_{1.1}$ : polímero conductor (PEDOT:PSS) o cualquier suspensión con nanopartículas conductoras (Ag, a base de óxido de Indio y Estaño, etc.) .
2.  $M_{1.2}$ : material dieléctrico.
3.  $M_{1.2}$ : material electroluminiscente a base de fosforo.

Matriz principal en donde se identifica el material:  $DMD = m(:, :, :)$  3. 414





Atributos crómicos		Función (Emisión lumínica)	
	Mat. Cian		Mat. conductor ( $M_{1,1}$ )
	Mat. Magenta		Mat. Dieléctrico ( $M_{1,2}$ )
	Mat. Amarillo		Mat. EL ( $M_{1,2}$ )
	Mat. Negro		
	Mat. Blanco		
	Mat. Rojo		
	Mat. Verde		
	Mat. Azul		

(c)

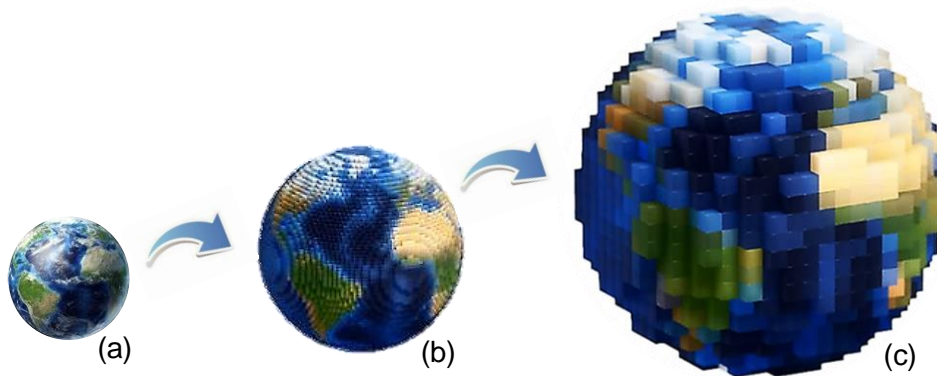
**Figura 299:** Representación esquemática vista en planta del sistema de impresión multimaterial anterior, reproduciendo la banda  $b$  de la capa  $i$  de un vóxel material  $x$  (a), constituido por 3 materiales superpuestos (b), y tabla resumen con los recursos (materiales) que el hipotético sistema posee (c) [Fuente: Elaboración propia].

Es importante decir que en éste concepto de impresora 3D se utilizó colores opacos únicamente obviando la transparencia propiedad que sin duda percibimos a través de nuestros ojos, sin embargo continuado con la línea de pensamiento establecida cabe mencionar que no supondría un problema utilizar en el primer nivel una estructura con seis variables, es decir CMYKWA siendo A un material transparente. Vale la pena resaltar por otro lado, la importancia del carácter modular de estos sistemas Inkjet DOD de éstos de deposición de materiales, ya que, si bien fundamentalmente no han cambiado respecto al sistema mono-material desarrollado para el equipo Nhibrid32D, ahora en un sistema multimaterial si lo ha hecho su funcionamiento ganado en complejidad así como en versatilidad y capacidad de reproducción, siendo aplicable en muchos otros campos y particularizándose por su eficiencia a la hora de cubrir grandes extensiones de forma

precisa, siendo la frecuencia máxima de eyección del cartucho analizado de aproximadamente a 80kHz lo que equivale a una capacidad de eyectar 4.800.000 gotas de un volumen constante por minuto por nozzle, y teniendo en cuenta que un cabezal industrial Inkjet común puede tener hasta 1.280 nozzle y que en una equipo de impresión estos al ser modulares pueden existir tantos como hagan falta en paralelo por color, las capacidad de deposición de estos sistemas es cuanto menos sorprendente en el estado actual de la técnica.

En este aspecto ahora las señales de excitación de los piezoeléctricos no pueden simplemente ser periódicas y alternadas con la de menisco para cada nozzle activo del cabezal o cartucho que contenga a la variable, color, elemento o al material M. Las graduaciones necesarias para alcanzar la profundidad de color o material en este aspecto evidencian la necesidad de modificar la deformación de los actuadores de la cámara de bombeo, o mediante la concatenación de pulsos afín de que las gotas al juntarse en el aire mientras describen la trayectoria parabólica formen un volumen variable y en consecuencia tras reducir la frecuencia límite de eyección, generar huellas o depósitos de distintos volúmenes (niveles), y depositadas con mayor o menor densidad por unidad de superficie en la reproducción de cada píxel de cada capa rasterizada. Dicha variación de densidad se alcanza a voluntad decidiendo cuando eyectar y cuando no atendiendo a la periodicidad de las señales y la velocidad de desplazamiento del carro de impresión.

De forma que, a modo de resumen general podemos decir que, en la materialización de un objeto tridimensional a través de las técnicas descritas, se lleva a cabo mediante la consecución de una serie de fases o etapas: en una primera etapa, la creativa; se concibe el objeto y se conceptualiza éste. Posteriormente en una segunda etapa se define a éste y en éste punto entra en juego o recurrimos al CAD ya sea para crear o para editar geometrías adquiridas por otros medios (escáneres ópticos, imágenes DICOM, etc....). En una tercera etapa pudiendo ser ésta perteneciente al software CAD, se discretiza al elemento definido, digamos mediante vóxeles cúbicos. A partir de este punto entran en juego las características del elemento reproductor, la impresora tridimensional Inkjet en este caso. Nos referimos en este aspecto a los recursos que ésta posee (materiales, energía), de modo que los algoritmos propios del sistema reproductor busquen la forma de utilizar sus recursos afín de alcanzar la graduación y combinación que permita reproducir los atributos definidos anteriormente en cada uno de los vóxeles a imprimir, en lo que constituiría una cuarta etapa de la secuencia. Finalmente, cabe destacar en esta cuarta etapa de reproducción lo que hemos definido como medios, es decir las capacidades del sistema, y en este sentido nos referimos al número de nozzles y los tamaños de gota a depositar, la precisión, repetitividad, elementos que condicionaran su fidelidad, y por último su productividad, la fiabilidad del equipo.



**Figura 300:** Representación de las distintas etapas existentes desde la conceptualización de un objeto hasta su materialización [Fuente: Elaboración propia].

Por último, cabe enfatizar una vez más a partir de la representación anterior el concepto de fidelidad, a través del cual se establece la proximidad de la reproducción a lo definido previamente. En este aspecto, hemos de generalizar, es decir, mientras más pequeñas sean las gotas, mayor es la resolución bidimensional, mayor es el número de combinaciones posibles dentro de un área finita (píxel) y por ende dentro de un volumen finito (vóxel). Pudiendo éste ser más pequeño para una misma profundidad de color o de material. A su vez vóxeles más pequeños permite una mayor fidelidad geométrica de la reproducción y de los atributos que deseemos dotar al objeto mientras que aumenta las dimensiones de los archivos y reduce la productividad del equipo, cosa que puede ser solventado aumentando el número de nozzles por cabezal.

## 2.11. LISTADO DE FIGURAS DEL VOLUMEN 1

<b>Figura 1:</b> Diferentes fases para la obtención de un circuito híbrido de película gruesa a partir de un esquema eléctrico: a) Esquema eléctrico que se desea integrar. b) Substrato con las pistas conductoras. c) Integración de las resistencias. d) Montaje de un condensador discreto. e) Montaje del elemento activo (transistor) y conexiones con hilo. f) Vista del circuito híbrido de película gruesa en 3D [Fuente: elaboración propia].....	6
<b>Figura 2:</b> Esquema del proceso de serigrafía [7]. .....	8
<b>Figura 3:</b> Imagen conceptual circuito híbrido de capa gruesa (a) y de un dispositivo electrónico multicapa (b) [Fuente: elaboración propia]. .....	10
<b>Figura 4:</b> Comparación de las tecnologías cerámicas [10]. .....	11
<b>Figura 5:</b> Esquema de un sistema de tape casting [15], como etapa previa al procesado en verde de la cerámica. ....	13
<b>Figura 6:</b> Proceso de fabricación de componentes electrónicos cerámicos multicapa (a) [16] Imagen detallada en planta de múltiples capas de LTCC creadas por tape casting dotadas de pistas conductoras depositadas por serigrafía (b) [17]. .....	13
<b>Figura 7:</b> Consolidación de la estructura en la segunda fase del apilamiento [8]. .....	14
<b>Figura 8:</b> a) Interpenetración de las partículas de alúmina representadas como esferas tras el proceso de sinterización en la conformación de un bloque sólido homogéneo a partir del apilamiento de múltiples laminas en verde [11], b) Representación de un ciclo térmico de sinterización ideal [18], y c) Ejemplo del perfil de la curva de calentamiento proporcionada por DuPont para sus cerámicas 951 [19]. .....	15
<b>Figura 9:</b> a) Laminas de LTCC tras el laminado [20], b) ejemplo de sensor de presión de LTCC [21] y c) proceso actual de fabricación de componentes cerámicos multicapa y proceso tras una posible implantación de la tecnología aditiva híbrida multimaterial desarrollada [Fuente: elaboración propia]. .....	16
<b>Figura 10:</b> Comparación entre las tecnologías convencionales (a) y las aditivas (b) [Fuente: elaboración propia].....	19
<b>Figura 11:</b> Concepción del modelo CAD fase de digitalización [26]. .....	22
<b>Figura 12:</b> Triangulación de superficie [27].....	22

- Figura 13:** Variación de las propiedades mecánicas del elemento reproducido modificando el infill (relleno del elemento a reproducido) (a). Distintos patrones de infill para un sistema de impresión por FDM (b). Sección transversal de un elemento impreso por FDM con distintos colores de un mismo material y distintos infill (c). Vista renderizada del emplazamiento de múltiples piezas sobre la plataforma de construcción con sus correspondientes soportes [24]. ..... 23
- Figura 14:** Media elipse seccionada (a menor espesor de capa mayor precisión geométrica) (a) [28]. Hélice de la Figura 11 rebanada tras la operación de Slicing [29] (b). Representación esquemática del número de capas necesario para reproducir un paralelepípedo esbelto según la estrategia a seguir (c) [Fuente: Elaboración propia]..... 24
- Figura 15:** Evolución del proceso de fabricación de la hélice de la Figura 11 mediante la tecnología de FDM [26], [29]. ..... 25
- Figura 16:** Centro de mecanizado capaz de combinar la fabricación aditiva por láser cladding con la fabricación sustractiva de la casa DMG-MORI (a). Imagen de la reparación de un eje mediante la adición de material por Laser cladding (a) [31]. ..... 29
- Figura 17:** Diferentes configuraciones de los inyectores del láser Cladding [32]. ..... 29
- Figura 18:** a) Tecnología FDM [35], b) Pieza ejemplo impresa por FDM [Proyecto realizado en la FundacioCim en compañía de Accenture Analytics & Technology Labs y el departamento de estadística e Investigación operativa de la UPC, en el análisis distintas estrategias de producción y grados posponement en la cadena de suministros tras la incorporación de la fabricación aditiva]. ..... 30
- Figura 19:** Impresora tridimensional con tecnología FDM capaz reproducir piezas funcionales a partir polvos metálicos (a), distintos etapas del procesos de construcción mediante el uso del equipo ofrecido por Desktop Metal (b) [37]. ..... 31
- Figura 20:** Cabezal de Polyjet de una máquina Objet (a) [38] y representación esquemática de dicho cabezal (b) [39]. ..... 32
- Figura 21:** Imagen de equipo de impresión de XJET presentado en Formnext 2016 (a). Representación conceptual del proceso de reproducción mediante la deposición controlada de gotas (b) e imagen de una pieza ejemplo impresa en 3D por dicho equipo [40]. ..... 33
- Figura 22:** a) Representación esquemática de la tecnología SLA [35], b) imagen tomada del taller en (conjunto de piezas impresas por estereolitografía [Fuente: Elaboración propia], y c) relax impreso en una máquina Materialise Mammoth [42]. ..... 34

- Figura 23:** a) Tecnología SLS [35], b) Hélice impresa con poliamida de alta resistencia por tecnología SLS [45] y c) Pieza impresa en Nylon negro [46]..... 36
- Figura 24:** a) Proceso de fabricación de una capa utilizando la estrategia MultiBeam (disgregación del haz de electrones en múltiples haces) etapas de precalentamiento, perfilado y finalización [47], b) Alabe de una turbina de baja presión impreso mediante la tecnología EBM [48] y c) Distintas piezas u componentes del mundo aeroespacial cortesía de ARCAM [49]. ..... 38
- Figura 25:** Imágenes de la escultura humana más pequeña del mundo por Jonty Hurwitz (2015 Guinness World Record). Reproducción tridimensional de una modelo escaneada y reproducida dentro de la cabeza de una aguja [50]..... 38
- Figura 26:** a) Tecnología SLM, DMLS o Laser Cusing [35] , b) Ejemplo de pieza impresa mediante esta tecnología; Caliper del freno impreso en Ti6Al4V en una impresora SLM 500 de SLM Solution de la empresa Bugatti perteneciente al grupo Volkswagen [51]. ..... 39
- Figura 27:** a) Tecnología 3DP [35], y b) versión impresa de cualquier persona tras ser escanea reproducida mediante esta tecnología [53] y c) pieza ejemplo de la tecnología Multi jet Fusion de HP similar al 3DP pero con la adición de calor para favorecer la consolidación de las capas de Poliamida en polvo [54]. ..... 41
- Figura 28:** a) Imagen de una impresora de grandes dimensiones de la mano de D-Shape donde el aporte de material es por lecho mientras que la energía a través de la deposición de aglutinante es por línea. b) Imagen de una estructura coralina impresa en 3D (b) [55]. ..... 41
- Figura 29:** Sistema Micro Light Switches [56]..... 42
- Figura 30:** Distintas configuraciones de una impresora 3D DLP. a) Configuración Bottom Up - b) Configuración Top Down [Fuente: elaboración propia] y c) Ejemplo del uso de una impresora Bottom-Up en la fabricación de la suela de la zapatilla Adidas 4D [57]. ..... 43
- Figura 31:** a) Tecnología LOM [35] y ejemplo de piezas impresas por esta tecnología, b) pieza monocromática [58] y c) pieza multicolor al poseer el equipo LOM un sistema de deposición de tinta Inkjet antes del uso del rodillo calefactor [59]..... 44
- Figura 32:** Representación conceptual de la tecnología de impresión plateada por Boeing donde el objeto a reproducir flota en el espacio [61]. ..... 45

**Figura 33:** a) Asiento de un coche fabricado aditivamente por la empresa Toyota [64], b) prototipo de un estructura lattice diseñada por Betatype y fabricada aditivamente por el Imperial College de Londres en un equipo Renishaw [65], c) Engranajes impresos con una geometría inusual [66] y d) Ejemplo de cómo, la optimización topológica en combinación con la fabricación aditiva, podría suponer un ahorro en el número de piezas de un conjunto, simplificando el montaje de estructuras complejas, y en el ámbito de la aeronáutica y más concretamente en la de vuelos comerciales, como el ahorro de peso supone una reducción significativa en el consumo de combustible y por ende contaminación y coste [67]..... 52

**Figura 34:** a) Silla fabricada por tecnologías aditivas multimaterial combinando solo pigmentación [68]. En la misma línea, b,c d) algunas de las creaciones de Neri Oxman en el 2016 e impresas por Stratasys, Ltd. a través de su tecnología PolyJet. Finalmente, e) vóxel multi-atributo con reproducción multimaterial, como ejemplo de los llamados ‘discret digital materials’ (termino desarrollado por Stratasys) en donde se combina una propiedad cromática y otra táctil en escala de grises y f en color [69]..... 53

**Figura 35:** a) Material programable desarrollado en los laboratorios del MIT, en colaboración con Stratasys y Autodesk [70], y b) de la misma forma pero a la inversa imágenes de estudios realizados por el Virginia Polytechnic Institute en la impresión de materiales piezoeléctricos con topologías complejas, con posibles aplicables en transductores de presión, recolección de energía, robótica, etc [71], [72]. ..... 54

**Figura 36:** a) Pieza ejemplo fabricada aditivamente mediante la combinación de material flexible y rígido por cortesía de Arburg [73], b) Imagen ejemplo conceptual, aportado por la empresa EOS de un posible engranaje bimaterial con cuerpo de estructura lattice de color blanco y corona en rojo haciendo alusión a ser otro material [74]..... 55

**Figura 37:** Relación de los conceptos impresión convencional, impresión funcional y electrónica impresa en función de sus aplicaciones en el mercado y desde un punto bidimensional [Fuente: AIMPLAS (Instituto tecnológica del plástico)]. ..... 57

**Figura 38:** Clasificación de los procesos de Impresión bidimensionales y esquema del proceso en función de la tecnología aplicada [75]..... 61

**Figura 39:** Primer dispositivo reproductor a través de un sistema Inkjet continuo (Siphon recorder de William Thomson in 1858 (UK Patent 2147/1867) a), Imagen impresa sobre la cinta móvil de papel por el Siphon recorder [81] b), Ilustración del dispositivo de Abbé Nollet con los cuales se llevó a cabo los primeros estudios sobre los efectos de la electricidad estática sobre chorros fluidos en 1749 c) [76]. ..... 63

- Figura 40:** Clasificación de las tecnologías de impresión sin impacto, por chorro de tinta (Fuente: Adaptado de [85])..... 64
- Figura 41:** Eyectores continuos de chorro de tinta, tecnologías CIJ: (a) Sistema de deflexión de carga múltiple, (b) deflexión binaria de la carga, (c) Desviación de la carga de Hertz, (d) deflexión por flujo de aire [89]..... 65
- Figura 42:** Dibujo del primer dispositivo de inyección de tinta piezo drop-on-demand patentado en 1950 (US Patent 2.512.743). Donde el disco piezoeléctrico (5) genera ondas de presión en el cono sólido (1), que causan la eyección de gotas de tinta desde la boquilla (2) [91]..... 66
- Figura 43:** Clasificación de los distintos modos en los que se lleva a cabo la eyección dentro de los sistemas de impresión digital DOD por piezoeléctricos [97]..... 67
- Figura 44:** Resumen de los sistemas de impresión digital: (a) Sistema Inkjet continuo o CIJ, (b) Sistema Canon Bubblejet (TIJ), (c) Sistema por piezoeléctricos (PIJ), y proceso de generación de gotas por tracción electroestática (d). Principio de formación de las burbuja eyectoras de Canon (e), Secuencia de formación de las gotas en un sistema HP (f) [75]. .. 68
- Figura 45:** Algunas de las aplicaciones actuales de las tecnologías de impresión digital DOD por piezoeléctricos [115]..... 70
- Figura 46:** Elementos constituyentes de todo sistema de impresión de tecnología PIJ [Fuente: elaboración propia]..... 71
- Figura 47:** Representación esquemática del sistema Scan Printing, común en todas las impresoras de tinta de uso doméstico y en muchas de las impresoras de gran formato (a), Vista en planta de un sistema de impresión DOD multinozzle (b), Vista frontal esquemática de una impresora domestica con sistema DOD Scan multicolor [Fuente: elaboración propia]. ..... 73
- Figura 48:** Imagen conceptual de una impresora digital con fines comerciales de tecnología Inkjet de alta productividad con sistemas Single-pass Printing [116]..... 74
- Figura 49:** Representación esquemática del Sistema Single-pass Printing (a), Vista en planta del mismo con un cabezal multinozzle (b) [Fuente: elaboración propia]. ..... 74
- Figura 50:** Distintos sistemas existentes de suministro de tinta: (a) Cartuchos tricolores más negro, Cartuchos separados (b), Cartuchos y cabezales de impresión separados (c), Cartuchos de gran capacidad en la base de la impresora (d), Cabezales de grandes



dimensiones (e), Colores formados a partir de la combinación de las tintas Cian, Magenta, Amarillo (CMY) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 75

**Figura 51:** (a) Calidad de reproducción de una imagen en función del número de puntos por pulgada [117], (b) Variación del volumen de tinta depositada y (c) variación de la densidad de puntos en el interior de cada píxel, distintas formas de modificar nivel del gris en una imagen monocromática, hoy en día se combinan para una mejor calidad de reproducción [75]. ..... 76

**Figura 52:** Imagen conceptual [118] y real del sistema single-jet con tecnología CIJ [119] (a), imagen conceptual y en funcionamiento del sistema multinozzle DOD con tecnología PIJ utilizado en la presente tesis con tres nozzles activos (b) [Fuente: elaboración propia]. ..... 78

**Figura 53:** Locomotora a vapor en formato de imagen vectorial, originalmente en formato Windows Metafile (WMF) convertido a PNG. (a) y foto original tomada en formato matricial JPG (b) [Fuente: Wikipedia]. ..... 79

**Figura 54:** Digitalización de una imagen topográfica a muy baja resolución en formato de mapa de bits o imagen ráster [Fuente: elaboración propia]. ..... 80

**Figura 55:** Incremento de la fidelidad de la reproducción o de la resolución, de una imagen en función del incremento de píxeles utilizados (Resolución final 100x100 píxeles) [Fuente: Wikipedia]. ..... 81

**Figura 56:** Representación de una imagen con una profundidad de color de 1 bit y una resolución de 100 X 100 píxeles (a), representación esquemática de una matriz de píxeles referenciadas a un origen en una pantalla (b) [120]. ..... 82

**Figura 57:** Reproducción de la imagen anterior con la misma resolución pero con una profundidad de color de 2 bits por píxel (dimensiones del archivo 100 x 100 x 2 bit por punto = 20.000 bits) [120]. ..... 82

**Figura 58:** Representación esquemática del interior de un píxel monocromático reproducido mediante la deposición de gotas de tinta con distintas niveles de intensidad o con profundidades de color distintos.  $2^2=4$  Tonos de grises en una matriz 2X2 de 2 bit (a).  $2^3=8$  Tonos de grises + 2 tonos puros (blanco y negro) en una matriz de 3X3 de 3+1bit (b) [121]. ..... 83

**Figura 59:** Representación en color de la imagen del ejemplo anterior con la misma resolución ahora una profundidad de color de 4 bits (dimensiones del archivo 100 x 100 x 4 bit por punto = 40.000 bits) [120]. ..... 84

- Figura 60:** Representación en color de la imagen del ejemplo anterior con la misma resolución con una profundidad de color de 8 bits (dimensiones del archivo 100 x 100 x 8 bit por punto = 80.000 bits) (a), Detalle ampliado de un píxel a color y de un píxel monocromático de 8 bits de profundidad de una imagen digital (b) [120]..... 85
- Figura 61:** Representación esquemática de una imagen digital constituida por una matriz de píxeles cuya profundidad de color de 24 bits es representada mediante el sistema RGB (a). Representación espacial del sistema RGB y de los colores CMYK mediante el uso de un cubo de color tridimensional [Fuente: elaboración propia]..... 86
- Figura 62:** Representación de una imagen a color mediante la superposición de 4 capas de color; Cian, Magenta, Amarillo, Negro (CMYK) [Fuente: elaboración propia]..... 88
- Figura 63:** Reproducción esquemática y conceptual de 3 colores distintos mediante la hipotética deposición de tintas CMYK en un sistema Inkjet. De izquierda a derecha: el componente cian, el magenta, el amarillo, el negro, que combinados en distintos porcentajes reproducen el píxel de color mostrados en los tres ejemplos y el equivalente percibido por el ojo humano a suficiente distancia [Fuente: Wikipedia] ..... 89
- Figura 64:** Ángulos habituales de las tramas en sistemas Offset [Fuente: Elaboración propia]..... 90
- Figura 65:** Representación esquemática de los puntos de color de distintos tamaños, que constituyen las tramas que a su vez constituyen los píxeles de una imagen impresa sobre papel, observadas a distintas escalas [122]..... 90
- Figura 66:** Representación de una impresora Inkjet de Sistema Single-pass printing, destinado a usos comerciales utilizando el sistema CMYK (a), Ampliación del carro de impresión constituido por 20 cabezales (b), Disposición de los cabezales en el carro de impresión 5 por cada color (c) [123]. ..... 91
- Figura 67:** Representación grosera de una línea continua mediante píxeles monocromáticos (a) y proceso equivalente en un sistema tridimensional, distintas formas de representar un punto en el espacio (1b) mediante seis vóxeles asociados a uno central, (2b) mediante 19 afín de representar una esfera, (3b) mediante la asociación de 27 vóxeles para una esfera de mayor diámetro [Fuente: elaboración propia]. ..... 92
- Figura 68:** Representación del concepto de adyacencia mediante distintos mallados bidimensionales, resaltando como un elemento discreto con un atributo de color (negro) se

relaciona con sus homologos proximos blancos (1), influencia de la adyacencia en la representación de un contorno cerrado (2) [Fuente: elaboracion propia]. ..... 93

**Figura 69:** Representación de un vóxel cubico referenciado a una base fija (a) y de dicho vóxel dentro de una red en la que además de su posición se le han añadido otros atributos como por ejemplo, como se encuentra unido a otros (adyacencia), el material que lo constituye y el color (b) [Fuente: elaboración propia]. ..... 94

**Figura 70:** Reproducción digital de un Volkswagen escarabajo mediante el uso de vóxeles resaltando el concepto de fidelidad o calidad de la reproducción tras el aumento del número de vóxeles empleados de izquierda a derecha respectivamente [124]. ..... 97

**Figura 71:** Reproducción del automóvil anterior mediante el uso de vóxeles homeomorfos o simplemente con aristas matadas de distinta magnitud [124]. ..... 98

**Figura 72:** Uso de distintos vóxeles en la reproducción del automóvil anterior. De izquierda a derecha el empleo de vóxeles cúbicos (C01), V. cúbicos con las seis caras del cubo identificadas por colores (C02), V. esféricos de dimensiones reducidas y sin continuidad o contacto entre sus adyacentes (C03), V. esféricos continuos (C04), V. cuadrados no regulares de distintas dimensiones (C05) [124]..... 98

**Figura 73:** Ilustración de un cubo reproducido mediante la agrupación de vóxeles con una profundidad de materiales de 1 bit o desde un punto de vista dimensionalmente menos amplio un vóxel monomaterial subdividido (a). Reproducción del mismo objeto cubico constituidos de múltiples vóxeles monomaterial en un sistema con una paleta de materiales amplia, o un píxel multimaterial con una profundidad de materiales de muchos bits (b) [Fuente: elaboración propia]..... 100

**Figura 74:** Distintas soluciones planteadas a la problemática de reproducir piezas multicolor mediante la tecnología FDM /FFF (a), Representación solución planteada por Autodesk (b) [126] c) Dispositivo Palette2 de Mosaic [127]. ..... 105

**Figura 75:** Representación esquemática de la primera capa de un vóxel monomaterial y monocromático (a), de igual manera primera vóxel multicolor monomaterial (b), construcción del vóxel anterior multicolor monomaterial en un estado más avanzado (c) [Fuente elaboración propia]. ..... 106

**Figura 76:** Representación esquematizada de la generación de los depósitos continuos (a) o discretos (b) en cuanto a propiedades cromáticas que constituyen y conforma a un vóxel [Fuente: elaboración propia]. ..... 107

- Figura 77:** Principios de la reproducción de objetos tridimensionales basados la tecnología Inkjet y representación esquemática de la generación de un vóxel con la problemática de la deformación, consecuencia de una conversión insatisfactoria de las tintas poliméricas. [Fuente: elaboración propia]..... 108
- Figura 78:** Reproducción digital de baja resolución del automóvil anterior mediante distintos vóxeles monomateriales dispuestos convenientemente, en los que se resalta las propiedades ópticas de éstos (opacidad, coloración y traslucidez) [124]. ..... 109
- Figura 79:** Representación conceptual del sistema multidepósito implantado en una máquina de estereolitografía afín de reproducir piezas multimaterial y multicolor (a), Imagen de dicho sistema reproductor por tecnología SLA realizado por la compañía 3D System (b), y reproducción en dicho sistema de una mandíbula de un paciente de 15 años con el tumor resaltado en rojo (c) [128]..... 110
- Figura 80:** Imagen de una impresora DLP multimaterial de configuración Bottom Up y con múltiples depósitos, desarrollada por la universidad de Twente (a) y detalle de la estructura y disposición en línea de dichos depósitos (b) [130]. Pieza impresa mediante un sistema DLP similar al mostrado pero en este caso bimaterial (c) [131]..... 111
- Figura 81:** Piezas impresas comestibles usando chocolate o azúcar en polvo como material base (a) [132]. Cadena multicolor impresa mediante la tecnología MFJ utilizando polvo de poliamida como material base y bajo la adición de un aglutinante de mayor poder de unión y en una concentración mayor, imagen de un eslabón similar monocromático impreso capaz soportar el peso de un automóvil (b) [133]. ..... 112
- Figura 82:** Representación de una bobina vertical y horizontal reproducida mediante la tecnología thick film multicapa en donde el elemento conductor ha sido reproducido bidimensionalmente por un sistema Inkjet sobre un sustrato plano [Fuente: elaboración propia]..... 114
- Figura 83:** Representación de la sección transversal de múltiples dispositivos electrónicos impresos (a) y vista en planta de los mismos reproducidos sobre un sustrato flexible (b) [134]. ..... 115
- Figura 84:** Dispositivo electrónico diseñado por ingenieros de la NASA, demostrador de la viabilidad en la combinación de la estereolitografía (SLA) con un sistema dispensador de tinta conductiva DIW (Direct Ink Writing) (a) [135]. PCB impreso tridimensionalmente y

mediante el mismo sistema de impresión híbrido componentes electrónicos impresos para un satélite (b) [136], [137]..... 116

**Figura 85:** Ejemplos del uso de tintas electroluminiscentes en el packaging (a) [138]. Prototipo ultra fino (13 veces más fino que un cabello humano y flexible) mostrado por investigadores de la universidad de Tokio en el que se utilizan polímeros emisores diodos de luz (b) [139] e hígado de un paciente con metástasis cuyos tumores se resaltan a través de la luz que emiten (c) [Fuente elaboración propia]..... 117

**Figura 86:** Representación esquemática del E-paper (a), vista ampliada de las microcápsulas que constituyen la superficie de la cara vista del papel electrónicos (b) [140], Display electroforético flexible totalmente impreso [141]..... 118

**Figura 87:** Representación esquemáticas de una célula fotovoltaica impresa, vista frontal y en perspectiva de sus constituyentes (a) [142]. Imagen del proceso de fabricación R2R (b) [143] y panel solar flexible imitando aun hoja diseñado para imitar una hoja (c) e insertada en un tallo imitando un árbol (d) [144]. ..... 119

**Figura 88:** a) Inmersión de la electrónica en los objetos cotidianos en donde la impresión se postula como una de las tecnologías habilitadoras del internet de las cosas, ejemplo de un hogar interconectado [145], [146], b) Representación esquemática de una batería reproducidas mediante screen printing [147], y b) esquema de un sistema RFID. c) Imagen de una batería impresa [148] y e) dicha batería inmersa dentro de una tarjeta NFC [149]. Finalmente, f) tapón inteligente impreso en 3D con la capacidad de detectar el mal estado de la leche y transmitirlo por radio frecuencia [150]..... 121

**Figura 89:** Distintos ejemplos de la impresión funcional en la reproducción de sensores. Pañal inteligente para la monitorización del bebe desarrollado por la universidad de Tokio dotado de múltiples transistores y diodos orgánicos (a) [151]. Termómetro adhesivo impreso disponible actualmente a muy bajo coste en ebay (b) y una versión más evolucionada de la misma con la cual monitorizar de forma inalámbrica por 24h a través del móvil al bebe (c) [152]. Finalmente tatuaje temporal capaz de monitorizar los niveles de glucosa a través de la superficie de la piel (d) [153] y wereable adhesivo para el control de los ataques de epilepsia mediante la monitorización de actividad eléctrica muscular (EMG) durante las convulsiones (e) [154]..... 122

**Figura 90:** Ejemplo de una posible aplicación en wereables de las tintas fotocrómicas (a), uso de tintas termocrómicas en envases como elemento de prevención (b) y empleo de las

<i>mismas en el desarrollo etiquetas inteligentes e indicadores de frescura (dispositivos TTI: Time temperatura indicator) (c) [155].</i>	123
<b>Figura 91:</b> <i>Tintas ópticamente variables (OVI) empleadas en un billete de 50 euros (a). Imagen de un billete de 10 euros bajo distintas condiciones de iluminación que hacen resaltar el uso de tintas metaméricas (b). Detalle fluorescente resaltado en el mismo billete bajo luz ultravioleta (c). Empleo de tintas transparente bajo luz infrarroja IR en un billete de 5 pounds (d) y finalmente ejemplo de tinta invisible bajo luz convencional y visible ante la exposición de IR (e) [155].</i>	124
<b>Figura 92:</b> <i>Combinación del termoconformado junto con el printing electronics en la fabricación de una carcasa funcional (a) [156]. Ejemplo de la integración de la plastrónica en el mundo automotor, evidenciándose la tendencia hacia la eliminación de interruptores, botones y mecanismos en el interior de los mismos (b) [157].</i>	124
<b>Figura 93:</b> <i>Evolución del mercado mundial estimada de los semiconductores impresos tomadas [158].</i>	125
<b>Figura 94:</b> <i>Impresora para la decoración personalizada del café (a) [159] e impresora de unas con WIFI (b) [160].</i>	126
<b>Figura 95:</b> <i>Representación de un bioplotter imprimiendo un corazón (a) [161], material sustitutivo de la piel para pacientes con quemaduras (b) [162], estructura ósea impresa tridimensionalmente (c) [163] y reproducción del cartílago de una oreja mediante técnicas aditivas (d) [164].</i>	127
<b>Figura 96:</b> <i>Membrana flexible impresa dotada de la capacidad de monitorizar mediante sus múltiples sensores la actividad de un corazón vivo [165].</i>	128
<b>Figura 97:</b> <i>Imagen de los pigmentos empolvo empleados en la fabricación de tintas CMYK y de su estructura química. Pigmento Amarillo PY12 (a), pigmento cian PB15 (b), pigmento PR48:1 empleado en el color magenta (c) y finalmente negro de carbón en polvo (d) [166].</i>	131
<b>Figura 98:</b> <i>Representación esquemática del estrechamiento de la sección en las inmediaciones del nozzle y de las fuerzas a las que se encuentra sometido el chorro [Fuente: Elaboración propia].</i>	151
<b>Figura 99:</b> <i>Sección transversal de un chorro en la etapa inicial de la formación de una gota a). Representación de las fuerzas inerciales y de las fuerzas producto de la tensión superficial b) [Fuente: Elaboración propia].</i>	152

- Figura 100:** Representación esquemática de un chorro con la formación incipiente de una gota [Fuente: Elaboración propia]. ..... 153
- Figura 101:** Esquema de varios modos de perturbaciones en la superficie de chorros [187]. ..... 159
- Figura 102:** Curva de la función de Bessel modificada [185]. ..... 161
- Figura 103:** La dependencia de la tasa de crecimiento  $\omega$  en el número de onda  $k$  [185]. 162
- Figura 104:** Representación gráfica de la longitud de ruptura adimensional para una relación de  $\ln R0/\delta = 13$  [191]. ..... 164
- Figura 105:** Dependencia del ratio de crecimiento de las perturbaciones de chorros viscosos ( $\omega$ ) en función del número de onda  $k$  para distintos  $Oh$  (distintas viscosidades) [192]. ..... 166
- Figura 106:** Aparición de gotas satélite en el proceso de ruptura de un chorro a bajas velocidades de eyección [203]. ..... 168
- Figura 107:** Representación esquemática de una curva de estabilidad (Relación entre longitud crítica y la velocidad de eyección). Régimen de goteo (tramo ABC (1)), Régimen de Rayleigh (tramo CD (2)), Primer régimen aerodinámico (tramo EF (3)), Segundo Régimen aerodinámico (tramo FG(4)), Régimen de atomización (tramo H(5)) [198], [209]. ..... 169
- Figura 108:** Representación gráfica de los límites de Ohnesorge para los regímenes de ruptura de los chorros [211]. Representación esquemática incluyendo la variación de la densidad del gas (aire) en los distintos regímenes de ruptura [198]. ..... 170
- Figura 109:** Imagen esquemática de la desestabilización de un fluido estático sujeto a la acción de fuerzas electroestáticas a) y esquema de un chorro excitado mediante un campo eléctrico alterno para controlar la ruptura del mismo b) [212]. ..... 172
- Figura 110:** Representación esquemática del sistema de Inkjet CIJ como ejemplo de la aplicación de gotas formadas a partir de la desintegración de chorros bajo excitación externa [168]. ..... 173
- Figura 111:** Vista real de cuatro cabezales Inkjet CIJ dispuestos en paralelo con nozzles dispuestos en línea eyectando aglutinante para un sistema de impresión tridimensional por tecnología 3DP o de Binder Jetting (BJ) de la compañía ExOne [213]. ..... 173
- Figura 112:** Representación esquemática del proceso de impresión Inkjet mediante el sistema DOD [168]. ..... 175

<b>Figura 113:</b> Formación de gotas a bajo número de Weber, goteo periódico a), goteo cuasi-periódico o caótico b), régimen proporcional (Rayleigh) c) [214].	176
<b>Figura 114:</b> Factor Harkins y Brown 1919 donde $F = fR0/\alpha/2\pi$ [214]	177
<b>Figura 115:</b> Representación esquemática de la dinámica de una gota colgante [214].	178
<b>Figura 116:</b> Comportamiento parabólico de $z_t$ , en una gota colgante [214].	179
<b>Figura 117:</b> Representación esquemática del ciclo completo de generación de gotas en régimen periódico [215].	180
<b>Figura 118:</b> Comparación entre el periodo de formación de la gota calculado y los resultados experimentales [214].	181
<b>Figura 119:</b> Representación adimensional de $L_{max}A$ en función del tiempo para una velocidad de salida del fluido superior a la crítica $v_{crítica}$ [214].	183
<b>Figura 120:</b> Representación esquemática de la formación de una gota en régimen de eyección [215].	184
<b>Figura 121:</b> Volumen de las gotas generadas a distintos régimen en función del radio interno del nozzle [215].	186
<b>Figura 122:</b> Representación esquemática de la dinámica de una gota colgante bajo la influencia gravitatoria [214].	187
<b>Figura 123:</b> Efectos gravitatorios en la formación de las gotas dentro del régimen de goteo. Evolución en la longitud del chorro a). Volumen de las gotas en función del ciclo de formación b) [215].	188
<b>Figura 124:</b> Disposición básica de una bomba de inyección de tinta. Diseño basado en el resonador de Helmholtz (El volumen de la cámara de bombeo cambia como consecuencia del actuador piezoeléctrico) [168].	191
<b>Figura 125:</b> Datos del sistema mono-nozzle [168].	197
<b>Figura 126:</b> Evolución de la posición del fluido en el interior del conducto de salida respecto el centro de la cámara de bombeo para un sistema de respuesta positiva y excitado mediante un pulso de duración $t_p$ [Fuente: Elaboración propia].	197
<b>Figura 127:</b> Evolución de la velocidad del fluido en el interior del conducto de salida respecto el centro de la cámara de bombeo para un sistema de respuesta positiva y excitado mediante un pulso de duración $t_p$ [Fuente: Elaboración propia].	198



- Figura 128:** Evolución temporal de la presión en el interior la cámara de bombeo para un sistema de respuesta positiva y excitado mediante un pulso de duración  $tp$  [Fuente: Elaboración propia]. ..... 198
- Figura 129:** Evolución de la posición del fluido en el interior del conducto de salida respecto el centro de la cámara de bombeo para un sistema de respuesta negativa y excitado mediante un pulso de duración  $tp$  [Fuente: Elaboración propia]. ..... 199
- Figura 130:** Evolución de la velocidad del fluido en el interior del conducto de salida respecto el centro de la cámara de bombeo para un sistema de respuesta negativa y excitado mediante un pulso de duración  $tp$  [Fuente: Elaboración propia]. ..... 199
- Figura 131:** Evolución temporal de la presión en el interior la cámara de bombeo para un sistema de respuesta negativa y excitado mediante un pulso de duración  $tp$  [Fuente: Elaboración propia]. ..... 200
- Figura 132:** Comparativa entre el comportamiento de un mismo sistema excitado de la misma forma, pero cargado de un fluido con distinta reología (Posición y velocidad respectivamente de un sistema sobre-amortiguado y sub-amortiguado) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 201
- Figura 133:** Evolución temporal de la presión en el interior de la cámara de bombeo para un sistema de respuesta positiva cargado con tintas de diferente reología a), Presión en el mismo sistema sobre-amortiguado pero con una excitación de menor duración y un menor volumen inicial de la cámara de bombeo afín de evitar la cavitación b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 201
- Figura 134:** Representación de la deformación del piezoeléctrico y en consecuencia de la excitación del sistema, constituida a partir de la adición de diferentes funciones rampa donde  $R1$  y  $R2$  tienen como base  $tp1$  mientras que  $R3$  tiene  $tp2 - tp1$  y  $R4$  posee  $tp - tp2$  como base, de forma que las rampas de subida y bajada difieren en duración a). Representación del sentido de la respuesta del sistema en función de la deformación del piezoeléctrico b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 203
- Figura 135:** Datos del sistema mono-nozzle con excitación trapezoidal [168]..... 205
- Figura 136:** Presión en la cámara de bombeo, consecuencia de la excitación mostrada en la Figura 134, en un sistema cuya deformación del piezoeléctrico generó un pulso positivo cuya amplitud fue determinada afín de no generar succiones que induzcan a cavitación ni

retrocesos que puedan introducir burbujas de aire al interior de la cámara de bombeo [Fuente: Elaboración propia]. ..... 205

**Figura 137:** Representación esquemática del proceso de eyección de las gotas generadas mediante un sistema Inkjet DOD por piezoeléctricos a partir de un análisis CFD (unidades en micro segundos) [221]. ..... 208

**Figura 138:** Respuesta del sistema a la señal trapezoidal de la Figura 134 en desplazamiento y velocidad del fluido en el interior del conducto de salida o nozzle en este caso [Fuente: Elaboración propia]. ..... 213

**Figura 139:** Tren de pulsos trapezoidales en representación de la deformación del piezoeléctrico en el interior de la cámara de bombeo. Cada pulso trapezoidal equivale a la eyección de una gota, la cual se realiza a una frecuencia  $f_0$ , siendo esta frecuencia función de la velocidad de desplazamiento del carro y de la forma del patrón a reproducir sobre el sustrato [Fuente: Elaboración propia]. ..... 215

**Figura 140:** Representación de las diferentes etapas del proceso de eyección de las gotas en un sistema de respuesta positiva. A) Estado de equilibrio, B) Inicio de la deformación del piezoeléctrico y por tanto del movimiento del fluido, C) Deformación del menisco y por tanto formación de la gota, D) Generación del chorro libre con inicio de la desaceleración del flujo y por tanto, comienzo de la reducción de la sección, E) Ruptura del chorro, eyección de la gota y retracción del flujo, F) Gota reconfigurándose en vuelo, inicio de la recarga del conducto de salida [168]. ..... 218

**Figura 141:** Retracción del flujo tras la separación de la gota [168]. ..... 220

**Figura 142:** Imágenes de gotas eyectadas de una suspensión de nano partículas de plata (Cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 y tinta ANP) a  $42 \mu\text{s}$  donde se puede ver que las gotas tras la ruptura del flujo libre presentan colas de  $\approx 100 \mu\text{m}$  a) y a  $67 \mu\text{s}$  se puede apreciar las gotas totalmente reconfiguradas en esferas [Fuente: Elaboración propia]. ..... 224

**Figura 143:** Sistema de impresión DOD por Piezoeléctricos multi-nozzles. a) Representación esquemática del proceso de impresión, b) Disposición de los nozzles en el interior del cartucho a lo largo de una línea recta (b.1) o en forma matricial (b.2). c) Vista transversal ampliada del sistema de eyección utilizado dentro del sistema DOD por piezoeléctrico (sistema Bend) (c.1), Representación esquemática del sistema Bend multi-nozzle, disposición lineal de los nozzles con bombas de inyección de tinta en paralelo basado en el resonador de Helmholtz (vista en planta)(c.2) [Fuente: Elaboración propia]. 226

<b>Figura 144:</b> Esquema de un sistema multi-nozzle con ampliación de un nozzle activo [168]. .....	228
<b>Figura 145:</b> Detalles geométricos de la superficie del menisco, en estado de equilibrio [168]. .....	228
<b>Figura 146:</b> Deformación del piezoeléctrico y pérdidas viscosas por rozamiento pared-fluido en régimen laminar [Fuente: Elaboración propia].	234
<b>Figura 147:</b> Datos del sistema multi-nozzle con excitación trapezoidal [226].	237
<b>Figura 148:</b> Frecuencias de resonancia y vectores propios del sistema considerando distintos números de nozzles activos al mismo tiempo y la velocidad del sonido en el conducto de alimentación como $C_m = 100 \text{ m/s}$ [Fuente: Elaboración propia].	238
<b>Figura 149:</b> Representación gráfica de la respuesta del sistema de impresión multi-nozzle DOD basado en el resonador de Helmholtz, excitado mediante un tren de impulsos de forma trapezoidal y considerando la velocidad del sonido en el conducto de alimentación como $C_m = 100 \text{ m/s}$ [Fuente: Elaboración propia].	240
<b>Figura 150:</b> Frecuencias de resonancia y vectores propios del sistema considerando distintos números de nozzles activos al mismo tiempo y la velocidad del sonido en el conducto de alimentación como $C_m = 1.200 \text{ m/s}$ [Fuente: Elaboración propia].	241
<b>Figura 151:</b> Representación gráfica de la respuesta del sistema de impresión multi-nozzle DOD basado en el resonador de Helmholtz, excitado mediante un tren de impulsos de forma trapezoidal y considerando la velocidad del sonido en el conducto de alimentación como $C_m = 1.200 \text{ m/s}$ [Fuente: Elaboración propia].	242
<b>Figura 152:</b> Elementos constitutivos del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 [227].	245
<b>Figura 153:</b> Imagen de micrografía electrónica de transmisión de las nanopartículas de plata de la tinta utilizada [Por cortesía de E. Xuriguera del departamento de ciencia de materiales y química física de la universidad de Barcelona].	247
<b>Figura 154:</b> Imagen conceptual del esquema hidráulico del cartucho Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia].	249
<b>Figura 155:</b> Módulos de almacenamiento del cartucho Dimatix DMC-11610 cargado de tinta de plata ANP y sin tinta, en vacío [Fuente: Elaboración propia].	249
<b>Figura 156:</b> Imágenes del interior del módulo de eyección del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 sin precinto protector del canal de conexión al depósito (elemento 726) a). Vista	

*interna ampliada de dicho canal b). Imagen del conjunto columna (elemento 705) c). Imagen del conjunto calefactor separado del elemento columna d). Representación esquemática del completa del conjunto calefactor-columna-conexiones eléctricas, existente en el interior del módulo de eyección y amplización del conjunto anterior seccionado (Imágenes obtenidos de la patente US 7,631 962 B2 propiedad de FUJIFILM Dimmatix, Inc.), e) y f) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 251*

**Figura 157:** *Imágenes del elemento columna alojado en el módulo de eyección del cartucho DMC-11610 a), Vista ampliada de conjunto sistema de eyección b), Disposición lineal de los nozzles de sección cuadrada sobre el conjunto sistema de eyección c), vista perpendicular de la base del conducto de conexión al depósito y vista completa del canal de alimentación d), Imagen de los conductos de conexión o de admisión a las cámaras de bombeo e) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 252*

**Figura 158:** *Representación esquemática con vista lateral y vertical del sistema de bombeo por piezoeléctricos del cabezal del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 a), Imágenes de dicho cabezal obtenidos de la patente US 7,631 962 B2 propiedad de FUJIFILM Dimmatix, Inc., de la vista tridimensional del sistema de bombeo (sección ampliada de a) b), imagen de la disposición de los múltiples nozzles en línea recta c), imagen completa de módulo de eyección del cartucho DMC-11610 d) [229]. ..... 254*

**Figura 159:** *Imagen frontal del conjunto sistema de bombeo y en detalle los canales de acceso a la cámara de bombeo o los canales de conexión (tramo 2 según la enumeración seguida en el apartado anterior) a y b respectivamente, análisis de los elementos químicos constitutivos de dicho conjunto c) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 255*

**Figura 160:** *Sección transversal del conjunto sistema de bombeo a), Imagen en detalle de los nozzles u orificios de salida b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 255*

**Figura 161:** *Sección transversal del final de la cámara de bombeo e inicio del conducto de conexión [Fuente: Elaboración propia]. ..... 256*

**Figura 162:** *Vista seccionada en alzado de las cámaras de bombeo [Fuente: Elaboración propia]. ..... 256*

**Figura 163:** *Representación sobre el esquema anterior de los nodos y tramos considerados en la modelización del cartucho Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia]. ..... 257*

- Figura 164:** Representación esquemática del cartucho Dimatix DMC-11610 a). Vista lateral y en planta amplia de la sección transversal del nozzle i b) y de dicho nozzle c) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 263
- Figura 165:** Mojabilidad de la cámara de bombeo de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) por la tinta ANP silverjet DGP HRA a través de la determinación del ángulo de contacto estático ( $\theta_y = 58,24050$ ) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 263
- Figura 166:** Representación del circuito eléctrico análogo al sistema dinámico que modeliza el comportamiento del fluido en el interior de cada cámara de bombeo del cartucho Dimatix DMC-11610 bajo esta primera interpretación basada únicamente en la hidráulica y en la acústica (a) y simplificación del mismo (b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 268
- Figura 167:** Representación completa del circuito eléctrico análogo al sistema dinámico que modeliza el comportamiento del fluido en el interior del cartucho Dimatix DMC-11610 bajo esta primera interpretación basada únicamente en la hidráulica y en la acústica a), y esquema simplificado mediante agrupación de elementos en serie b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 269
- Figura 168:** Vista tridimensional completa del circuito hidráulico de los cartuchos analizados bajo las adaptaciones pertinentes (a), vista ampliada del sistema de bombeo existente en el módulo de eyección (b) y detalle de los nozzles en forma de tobera de sección cuadrada (c) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 270
- Figura 169:** Obtención de las señales de control tomadas del equipo de impresión Fujifilm Dimatix DMP-2800 (a), señal de eyección vista a través del osciloscopio (b) y conexiones soldadas al cartucho DMC-11610 utilizado (c) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 271
- Figura 170:** Señales de control del cartucho Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia]. ..... 273
- Figura 171:** Características reológicas generales de las tintas de plata ANP [Fuente: Advanced Nano Products]. ..... 275
- Figura 172:** Características reológicas de la tinta de plata utilizada en la modelización del comportamiento dinámico de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia]. ..... 275
- Figura 173:** Evolución de la viscosidad de la tinta de plata ANP silverjet DGP HRA en función de la temperatura y resaltado el valor bajo las condiciones de impresión [Fuente: Elaboración propia]. ..... 277

- Figura 174:** Evolución estimada de la tensión superficial de la tinta de plata ANP silverjet DGP HRA en función de la temperatura bajo la aplicación de la ley de Eötvös y resaltado el valor bajo las condiciones de impresión [Fuente: Elaboración propia]. ..... 278
- Figura 175:** Control del cartucho DMC-11610 como un sistema dinámico con tres entradas por nozzle, en particular 49 señales de control de 16 nozzles [Fuente: Elaboración propia]. ..... 279
- Figura 176:** Representación en forma de diagrama de bloques de estados en el dominio temporal, del sistema ecuaciones anteriores que describen el comportamiento del dinámico del fluido en el interior del cartucho analizado [Fuente: Elaboración propia]. ..... 280
- Figura 177:** Representación de la señal de excitación empleada, interpretada como una variación volumétrica de las cámaras de bombeo en tanto por uno [Fuente: Elaboración propia]. ..... 281
- Figura 178:** Respuesta hidrodinámica del cartucho analizado interpretado como mono-nozzle visto como un sistema hidro-acústico: posición y velocidad del fluido en el tramo N respecto al nozzle (a) y en el tramo E respecto al nodo 10 (b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 282
- Figura 179:** Respuesta hidrodinámica del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610, analizado como un sistema hidro-acústico: posición y velocidad del fluido en el tramo N respecto al nozzle (a), en el tramo E respecto al nodo 10 (b) y en el canal de alimentación tramo F respecto al nodo 11 (c) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 283
- Figura 180:** Representación del sistema de eyección (a). Membrana bimaternal biempotrada (b), y vista detallada de la sección de la membrana tras considerarla monomaterial (c) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 286
- Figura 181:** Representación de la señal de excitación empleada, interpretada como una presión dependiente del tiempo [Fuente: Elaboración propia]. ..... 286
- Figura 182:** Respuesta hidrodinámica del cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610, analizado como un sistema mecánico-hidráulico-acústico multi-nozzle: posición y velocidad del fluido en el tramo N respecto al nozzle (a), en el tramo E respecto al nodo 10 (b) y en el canal de alimentación tramo F respecto al nodo 11 (c) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 287
- Figura 183:** Representación esquemática del efecto piezoeléctrico en un cristal de cuarzo [Fuente: Elaboración propia]. ..... 290

- Figura 184:** Representación de la estructura elemental de los PZT por encima (a) y por debajo de su temperatura de Curie (b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 291
- Figura 185:** Proceso de alineación de los dipolos en los distintos dominios de Weiss, antes (a) durante (b) y después del proceso de polarización o Poling (c) [230]. ..... 292
- Figura 186:** Bucles de histéresis de los materiales ferroeléctricos a), representación de la curva de polarización (P) b), de la deformación bipolar c) y de la deformación unipolar d), en función del campo eléctrico aplicado (E) para una cerámica piezoeléctrica PZT y para BSPT [91] y [231] respectivamente. .... 293
- Figura 187:** Subdivisiones de los materiales piezoeléctricos “Hard” y “Soft” [Norma DOD-STD-1376A (SH)]. ..... 296
- Figura 188:** Tabla de equivalencias para algunos de los tipos de piezoeléctricos. [Fuente: Boston piezo optics inc.]..... 296
- Figura 189:** Comparación entre distintos mecanismos diseñados para magnificar la deformación de los actuadores piezoeléctricos utilizados en sistemas de microbombeo [234]. ..... 298
- Figura 190:** Datos ofrecidos por Morgan advanced materials de las propiedades de los materiales de los piezoeléctricos del tipo Navy Type VI (“Soft”) PZT-5H [237]..... 302
- Figura 191:** Definición de constantes  $d$  y  $g$  bajo distintas interpretaciones [Fuente: Elaboración propia]. ..... 304
- Figura 192:** Sistema utilizado en la modelización de las propiedades piezoeléctricas [Fuente: Elaboración propia]. ..... 305
- Figura 193:** Diseño de un actuador piezoeléctrico del tipo pila a). Representación esquemática del actuador piezoeléctrico del sistema Inkjet donde el eje z es su eje de polarización b [Fuente: Elaboración propia]. ..... 307
- Figura 194:** Evolución de la impedancia de los elementos piezoeléctricos en función de la frecuencia de excitación [238]. ..... 308
- Figura 195:** Comportamiento ferroeléctrico del titanato de bario con la temperatura [241].310
- Figura 196:** Piezas de ejemplo reproducidas por el sistema de impresión XJET [242]. .... 311
- Figura 197:** Representación esquemática del sistema DOD del tipo Bend empleado con su respectivo actuadores piezoeléctricos a) y diagrama del sólido libre del mismo b).

- Interpretación de un sistema de respuesta positiva y negativa en función de la deformación del piezoeléctrico siendo estos excitados con una misma polarización y si se alternase la polarización bajo una corriente alterna (situación no contemplada) c) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 312*
- Figura 198:** *Imágenes de un fracmento del conjunto sistema de bombeo, fotografía a color de baja resolución e imagen ampliada al microscopio SEM, a y b respectivamente. [Fuente: Elaboración propia]. ..... 313*
- Figura 199:** *Vista ampliada de los pilares de soportes a) y ubicación de los mismos en la C. de Bombeo b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 314*
- Figura 200:** *Vista en detalle de la cámara de bombeo a) y vista ampliada de las partículas cerámicas que constituyen a los actuadores piezoeléctricos del sistema Inkjet analizado b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 314*
- Figura 201:** *Representación esquemática de los diagramas del sólido libre, momentos flectores y deformación, de la membrana superior que cubre a la cámara de bombeo [Fuente: elaboración propia]. ..... 316*
- Figura 202:** *Deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo desde un punto de vista estático en función del voltaje, vista perpendicular al plano zy o en dirección a las conducciones de admisión y expulsión (a) y resaltado en la esquina superior derecha, la señal de excitación eléctrica con sus 4 niveles (b) [Fuente: elaboración propia]. ..... 320*
- Figura 203:** *Evolución temporal de la deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo desde un punto de vista estático en función del voltaje aplicado y de la anchura de la cámara (a), evolución del volumen en el interior de la cámara de bombeo en función de la duración total de la eyección (b) y deformación la membrana en función del voltaje aplicado desde el encendido hasta la estabilización después de la eyección (c) [Fuente: elaboración propia]. ..... 320*
- Figura 204:** *Evolución temporal de la deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo visto desde un punto de vista dinámico sin amortiguación mecánico-resistente en función del voltaje aplicado durante el transitorio del encendido ( $0 \leq t < t_{p0}$ ) (a), evolución del volumen en el interior de la cámara de bombeo en función de la duración total de la eyección (b) y deformación la membrana en función del tiempo desde el encendido hasta la estabilización después de la eyección (c) [Fuente: elaboración propia]. ..... 322*



**Figura 205:** Representación esquemática del modelo de 2 etapas empleado en el análisis de la respuesta hidrodinámica del cartucho Inkjet empleado [Fuente: elaboración propia]. 323

**Figura 206:** Resultados arrojados por el modelo E-M-H-A implementados en el Matlab. Desde un punto de vista mecánico: Incremento del volumen en la cámara de bombeo (a), incremento de la presión producto de la señal eléctrica de excitación sin el transitorio del encendido (b), evolución de la deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo en función del tiempo (c) y perfil de la misma en el plano yz para todo el intervalo temporal analizado (d). Desde un punto de vista Hidráulico: Respuesta hidrodinámica del cartucho analizado: posición y velocidad de la tinta de plata respecto al nozzle (e) y respecto al nodo 10 del tramo E (f) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 324

**Figura 207:** Vista lateral del sistema conjunto sistema de bombeo tomada de la patente US20070255780A1 propiedad de FUJIFILM Dimatix, Inc., a) y vista frontal de la deformación de la membrana bajo la interpretación actual b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 325

**Figura 208:** Resultados arrojados por el modelo E-M-H-A implementados en el Matlab bajo las nuevas consideraciones. Desde un punto de vista mecánico: Incremento del volumen en la cámara de bombeo (a), incremento de la presión producto de la señal eléctrica de excitación sin el transitorio del encendido (b), evolución de la deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo en función del tiempo (c) y perfil de la misma en el plano yz para todo el intervalo temporal analizado (d). Desde un punto de vista eléctrico: Potencia eléctrica instantánea consumida durante la eyección de una gota (e) voltaje aplicado (Waveform) (f) e intensidad producida a consecuencia de la descarga de los actuadores (g). Desde un punto de vista Hidráulico: Respuesta hidrodinámica del cartucho analizado: posición y velocidad de la tinta de plata respecto al nozzle (h) y respecto al nodo 10 del tramo E (i) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 326

**Figura 209:** Respuesta hidrodinámica del cartucho analizado interpretado como mono-nozzle visto como un sistema electro-mecánico-hidro-acústico: posición y velocidad del fluido en el tramo N respecto al nozzle (a) y en el tramo E respecto al nodo 10 (b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 327

**Figura 210:** Interpretación del actuador piezoeléctrico como un elemento totalmente capacitivo [Fuente: Elaboración propia]. ..... 329

**Figura 211:** Resultados arrojados por el modelo E-M-H-A implementados en el Matlab para la combinación  $[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1]$ , es decir cuando solo el primer nozzle se encuentra activo y por tanto eyectara una única gota. Desde un punto de vista mecánico:

*Incremento del volumen en la cámara de bombeo 1 (activa) y resaltado en la esquina superior derecha incremento del volumen en los no activos (a), incremento de la presión (acústica) producto de la señal eléctrica de excitación sin el transitorio del encendido en la cámara activa, en las no activas y en el tramo F respectivamente (b). Evolución de la deformación de la membrana superior de la cámara de bombeo 1 en función del tiempo (c) y de todas cámaras de bombeo existentes en el cartucho (d). Vista de perfil (plano yz) de la membrana cámara de bombeo 1 (e), de las membranas no activas (f) y finalmente de todas las membranas existentes el intervalo temporal analizado (g) [Fuente: Elaboración propia].*

..... 330

**Figura 212:** *Resultados arrojados por el modelo E-M-H-A implementados en el Matlab para la combinación [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1], es decir cuando solo el primer nozzle se encuentra activo y por tanto eyectara una única gota. Desde un punto de vista Hidráulico: Respuesta hidrodinámica del cartucho analizado: posición y velocidad de la tinta de plata respecto al nozzle activo en el nodo 1 (a) y respecto al nodo 10 del tramo E de la misma (b) [Fuente: Elaboración propia].* .....

331

**Figura 213:** *Continuación de la gráfica anterior. Posición y velocidad de la tinta en los nozzles no activos respecto al nodo 1 (a) y respecto al nodo 10 del tramo E (b). Finalmente, posición y velocidad de la tinta respecto al nodo 11 del tramo F o de alimentación (c) [Fuente: Elaboración propia].* .....

332

**Figura 214:** *Resultados arrojados por el modelo E-M-H-A implementados en el Matlab para la combinación [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1], es decir cuando solo el primer nozzle se encuentra activo y por tanto eyectara una única gota. Desde un punto de vista eléctrico: Señal de excitación (Waveform) o voltaje aplicado al actuador de la cámara de bombeo 1 (a), intensidad producida a consecuencia de la descarga de dicho actuador activo (b) y potencia eléctrica instantánea consumida durante la eyección de una gota por el nozzle activo 1 (c). De igual forma, Señal aplicada a los nozzles no activos (d), intensidad generada (e) y potencia eléctrica consumida (f). Finalmente, intensidad total generada por el sistema (g) y potencia instantánea eléctrica total consumida en la combinación analizada (h) [Fuente: Elaboración propia].* .....

333

**Figura 215:** *Representación simplificada del circuito eléctrico análogo al sistema dinámico mediante la agrupación de los distintos elementos en serie, que modeliza el comportamiento del fluido en el interior del cartucho Dimatix DMC-11610 bajo una interpretación electro-mecánica-hidráulica-acústica del mismo fijando la temperatura a un valor constante.*

*Esquema electric equivalente a) y vista seccionada del sistema visto como mono-nozzle b)*  
[Fuente: elaboración propia]..... 344

**Figura 216:** *Representación del sistema de bombeo completo a) y esquema eléctrico completo del cartucho Inkjet como un sistema como multi-nozzle b)* [Fuente: elaboración propia]. ..... 344

**Figura 217:** *Representación de las señales de eyección condicionadas por el archivo digital a reproducir (3 señales para 3 nozzles, desfasadas y en el nozzle 3 con distinto nivel (volumen)) a), y aplicadas sobre uno de los cartuchos multi-nozzle mostrado en perspectiva y seccionado, de un sistema hipotético multimaterial basados en los cabezales analizados b)*  
[Fuente: elaboración propia]..... 348

**Figura 218:** *Algoritmo genérico multietapa para el cálculo de la potencia eléctrica requerida para la eyección de una gotita del material  $j$  en la graduación  $k$  en un sistema de  $N$  nozzles, bajo una interpretación del mismo como un sistema Electro-Mecánico-Hidráulico-Acústico, y tras la introducción del archivo digital el consumo de eléctrico de su reproducción*  
[Fuente: Elaboración propia]. ..... 349

**Figura 219:** *Imagen de un cabezal de impresión del tipo push de generación 5 de la empresa RICOH de 384 nozzles de los cuales solo una veintena se encuentran activos (a) y secuencia de imágenes tomadas en las instalaciones de dicha empresa ubicada en Telford UK de a través de una cámara de ultra alta velocidad de la eyección de una gota de tinta de nivel 2 constituida por un pulso doble sin optimizar aplicado a los actuadores de dicho cabezal (b)* [Fuente: elaboración propia]. ..... 352

**Figura 220:** *Esquema conceptual utilizado en la modelización de la trayectoria de las gotas*  
[Fuente: Elaboración propia]. ..... 353

**Figura 221:** *Representación esquemática de las velocidades iniciales de las gotas eyectadas* [Fuente: Elaboración propia]. ..... 354

**Figura 222:** *Diagramas del sólido libre de las gotas* [Fuente: Elaboración propia]. ..... 354

**Figura 223:** *Representación de la fuerza de drag en función del Reynolds [253].*..... 357

**Figura 224:** *Esquema de la linealización del coeficiente de drag mediante  $j$  iteraciones en cada incremento  $i$*  [Fuente: Elaboración propia]. ..... 360

**Figura 225:** *Esquema del algoritmo incremental iterativo desarrollado*  
[Fuente: Elaboración propia]. ..... 361

- Figura 226:** Comparación entre la trayectoria desarrollada por una gota eyectada despreciando la oposición al desplazamiento que presenta el aire y bajo las mismas condiciones teniendo en cuenta la fricción del mismo con ésta [Fuente: Elaboración propia].  
..... 362
- Figura 227:** Patrón digital a reproducir (a) y representación en negro del mismo mediante la superposición de gotas depositadas a voluntad en una ubicación concreta sobre del plano de impresión sin la compensación del error y solapada a ésta la misma en azul pero con el desfase corregido introducido por la fricción del aire (b) y detalle ampliado de una zona de la misma (c) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 363
- Figura 228:** Evolución del error inducido por la fricción de la gota con el aire durante el desarrollo de la trayectoria parabólica que esta describe en función de las velocidades de eyección [Fuente: Elaboración propia]. ..... 364
- Figura 229:** Evolución del error en función del volumen eyectado bajo los parámetros de impresión establecidos Voy1, Vox1 a) y en función de la densidad del fluido empleado a diferentes condiciones de impresión b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 365
- Figura 230:** Representación esquemática del carro donde se alojan los cartuchos que se mueven en la dirección de escaneado (eje x) eyectando gotas sobre superficies no planas (a). Evolución del error en el posicionamiento de las gotas en función de la distancia entre una boquilla activa con el sustrato en las condiciones de impresión establecidas (b), y el parámetro de ajuste o incremento relativo del error ( $\varphi$ ) (c) [Fuente: Elaboración propia]... 366
- Figura 231:** Representación esquemática del proceso de impresión desde el punto de vista de la deposición de las gotas sobre el sustrato, afín de reproducir con estas las líneas y patrones deseados y mediante la superposición de capas geometrías tridimensionales [Fuente: elaboración propia]. ..... 368
- Figura 232:** Representación esquemática de una interfase y una interfaz [257]. ..... 370
- Figura 233:** Interpretación microscópica de la tensión/energía interfacial [Fuente: elaboración propia]. ..... 372
- Figura 234:** Sistemas clásicos de mojado: a) Gota sésil b) Burbuja cautiva y c) Meniscos líquidos [Fuente: Elaboración propia]. ..... 372
- Figura 235:** Esbozo para la deducción de la presión capilar, donde la fuerza normal a la superficie se representa como  $dF_n$ , la tensión superficial  $\gamma_{LF}$ , los ángulos de curvatura  $\vartheta_1$  y

$\vartheta_2$ , los radios de curvatura  $R_1$  y  $R_2$  y las longitudes laterales  $dS_1$  y  $dS_2$  [Fuente: Elaboración propia]. ..... 373

**Figura 236:** Esquema de una gota de líquido inmersa en un fluido; inicialmente, de radio  $r$  y área superficial  $S_0$  que tras un aumento de su radio en una cantidad  $dr$  le corresponde con una nueva área superficial  $S_1$  y una presión  $P_1$  [Fuente: Elaboración propia]. ..... 374

**Figura 237:** Ángulo de contacto y tensiones interfaciales representadas vectorialmente de donde se deduce la ecuación de Young [Fuente: Elaboración propia]. ..... 376

**Figura 238:** Representación de las superficies hidrófilas con  $\theta_Y < 90^\circ$  y superficies hidrófobas  $\theta_Y > 90^\circ$  [Fuente: elaboración propia]. ..... 377

**Figura 239:** Representación de la ascensión capilar, fluidos que mojan agua por ejemplo (a), fluidos que no mojan por ejemplo el mercurio (b) [Fuente: elaboración propia]. ..... 378

**Figura 240:** Representación de las fuerzas de cohesión [Fuente: elaboración propia]. ..... 379

**Figura 241:** Interpretación microscópica de la tensión de línea [Fuente: elaboración propia]. ..... 382

**Figura 242:** Representación esquemática de los ángulos intrínseco y aparente sobre una superficie a) Rugosa y homogénea b) Lisa y heterogénea [Fuente: elaboración propia]. .. 384

**Figura 243:** Diferentes ángulos de contacto observables para una gota con MAC, sobre una superficie químicamente heterogénea con un patrón de heterogeneidad a bandas [257]. 386

**Figura 244:** Curva típica de energía libre sobre: a) una superficie ideal y b) una superficie no ideal [257]. ..... 388

**Figura 245:** Ángulos de contacto observables de avance y retroceso sobre: a) Una superficie rugosa y homogénea y b) una superficie lisa y heterogénea [Fuente: elaboración propia]. ..... 389

**Figura 246:** Esquema de la situación de mojado donde es necesaria la aplicación de la ecuación de Cassie- Baxter para la obtención del ángulo de equilibrio [Fuente: elaboración propia]. ..... 392

**Figura 247:** Algunos parámetros de rugosidad típicos 2D y 3D [284]. ..... 393

**Figura 248:** Viscosidad de una suspensión de partículas coloidales de Alúmina en parafina como medio fluido [285]. ..... 396

**Figura 249:** Fluidos susceptibles a ser impresos por sistemas Inkjet DOD [290]. ..... 398

- Figura 250:** Mapa de deposición estable de gotas sobre sustratos sólidos, establecido por Schiaffino y Sonin [294]. Dentro de esta gráfica se resalta también las condiciones reológicas requeridas por los sistemas Inkjet DOD tomadas de la Figura 249 [290]...... 400
- Figura 251:** Diagrama esquemático de los distintos escenarios que se pueden presentar en la deposición de las gotas [298]. ..... 401
- Figura 252:** Diferentes modelos desarrollados para la estimación del coeficiente de esparcimiento  $\beta$  [309]. ..... 402
- Figura 253:** Ilustración esquemática de las secuencia de eventos que tienen lugar en la deposición de gotas sobre un sustrato rígido [290]. ..... 403
- Figura 254:** Modelo planteado por Chandra y Avedisian [300] y refinado por Pasandideh-Fard [301]. ..... 406
- Figura 255:** Comparación entre las estimaciones del modelo de Pasandideh-Fard con la medición experimental a distintos números de Weber, en función del ángulo de contacto en equilibrio [306]. ..... 410
- Figura 256:** Representación de una circunferencia en analogía a la forma de la gota en su estado previo al impacto [Fuente: Elaboración propia]. ..... 410
- Figura 257:** Representación de casquete esférico [Fuente: Elaboración propia]. ..... 410
- Figura 258:** Representación esquemática de la evolución del coeficiente de expansión en función de la mojabilidad en un tiempo adimensionalizado a) sustratos hidrófilos b) sustratos hidrofóbicos [313]. ..... 413
- Figura 259:** Relación tenida en cuenta en la modelización de la anchura de la pista final [314] a), Esquema del proceso desde un punto de vista general b) [Fuente: elaboración propia]. ..... 414
- Figura 260:** Representación esquemática de un cordón [Fuente: elaboración propia]. ..... 415
- Figura 261:** Representación esquemática del comportamiento de un tren de gotas depositadas secuencialmente de forma adyacente con el objeto de reproducir líneas (cordones). a) Gotas separadas por un exceso en el drop spacing (pista no continua), b) Pistas conductoras pero de perfil irregular debido a que el drop spacing no supera al valor crítico, c) Drop spacing dentro del rango y por tanto, pistas estables con líneas de contacto paralelas, regulares y conductoras [317]. ..... 417

- Figura 262:** Mapa de la estabilidad de los cordones reproducidos mediante la deposición de gotas por sistemas Inkjet, modelo de Stinger y Derby [318]..... 420
- Figura 263:** Comportamiento del fluido en la reproducción de líneas. a) Reproducción de un cordón sin perturbaciones (caso b idealizado), b) Cordón inestable con ángulo de contacto fijo y línea móvil (caso a), c) Cordón de línea de contacto fija y ángulo móvil (caso c) [295]. ..... 422
- Figura 264:** Comportamiento de las gotas depositadas con objeto de reproducir patrones o líneas [Fuente: Elaboración propia]. ..... 423
- Figura 265:** Imagen del comportamiento de un tren de gotas depositadas secuencialmente de forma adyacente con el objeto de reproducir líneas (cordones). a) Gotas aisladas (pista no continua) por un exceso de drop spacing, b) Drop spacing inferior al valor crítico y por tanto pistas conductoras pero de perfil irregular, c) Pistas estables y continuas debido a un drop spacing dentro del rango, d) Pistas irregulares con protuberancias debido a drop spacing muy pequeños, e) Solapamiento de las gotas en forma de monedas solapadas debido a un aumento en la velocidad de los mecanismos de cambio de fase [322]. ..... 424
- Figura 266:** Circuito de prueba impreso sobre un sustrato de resina fotosensible (a) e imagen ampliada vista con el microscopio SEM (b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 426
- Figura 267:** Imagen digital a reproducir (a) y reproducción simulada mediante la superposición de gotas (b). Imagen al SEM de la reproducción física de la imagen digital mediante una única capa de tinta de plata ANP sobre un sustrato previamente impreso de barbotina de LTCC (c), y finalmente, vista ampliada de la reproducción donde se aprecia las crestas patronizadas producto del píxel blending (d) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 427
- Figura 268:** Representación conceptual de la reproducción monocromática de la letra E a), y i mediante la deposición estable de un tren de gotas secuenciadas a través del sistema Inkjet DOD alojado en el interior del carro móvil del equipo Nhibrid32D b), finalmente esquema del proceso [Fuente: Elaboración propia]. ..... 428
- Figura 269:** Imagen de la gota de una suspensión depositada sobre un sustrato hidrofóbico visto al SEM. Representación en alzado de la evolución de la misma tras la evaporación de los solventes (a), vista tras alcanzar el equilibrio final (b) y en detalle superficie del depósito (c) [324]. ..... 430
- Figura 270:** Análisis del fenómeno de la mancha de café en una gota sésil de una suspensión constituida por un fluido volátil cargado de partículas no solubles realizado por

Deegan et al. a) Retroceso de la huella debido a la pérdida de masa, b) Consideración del flujo de marangoni como compensación a la evaporación, y c) Modelización del fenómeno [325]. ..... 431

**Figura 271:** Representación esquemática del proceso de dispersión de las partículas coloidales durante la deposición y fijación de las gotas. Efectos dinámicos producidos en el impacto y en consecuencia, la aparición de la mancha de café a). Flujo de Marangoni como resultado de elementos de distinta tensión superficial b) [327]. Perfil mostrado por un cordón 40  $\mu\text{m}$  de ancho tras su fijación reproducido mediante el uso de tinta de plata depositado sobre un sustrato de PET (Tereftalato de polietileno) [328] c) y finalmente a modo de ejemplo un caso extremo de dicho fenómeno, en la deposición de partículas de sílica para la reproducción de cordones d) y e) sobre un sustrato hidrofílico [329]. ..... 432

**Figura 272:** Evolución completa de la deposición de una gota sésil de tinta ANP silverjet DGP HRA depositada hasta alcanzar el equilibrio sobre un sustrato de barbotina fotosensible del LTCC en verde a). Posteriormente, prueba de realizada con los mismos materiales de la primera etapa del proceso de fijación. Vista de perfil b) y en planta de la gota en estado húmedo c) y durante el proceso de evaporación forzada de los solventes de la tinta c), tras su secado completo d) y vista en detalle del anillo exterior fruto del flujo de Marangoni e) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 433

**Figura 273:** a) Imagen renderizada de la pieza reproducida por el equipo Nhibrid32D. b) Imagen de una de las pistas conductoras reproducidas con multiples capas superpuestas. c) Evidencia de la fractura del sustrato fruto de su inestabilidad térmica en torno a la temperatura de sinterización de la plata (pista de 1 capa de tinta). d) Imagen tomada del osciloscopio Rigol DS1104z en donde se muestra la Waveform real aplicada a los piezoeléctricos del cartucho [Fuente: elaboración propia]. ..... 434

**Figura 274:** a) Representación de la ubicación de las gotas que conforman las pistas reproducidas y que previamente has sido definidas por un archivo digital y representadas en la imagen anterior. b) Ancho de las pistas impresas y distribución normal de las mismas de una población de 50. c) Longitud de las mismas y distribución normal [Fuente: elaboración propia]. ..... 436

**Figura 275:** Imágenes al SEM de los depósitos constituidos de plata (a) y tras su sinterización a 150  $^{\circ}\text{C}$  durante 5 min (b) y pista cordón o pista conductora después de 3h a dicha temperatura (c). Evolución de la resistividad de las pistas impresas en función de un



tiempo de curado a una temperatura de exposición constante (d) y finalmente evolución de la misma bajo un crecimiento constante de la temperatura de curado (e) [330]..... 438

**Figura 276:** a) Contaminación de las pistas debido a la degradación del sustrato la sinterización de los depósitos de plata, b) Fracturas de las pistas reproducidas sobre este sustrato agrietadas por la contracción irregular del sustrato [Fuente: Elaboración propia].  
..... 439

**Figura 277:** Evolución de la resistencia de las pistas de 1 mm de ancho en función del número de capas impresas mediante gotas de 10 pL con un drops spacing de 40  $\mu\text{m}$  en X y de 37,5  $\mu\text{m}$ , con tinta ANP silverjet DGP HRA sobre un sustrato de resina Spot-A HT y cuya sinterización se ha llevado a cabo ligeramente por debajo de los 200°C con exposiciones a intermedias para fijación (evaporación de solventes) a 70°C [Fuente: Elaboración propia].  
..... 441

**Figura 278:** Vista en perspectiva de la plataforma de construcción durante la reproducción de las pistas de plata de 1 mm de ancho sobre la probeta previamente impresa de Spot-HT (a). Imagen durante la medición de la resistencia de las mismas mediante 2-probe Technique realizado en un multímetro Keithley 2401 SourceMeter (b) y vista en detalle de la misma con ligera degradación de las pistas (c) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 442

**Figura 279:** Imagen renderizada de la geometría empleada para la validación de la impresión en rampas (a), pieza tras su reproducción (50  $\mu\text{m}$  de altura de capa y 3 capas de plata) (b). Vista del Microscopio SEM empleado (c) e imagen de las distintas pruebas realizadas (d) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 443

**Figura 280:** Vista en planta de las pistas horizontales: (a) Pieza impresa con un espesor de capa de 50  $\mu\text{m}$  y con tres capas de plata. (b) Pieza impresa con un espesor de capa de 25  $\mu\text{m}$  y con tres de plata. (c) Pieza impresa con un espesor de capa de 12,5  $\mu\text{m}$  y al igual que las anteriores con 3 capas de plata. Vista en perspectivas de las rampas en la pieza impresa con 50  $\mu\text{m}$  de espesor de capa. (e) Y finalmente imagen al SEM de la rampa de 15° de inclinación reproducida con un espesor de capa de 50  $\mu\text{m}$  y con una única capa de Inkjet [Fuente: Elaboración propia]. ..... 444

**Figura 281:** Rampa dispuesta horizontalmente de bajada reproducida mediante una única capa de tinta de plata sobre un sustrato impreso por DLP con una inclinación de 15° construida mediante capas de 50  $\mu\text{m}$  de espesor (a). Imagen ampliada de los escalones donde se puede apreciar la fenomenología expuesta anteriormente (b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 446

- Figura 282:** Imagen al SEM de una rampa horizontal de subida a  $75^\circ$  de inclinación reproducida mediante una única capa de tinta presentando una conductividad nula por insuficiencia de plata en los depósitos a). Pruebas iniciales en piezas híbridas, enfatizando los problemas con la contracción irregular de las piezas durante el sinterizado b). Pruebas posteriores: Patrón estable reproducido, en estado húmedo, sobre un sustrato cerámico previamente impreso en verde c), tras el curado de la tinta gracias a la evaporación de los solventes como paso previo a la sinterización d). Distintas pruebas realizadas aumentando el número de capas impresas (2, 4, 6 y 8 de izquierda a derecha) y por tanto incrementando la cantidad de los depósitos de planta afín de reducir los efectos de la difusión de ésta, en los circuitos de la pieza tras la sinterización e) y finalmente pieza cerámica híbrida impresa y sinterizada con 3 y 4 capas de tinta de plata insuficientes para generar un depósito continuo tras la sinterización f) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 447
- Figura 283:** Concepto de la matriz definitoria utilizada en el algoritmo discretizador [Fuente: Elaboración propia]. ..... 451
- Figura 284:** Representación de la discretización de las imágenes en bandas de espesor constante, proceso realizado por el algoritmo descrito [Fuente: Elaboración propia]. ..... 451
- Figura 285:** Vectores que definen el posicionamiento de la imagen a reproducir respecto a la base local y la base móvil del cabeza de impresión, la cual a su vez se encuentra referenciada a la base absoluta [Fuente: Elaboración propia]. ..... 452
- Figura 286:** Definición de una imagen a través de su discretización por bandas a), representación simulada mediante la deposición de las gotas eyectadas de forma discreta por el cartucho en dispersión y secuenciación b y c). Finalmente, imagen reproducida bajo las condiciones impuestas d) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 455
- Figura 287:** Representación esquematizada del sistema de impresión de materiales funcionales aplicada en el equipo Nhibrid32D basado en el control de los cartucho FUJIFILM modelo Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia]. ..... 458
- Figura 288:** Representación conceptual de un sistema Inkjet DOD accionado por piezoeléctricos con múltiples señales de excitación acordes a distintos niveles en el volumen eyección a), y representación basada en los cartuchos empleados emulando un sistema multicolor a base de tintas CMYK b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 460

- Figura 289:** Imagen de una pieza monomaterial generada a través de la herramienta Netfab aportada por Autodesk para procesos de fabricación aditiva en el TCT show de Birmingham 2017 [331]. ..... 461
- Figura 290:** Pasos en la definición de un objeto y su posterior representación voxelizada con un número  $N$  de atributos [Fuente: Elaboración propia]. ..... 462
- Figura 291:** Representación conceptual de la definición de una capa cualquier de una geometría segmentada en capas a través de una imagen bidimensional. Imagen 2D cualquier definida a través de un sistema RGB de profundidad de color de 8 bit por canal a). Representación de esta a través de vóxeles con un atributo cromático b) y Resaltado el vóxel ubicado en la posición 1,1,1 c) [Fuente: Elaboración propia] ..... 463
- Figura 292:** Imagen de las baldosas del Paseo de Gracia diseñadas por Gaudí como ejemplo de una geometría simple a reproducir [Fuente: elaboración propia]. ..... 464
- Figura 293:** Representación conceptual de la etapa de definición digital del objeto a reproducir a), y su reproducción a través de una impresora multimaterial b). Secuencia de capas a reproducir con los respectivos materiales empleados en ellas b.1), e imagen en planta del objeto reproducido con materiales funcionales b.2) [Fuente: elaboración propia]. ..... 464
- Figura 294:** Representación de una geometría constituida por vóxeles multiatributo: Vista en planta y en perspectiva de la geometría a reproducir representada a través del Matlab con una resolución geométrica de  $1/3$  de la capacidad máxima programada a) y representación renderizada de múltiples baldosas activas dispuestas sobre una superficie plana b) [Fuente: elaboración propia]..... 465
- Figura 295:** Incipientes aplicaciones a día de hoy de la impresión funcional mediante el empleo de e-ink en la reproducción bidimensional de etiquetas inteligentes a), y brazaletes monitorización b). Ejemplo conceptual de la introducción de éstas en objetos tridimensionales, en concreto en utensilios domésticos inteligentes con una alta interacción con el usuario en este caso fundamentada en la vista c) y finalmente nuevas aplicaciones por parte de la universidad de Tokio en el desarrollo de la impresión funcional biocompatible en comunión con el internet of things para el monitoreo de pacientes en tiempo real d) [332]. ..... 466
- Figura 296:** Representación de una hipotética matriz definitoria en este caso bidimensional o relativa a la capa  $i$  de 16 vóxeles capaz de definir un atributo crómico con una capacidad

de reproducir una profundidad de color de  $2^{20}$  (a). A la derecha, identificación del color como una combinación de 5 elementos depositados de 4 formas distintas atendiendo a densidad de puntos e intensidad o nivel de volumen de las gotas por elemento (b) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 467

**Figura 297:** Representación de las submatrices identificativas de la graduación de los elementos involucrados en la reproducción de cada vóxel [Fuente: Elaboración propia]... 468

**Figura 298:** Representación esquemática de un sistema de impresión multimaterial capaz de reproducir objetos vóxelizados provistos de distintos atributos. (a) Vista en planta de una capa a reproducir (imagen 2D anterior) (a). Resaltado en rojo: porción de la imagen a reproducir tras utilizar el algoritmo de Floyd Steinberg (b). Reproducción de la porción resaltada en el equipo reproductor conceptualizado visto en planta, capa  $i$  de un vóxel  $x$  constituido por 5+3 elementos base sin graduaciones (binario) perteneciente a la banda  $b$  (c). Disposición de los cabezales en un hipotético carro de impresión con 11 materiales distintos (8 cromáticos y 3 funcionales) (d) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 469

**Figura 299:** Representación esquemática vista en planta del sistema de impresión multimaterial anterior, reproduciendo la banda  $b$  de la capa  $i$  de un vóxel material  $x$  (a), constituido por 3 materiales superpuestos (b), y tabla resumen con los recursos (materiales) que el hipotético sistema posee (c) [Fuente: Elaboración propia]. ..... 472

**Figura 300:** Representación de las distintas etapas existentes desde la conceptualización de un objeto hasta su materialización [Fuente: Elaboración propia]. ..... 474



## 2.12. LISTADO DE TABLAS DEL VOLUMEN 1

<b>Tabla 1:</b> Listado de fabricantes de cerámicas para usos electrónicos [11]. .....	12
<b>Tabla 2:</b> Clasificación AM [Fuente: elaboración propia]. .....	27
<b>Tabla 3:</b> Representación vectorial de algunos colores en RGB, CMYK y en hexadecimal [Fuente: elaboración propia]. .....	88
<b>Tabla 4:</b> Resumen de algunas características de los procesos de impresión y sus tintas [167]. .....	129
<b>Tabla 5:</b> Constituyentes genéricos en la formulación de tintas a base de agua [166]. .....	135
<b>Tabla 6:</b> Datos y dimensiones constructivos del circuito hidráulico de los cartuchos Fujifilm Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia]. .....	259
<b>Tabla 7:</b> Resumen de las señales control del Cartucho Fujifilm Dimatix DMC-11610 [Fuente: Elaboración propia]. .....	274
<b>Tabla 8:</b> Análisis estadístico de las pistas reproducidas [Fuente: elaboración propia]. .....	435
<b>Tabla 9:</b> Mediciones realizadas en las instalaciones de nanoelectrónica aplicada de la Universidad de Barcelona. ....	440



## 2.13. REFERENCIAS DEL VOLUMEN 1

- [1] F. COTEC, "Fabricacion aditiva," *Design studies*, 2011. [Online]. Available: [http://informecotec.es/media/N30\\_Fabric\\_Aditiva.pdf](http://informecotec.es/media/N30_Fabric_Aditiva.pdf). [Accessed: 11-Feb-2019].
- [2] M. Graef and et al., "Positioning More Than Moore Characterization Needs and Methods within the 2011 ITRS," *AIP Conf. Proceedings-American Inst. Phys.*, vol. 1395, no. 1, p. 345, 2011.
- [3] R. Kulke, M. Rittweger, P. Uhlig, and C. Gunner, "LTCC - Multilayer Ceramic for Wireless and Sensor Applications," *Plus*, no. 12, pp. 2131–2136, 2001.
- [4] Y. Xu, X. Wu, X. Guo, B. Kong, M. Zhang, and X. Qian, "The Boom in 3D-Printed Sensor Technology," *MDPI*, vol. 17, no. 5, pp. 1–37, 2017.
- [5] C. A. Harper and Sampson, *Electronic materials and processes handbook*. McGraw-Hill, 2004.
- [6] Y. Tseng, "Manufacturing Process Analysis of Ag / Pd Thick Film Conductor Circuits, Phd Thesis," Lehigh University, 1995.
- [7] J. M. Fernández Sanjuán, "Noves estructures LTCC i HTCC per a sensors de pressió capacitiu i per a sensors lambda de tipus resistiu, Phd Thesis," Universitat de Barcelona, 2013.
- [8] M. R. Góngora-Rubio, "Non-packaging applications of LTCC technology," *Conference of Pan-American Advanced Studies Institute, Micro-electromechanical Systems*. San Carlos de Bariloche, Patagonia, Argentina.
- [9] M. R. Gongora-Rubio, P. Espinoza-Vallejos, L. Sola-Laguna, and J. J. Santiago-Avilés, "Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST)," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 89, no. 3, pp. 222–241, 2001.
- [10] R. Camarillo Escobedo, H. Coto Fuentes, F. Valdés Perezgasga, and J. Camarillo Escobedo, "LA TECNOLOGIA LTCC APLICADA AL DESARROLLO DE SISTEMAS DE MICROFLUIDICA," *Mem. del XVI Congr. Int. Anu. la SOMIM*, 2010.
- [11] N. Ibáñez García, "Miniaturización De Analizadores Químicos Mediante La Tecnología Ltcc, Phd Thesis," Universidad Autónoma de Barcelona, 2012.
- [12] R. E. Mistler and E. R. Twiname, *Tape Casting: Theory and Practice*. Wiley, 2000.
- [13] G. N. Howatt, R. G. Breckenridge, and J. M. Brownlow, "Fabrication of thin ceramic sheets for capacitors," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 30, pp. 237–242, 1947.
- [14] G. N. Howatt, "Method of producing high-dielectric high insulation ceramic plates," U.S. Patent 2,582,993, 1952.
- [15] "Conformado de Cerámicas. Tape Casting." Universidad de Oviedo escuela de Minas, laboratorio de cementos, apuntes docentes, 2011.
- [16] F. M. Ramos Pérez, "Integración de la tecnología cerámica multicapa, Phd Thesis," Universitat de Barcelona, 2014.
- [17] "Thick film technology," *Mtarr*. [Online]. Available: [http://www.mtarr.co.uk/courses/topics/0255\\_tft/index.html](http://www.mtarr.co.uk/courses/topics/0255_tft/index.html). [Accessed: 03-Aug-2017].



- [18] B. Baena Perez, "Desarrollo de microanalizadores mediante tecnología LTCC para la monitorización de parámetros ambientales, PFC," Universitat Autònoma de Barcelona, 2009.
- [19] H. Birol, "Fabrication of Low Temperature Co-Fired Ceramic (Ltc)-Based Sensor and Micro-Fluidic Structures, Phd Thesis," École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [20] F. I. for C. T. and S. IKTS, "Hybrid Microsystems," *Fraunhofer.IKTS*, 2019. [Online]. Available: [https://www.ikts.fraunhofer.de/en/departments/electronics\\_microsystems/hybrid\\_micro\\_systems/Microsystems\\_LTCCHTCC.html](https://www.ikts.fraunhofer.de/en/departments/electronics_microsystems/hybrid_micro_systems/Microsystems_LTCCHTCC.html). [Accessed: 28-Jan-2019].
- [21] F. Bechtold, "Integration Technologies for Sensors Using LTCC," *Via-Electronic.Com*, 2011.
- [22] F. Fenollosa Artés and J. Minguella Canela, "Tecnologías de fabricación aditiva para el entorno industrial," *Automática e Instrumentación*, vol. 474, 2015.
- [23] ASTM, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies," *MIT Libraries*, 2013. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>. [Accessed: 22-Jan-2019].
- [24] M. Rodríguez Porras, "Análisis técnico-económico de técnicas de fabricación aditiva para aplicación en diferentes sectores industriales, PFC," Universidad Pontificia Comillas, 2012.
- [25] T. Wohlers and T. Gornet, "Wohlers Report2017: History of additive manufacturing," *Wohlers Associate*, Belgium, pp. 1–23, 2014.
- [26] Proto3000, "The Fused Deposition Modeling Services (FDM) Process." [Online]. Available: <http://proto3000.com/fused-deposition-modeling-fdm-rapid-prototyping-services-process.php>. [Accessed: 28-Nov-2015].
- [27] "3D Cad portal." [Online]. Available: <http://www.3dcadportal.com/errores-mas-comunes-en-archivos-stl.html>. [Accessed: 12-Dec-2015].
- [28] Wikipedia, "Impresión 3D." [Online]. Available: [https://ca.wikipedia.org/wiki/Usuari:Geisic/Impressió\\_3D](https://ca.wikipedia.org/wiki/Usuari:Geisic/Impressió_3D). [Accessed: 14-Dec-2015].
- [29] "Make part fast." [Online]. Available: <http://www.makepartsfast.com/2012/05/3734/a-closer-look-at-extrusion-based-3d-printers/>. [Accessed: 21-Dec-2015].
- [30] I. Etxeberria, G. Alberdi, and I. Vicario, "Láser 'cladding': novedosa técnica de aporte de material," *Interempresas.net*, 2006. [Online]. Available: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/14238-Laser-cladding-novedosa-tecnica-de-aporte-de-material.html>. [Accessed: 18-Dec-2015].
- [31] G. Láser, "Aplicaciones Recargue Láser." [Online]. Available: <http://www.gnclaser.es/servicios/ver.php?id=es&Nservici=1202310734>. [Accessed: 22-Dec-2015].
- [32] Wikipedia, "Cladding (metalworking)." [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cladding\\_\(metalworking\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cladding_(metalworking)). [Accessed: 22-Dec-2015].
- [33] E. Ukar and A. Lamikiz, "Fabricación aditiva: Qué es cada tecnología," *Interempresas.net*, 2015. [Online]. Available: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/138289-Fabricacion-aditiva->

- Que-es-cada-tecnologia.html. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [34] S. S. Crump, "Apparatus and method for creating three-dimensional objects," U.S. Patent 5,121,329, 1989.
- [35] Custompart.net, "Additive Fabrication." [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>. [Accessed: 22-Dec-2015].
- [36] M. LaMonica, "Harvard Spin-off Voxel8 Takes 3D Printing Into Electronics," *Xconomy*, 2015. [Online]. Available: <http://www.xconomy.com/boston/2015/01/05/harvard-spin-off-voxel8-takes-3d-printing-into-electronics/>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [37] "Desktop Metal," 2017. [Online]. Available: <https://www.desktopmetal.com/products/studio/>. [Accessed: 06-Aug-2017].
- [38] "Equipplan." [Online]. Available: <http://www.quipplan-tucker.com/prototipado-rapido/componentes-plasticos/polyjet-objet/>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [39] Proto3000, "The PolyJet Matrix 3D Printing Services Process." [Online]. Available: <http://proto3000.com/polyjet-matrix-3d-printing-services-process.php>. [Accessed: 22-Dec-2015].
- [40] Inkcups.com, "XJET." .
- [41] C. W. Hull, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography," U.S. Patent 4,575,330, 1986.
- [42] Materialise, "Mammoth Stereolithography." [Online]. Available: <http://manufacturing.materialise.com/mammoth-stereolithography>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [43] R. F. Housholder, "Molding process," U.S. Patent 4,247,508, 1979.
- [44] C. Deckard, "Method and apparatus for producing parts by selective sintering," U.S. Patent 4,863,538, 1986.
- [45] Lupeon3D, "Tecnología SLS para impresiones en serie." [Online]. Available: <http://www.lupeon.com/impresion-3d/tecnologias-de-impresion/sinterizado-selectivo-laser>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [46] Makexyz, "SLS 3D Printing," *Makexyz*, 2018. [Online]. Available: <https://www.makexyz.com/printer-services/process/SLS-3D-printing-services>. [Accessed: 28-Jan-2019].
- [47] J. R. Blasco and E. Martínez, "Procesado de nuevos materiales metálicos mediante tecnologías de fabricación aditiva por haz de electrones (EBM)," *Interempresas.net*, 2015. [Online]. Available: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/133694-Procesado-materiales-metalicos-mediante-tecnologias-fabricacion-aditiva-haz-electrones.html>. [Accessed: 22-Dec-2015].
- [48] ArcamAB, "EBM in Aerospace." [Online]. Available: <http://www.arcam.com/solutions/aerospace-ebm/>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [49] Multistation, "ARCAM Q20PLUS, FOR AEROSPACE COMPONENTS PRODUCTION," *Multistation.com*, 2019. [Online]. Available: <https://www.multistation.com/en/product/arcam-q20plus-for-aerospace-components-production/>. [Accessed: 27-Jan-2019].
- [50] Hurwitz J., "Trust." [Online]. Available: <http://www.jontyhurwitz.com/nano/>. [Accessed:

- 06-Aug-2017].
- [51] B. Jackson, "SLM SOLUTIONS METAL 3D PRINTING BRAKES THE MOST POWERFUL CAR IN BUGATTI HISTORY," *3D Printing Industry*, 2018. [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/slm-solutions-metal-3d-printing-brakes-powerful-car-bugatti-history-127878/>. [Accessed: 26-Jan-2019].
- [52] Z Corporation, "Z Corporation 3D Printing Technology," 2005.
- [53] K. VANHEMERT, "FOR \$300, YOU CAN BUY A STUNNING 3-D PRINTED VERSION OF YOURSELF," *WIRED*, 2013. [Online]. Available: <https://www.wired.com/2013/08/this-company-will-transform-you-into-an-incredibly-detailed-3-d-printed-figurine/>. [Accessed: 28-Jan-2019].
- [54] Alec, "HP reveals more about their Multi Jet Fusion 3D printer expected in late 2016, more models will follow," *3ders.org*, 2016. [Online]. Available: <https://www.3ders.org/articles/20160105-hp-reveals-more-multi-jet-fusion-3d-printer-expected-in-late-2016.html>. [Accessed: 28-Jan-2019].
- [55] "d-shape." [Online]. Available: <https://d-shape.com/>. [Accessed: 09-Aug-2017].
- [56] S. Smith, "Huntsman's RM Machine Ups the Ante with Speed and Accuracy," *Desktop Engineering*, 2009. [Online]. Available: <http://www.deskeng.com/de/huntsmans-rm-machine-ups-the-ante-with-speed-and-accuracy/>. [Accessed: 26-Dec-2015].
- [57] Carbon, "The perfect fit: Carbon + adidas collaborate to upend athletic footwear," *Carbon*, 2018. [Online]. Available: <https://www.carbon3d.com/stories/adidas/>. [Accessed: 28-Jan-2019].
- [58] U. Newfoundland, "Product Development/Prototyping," *Manufacturing Technology Centre*, 2018. [Online]. Available: <http://mtc.engr.mun.ca/prod.html>. [Accessed: 28-Jan-2019].
- [59] Sculpteo, "LOM (Laminated Object Manufacturing): 3D Printing with Layers of Paper," *Sculpteo*, 2018. [Online]. Available: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>. [Accessed: 28-Jan-2019].
- [60] H. MiW. and Goldschmid J., "Free-Form Spatial 3-D Printing Using Part Levitation," US 2016/0031156 A1, 2016.
- [61] "3ders." [Online]. Available: <http://www.3ders.org/articles/20160224-boeing-patents-incredible-levitating-3d-printing-process-for-aircraft-part-production.html>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [62] H. Lipson and M. Kurman, *La revolución de la impresión 3D*. Madrid, España: Multimedia, Anaya, 2014.
- [63] B. Berman, "3-D printing: The new industrial revolution," *Bus. Horiz.*, vol. 55, no. 2, pp. 155–162, 2012.
- [64] T. Koslow, "Toyota & Materialise Team to 3D Print Lightweight Car Seat," *3D Printing Industry*, 2015. [Online]. Available: <http://3dprintingindustry.com/2015/09/17/toyota-materialise-team-to-3d-print-lightweight-car-seat/>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [65] "Renishaw showcases metal AM implants to American Academy of Orthopaedic Surgeons," *METAL AM*, 2016. [Online]. Available: <https://www.metal-am.com/renishaw-showcases-metal-implants-american-academy-orthopaedic-surgeons/>. [Accessed: 26-Jan-2019].
- [66] G. Taylor, "Five unusual 3D printed gears," *Ponoko*, 2011. [Online]. Available:

- <https://www.ponoko.com/blog/ponoko/five-unusual-3d-printed-gears/>. [Accessed: 26-Jan-2019].
- [67] A. SALIM, "A new engine pylon concept Topology optimization of a large aeronautic structure," in *8th European Altair Technology Conference, Paris, 2015*, p. 23.
- [68] "ACADIA exhibits multi-material 3D-printed designs by Zaha Hadid, Francis Bitonti and more," *De zeen*, 2014. [Online]. Available: <http://www.dezeen.com/2014/10/28/acadia-annual-conference-3d-printed-designs-zaha-hadid-francis-bitonti/>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [69] O. Zoran, "Multi Material Voxel Based 3D Printing. A new horizon in composition freedom," in *IDTechEx\_Europe2016 Presentation Stratasys - multi material voxel based 3D printing*, 2016, pp. 1–45.
- [70] T. A. Campbell, S. Tibbits, and B. Garrett, "The Next Wave : 4D Printing Programming the Material World," 2014.
- [71] Virginia Tech, "Mechanical engineers develop process to 3-D print piezoelectric materials," *phys.org*, 2019. [Online]. Available: <https://phys.org/news/2019-01-mechanical-d-piezoelectric-materials.html>. [Accessed: 28-Jan-2019].
- [72] H. Cui, R. Hensleigh, D. Yao, D. Maurya, P. Kumar, M. G. Kang, S. Priya, and X. Zheng, "Three-dimensional printing of piezoelectric materials with designed anisotropy and directional response," *Nat. Mater.*, 2019.
- [73] "Arburg Freeform Multimaterial 3D Printer: Nobody Saw That Coming," *Medical Plastics News*, 2013. [Online]. Available: <http://www.medicalplasticsnews.com/opinion/arburg-freeform-3d-printer%3A-nobody-saw-that-coming/>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [74] International Engineering Fair (MSV), "For the fifth time msv became the venue for the largest czech 3D printing conference," *bvv.cz*, 2018. [Online]. Available: <https://www.bvv.cz/en/msv/news/for-the-fifth-time-msv-became-the-venue-for-the-la/>. [Accessed: 28-Jan-2019].
- [75] H. Kipphan, *Handbook of Print Media*. New York, 2001.
- [76] J. A. Nollet, "Reserches sur les causes particulieres des phenomenes electriques," *Les Freres Guerin, Paris*, 1749.
- [77] J. A. Nollet and M. Watson, "An examination of certain phenomena in electricity," *Philos. Trans.*, vol. 46, p. 368, 1749.
- [78] C. L. M. H. Navier, "Memoires sur les lois du mouvement des fluides," *Mem.Acad.Sci.Inst. Fr.*, vol. 6, pp. 389–440, 1822.
- [79] L. Euler, "Principes généraux du mouvementdes fluides," *Mem.Acad.Sci.Berlin*, vol. 11, pp. 274–315, 1755.
- [80] G. G. Stokes, "On the theories of the internal friction of fluids in motion, and of the equilibrium and motion of elastic solids," *Trans. Cambridge Philos. Soc.*, vol. IIX, p. 287, 1849.
- [81] E. Byrn, *The Progress of Invention in the Nineteenth Century*. New York, 1900.
- [82] F. Sarvart, "Mémoire sur la constitution des veines liquides lancés par des orifices circulaires en mince paroi," *Ann. Chem. Phys.*, vol. 53, pp. 337–386, 1833.
- [83] J. Plateau, "Statique expérimentale et théorique des liquids soumis aux seules forces

- moléculaires,” *Mém. Acad. Roy. Sci. Belg.*, vol. 33, 1873.
- [84] L. Rayleigh, “On the instability of jets,” *Proc. London Math. Soc.*, vol. 10, pp. 4–13, 1878.
- [85] H. P. Le, “Progress and trends in ink-jet printing technology,” *J. Imaging Sci. Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 49–62, 1998.
- [86] R. G. Sweet, “High Frequency Recording with Electrostatically Deflected Ink Jets,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 36, no. 2, p. 131, 1965.
- [87] J. H. Eaton, “Method and Apparatus for Synchronizing Droplet Formation in a Liquid Stream,” U.S. Paten 3.878.519, 1975.
- [88] W. L. Buehner, J. D. Hill, T. H. Williams, and J. W. Woods, “Application of Ink-jet technology to a word processing output printer,” *IBM J. Res. Dev.*, vol. 21.
- [89] M. Kriss, *Handbook of Digital Imaging*. John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [90] S. D. Hoath, *Fundamentals of Inkjet Printing*, Wiley-VCH. Weinheim, Germany: Wiley & Sons, 2016.
- [91] H. Wijshoff, “Structure and fluid-dynamics in piezo inkjet printheads,” 2008.
- [92] K. H. Choi, A. Khan, K. Rahman, Y. H. Doh, D. S. Kim, and K. R. Kwan, “Effects of nozzles array configuration on cross-talk in multi-nozzle electrohydrodynamic inkjet printing head,” *J. Electrostat.*, vol. 69, no. 4, pp. 380–387, 2011.
- [93] S. Zoltan, “Pulse droplet ejecting system,” U.S Patent 3.683.212, 1972.
- [94] N. Gustaf and E. Stemme, “Arrangement of writing mechanisms for writing on paper with a colored liquid,” U.S. Patent 3.747.120, 1973.
- [95] E. L. Kyser and S. B. Sears, “Method and apparatus for recording with writing fluids and drop projection means therefor,” U.S. Patent 3.946.398, 1976.
- [96] K. H. Fischbeck and A. T. Wright, “Shear mode transducer for drop-on-demand liquid ejector,” U.S. Patent 4.584.590, 1986.
- [97] H. Wijshoff, “The dynamics of the piezo inkjet printhead operation,” *Phys. Rep.*, vol. 491, no. 4–5, pp. 77–177, 2010.
- [98] C. M. A. Wiebe, “An array of digital possibilities,” *Graphic Arts Magazine*, p. 62, 2007.
- [99] X. Plc, “Xaar plc Annual Report and Accounts,” 2014.
- [100] C. Chen, “Inkjet Printing of Microcomponents: Theory, Design, Characteristics and Applications,” *Featur. Liq. Cryst. Disp. Mater. Process.*, pp. 43–60, 1998.
- [101] J. F. Dijkstra, P. C. Duineveld, M. J. J. Hack, A. Pierik, J. Rensen, J.-E. Rubingh, I. Schram, and M. M. Vernhout, “Precision ink jet printing of polymer light emitting displays,” *J. Mater. Chem.*, vol. 17, no. 6, pp. 511–522, 2007.
- [102] D. Stüwe, D. Mager, D. Biro, and J. G. Korvink, “Inkjet technology for crystalline silicon photovoltaics,” *Adv. Mater.*, vol. 27, no. 4, pp. 599–626, 2015.
- [103] V. Correia, C. Caparros, C. Casellas, L. Francesch, J. G. Rocha, and S. Lanceros-Mendez, “Development of inkjet printed strain sensors,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 10, p. 105028, 2013.
- [104] A. Haldar, K. S. Liao, and S. A. Curran, “Fabrication of inkjet printed organic photovoltaics on flexible Ag electrode with additives,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 125, pp. 283–290, 2014.

- [105] Y. Kawahara, S. Hodges, B. S. Cook, C. Zhang, and G. D. Abowd, "Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices," *Proc. 2013 ACM Int. Jt. Conf. Pervasive Ubiquitous Comput. (UbiComp '13)*, pp. 363–372, 2013.
- [106] G. Cummins, R. Kay, J. Terry, M. P. Y. Desmulliez, and A. J. Walton, "Optimization and characterization of drop-on-demand inkjet printing process for platinum organometallic inks," *Electron. Packag. Technol. Conf.*, pp. 256–261, 2011.
- [107] P. W. Cooley, D. Silva, and D. B. Wallace, "APPLICATIONS OF INKJET TECHNOLOGY FOR TISSUE ENGINEERING AND REGENERATIVE MEDICINE." pp. 566–571, 2012.
- [108] T. Boland, T. Xu, B. Damon, and X. Cui, "Application of inkjet printing to tissue engineering," *Biotechnol. J.*, vol. 1, no. 9, pp. 910–917, 2006.
- [109] A. Bietsch, J. Zhang, M. Hegner, H. P. Lang, and C. Gerber, "Rapid functionalization of cantilever array sensors by inkjet printing," *Nanotechnology*, vol. 15, no. 8, pp. 873–880, 2004.
- [110] G. Wassink, "Inkjet printhead performance enhancement by feedforward input design based on two-port modeling," 2007.
- [111] W. R. Cox, T. Chen, and D. J. Hayes, "Micro-Optics Fabrication by Ink-Jet Printers," *Opt. Photonics News*, vol. 12, no. 6, p. 32, 2001.
- [112] Y. He, C. J. Tuck, E. Prina, S. Kilsby, S. D. R. Christie, S. Edmondson, R. J. M. Hague, F. R. A. J. Rose, and R. D. Wildman, "A new photocrosslinkable polycaprolactone-based ink for three-dimensional inkjet printing," *J. Biomed. Mater. Res. - Part B Appl. Biomater.*, pp. 1–13, 2016.
- [113] Hewlett-Packard, "HP Multi Jet Fusion TM technology." .
- [114] Z Corporation, "Z Corporation 3D Printing Technology." pp. 1–7, 2005.
- [115] V. Cahill, "Inkjet Printhead Characteristics and Application Requirements." 2017.
- [116] I. T. Strategies, "Inkjet Technology and Fujifilm: The Next Chapter in Commercial Printing Technology Ink jet," 2012.
- [117] "Choisir la résolution (dpi) d'impression d'une photo," *La photo en faits*, 2013. [Online]. Available: <http://www.la-photo-en-faits.com/2013/03/tirage-resolution-dpi-impression.html>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [118] "How it works ...," *Edf System Integration*. [Online]. Available: <http://edfsystem.com/technology>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [119] "CIJ," *LINX*. [Online]. Available: <http://www.linxglobal.com/en/technology-guide/cij>. [Accessed: 23-Dec-2015].
- [120] Annimo, "Reproducción del color," 2007. [Online]. Available: [www.aloj.us.es](http://www.aloj.us.es). [Accessed: 12-Dec-2016].
- [121] I. McLoughlin, "Computer Peripherals," 2011. [Online]. Available: <http://www.lintech.org/comp-per/15INK.pdf>. [Accessed: 12-Jun-2017].
- [122] R. Suardi, "INTRODUCCIÓN A LA ESTAMPACIÓN DIGITAL," *apttperu*, 2016. [Online]. Available: <https://apttperu.com/introduccion-a-la-estampacion-digital/>. [Accessed: 04-Oct-2017].
- [123] J.-M. Moreau, H. Feistenauer, Hung Viet Ngo, and S. Patrick, "PRINT HEAD PRE-

- ALIGNMENT SYSTEMS AND METHODS,” U.S Patent 8.851.616 B2, 2014.
- [124] Bilderzucht, “3D Pixel / Voxel,” 2010. [Online]. Available: <http://www.bilderzucht.de/blog/3d-pixel-voxel/>. [Accessed: 20-Dec-2016].
- [125] M. Kaku, *La física del futuro*, Segunda ed. Barcelona: Debolsillo, 2013.
- [126] J. Sherwood Page, “Material Dispensing System,” US Patent 20150093465 A1, 2014.
- [127] Mosaic, “Simple, Multi-material Printing, 3D,” *Mosaic*, 2019. [Online]. Available: <https://www.mosaicmfg.com/>. [Accessed: 04-Feb-2019].
- [128] R. Wicker, F. Medina, and C. Elkins, “Multiple material micro-fabrication: extending stereolithography to tissue engineering and other novel applications,” *Proc. 15th ...*, pp. 754–764, 2004.
- [129] J. W. Choi, H. C. Kim, and R. Wicker, “Multi-material stereolithography,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 3, pp. 318–328, 2011.
- [130] R. Holtrup, “Xzeed DLP,” University of twente, 2015.
- [131] C. Zhou, Y. Chen, Z. Yang, and B. Khoshnevis, “Development of a Multi-material Mask-Image-Projection-based Stereolithography for the Fabrication of Digital Materials,” *Annu. Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 65–80, 2011.
- [132] B. Russell, “3D printer that can generate REAL chocolate...and here is how it works,” *Jan 8*, 2018. [Online]. Available: <https://www.express.co.uk/news/uk/452701/3D-printer-that-can-generate-REAL-chocolate-and-here-is-how-it-works>. [Accessed: 25-Sep-2018].
- [133] J. Hornick, “HP MULTI JET FUSION: AN IP PERSPECTIVE,” *3dprintingindustry*, 2016. [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/hp-multi-jet-fusion-ip-36247/>. [Accessed: 31-Aug-2016].
- [134] J. Chang, X. Zhang, T. Ge, and J. Zhou, “Fully printed electronics on flexible substrates : High gain amplifiers and DAC,” *Org. Electron.*, vol. 15, no. 3, pp. 701–710, 2014.
- [135] E. MacDonald, R. Salas, D. Espalin, M. Perez, E. Aguilera, D. Muse, and R. B. Wicker, “3D printing for the rapid prototyping of structural electronics,” *IEEE Access*, vol. 2, pp. 234–242, 2014.
- [136] D. Espalin, D. W. Muse, E. MacDonald, and R. B. Wicker, “3D Printing multifunctionality: Structures with electronics,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 72, no. 5–8, pp. 963–978, 2014.
- [137] A. J. Lopes, E. MacDonald, and R. B. Wicker, “Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 129–143, 2012.
- [138] A. Steeman, “Electroluminescent Technology and its Eye-Catching Potential,” *Packaging Digest*, 2009. [Online]. Available: <http://www.packagingdigest.com/electroluminescent-technology-and-its-eye-catching-potential>. [Accessed: 12-Aug-2017].
- [139] M. Tomaszkiwicz, “Inny „tatuaz” każdego dnia dzięki naklejanemu wyświetlaczowi,” *Antyradio*, 2016. [Online]. Available: <http://www.antyradio.pl/Technologia/Duperele/Inny-tatuaz-kazdego-dnia-dzieki-naklejanemu-wyswietlaczowi-7971>. [Accessed: 12-Aug-2017].

- [140] D. Kamps, “¿Cómo funciona la tinta electrónica?,” *Blogkindle*. [Online]. Available: <https://www.actualidadkd.com/como-funciona-la-tinta-electronica/>. [Accessed: 13-Aug-2017].
- [141] K. Suzuki, K. Yutani, M. Nakashima, A. Onodera, S. Mizukami, M. Kato, and T. Tano, “A 200 ppi All-printed Organic TFT Backplane for Flexible Electrophoretic Displays,” *Adv. Funct. Mater.*, 2009.
- [142] D. Sanz, “Paneles solares de plástico, flexibles y reciclables,” *Energías renovadas*, 2012. [Online]. Available: <https://energiasrenovadas.com/paneles-solares-de-plastico-flexibles-y-reciclables/>. [Accessed: 13-Aug-2017].
- [143] W. Williams, “Printed Organic Solar Cells and LED,” *Herox*, 2015. [Online]. Available: <https://herox.com/crowdsourcing-news/282-printed-organic-solar-cells-and-led>. [Accessed: 13-Aug-2017].
- [144] “Decorative and flexible solar panels become part of interior design and the appearance of objects,” *Phys.org*, 2015. [Online]. Available: <https://phys.org/news/2015-01-flexible-solar-panels-interior.html>. [Accessed: 13-Aug-2017].
- [145] “La tecnología en la Cocina del siglo XXI,” *CodeBox.es*, 2015. [Online]. Available: <http://www.codebox.es/la-tecnologia-en-la-cocina-del-siglo-xxi/>. [Accessed: 27-Aug-2017].
- [146] R. Geeks, “Aplican Internet de las cosas a 3 objetos de uso común,” *Geeks*, 2016. [Online]. Available: <http://geeks.e-consulta.com/internet/3-objetos-del-internet-de-las-cosas/>.
- [147] Nanalzyle, “Printing Green Batteries with Enfucell,” *Nanalzyle*, 2014. [Online]. Available: <http://www.nanalyze.com/2014/05/printing-green-batteries-with-enfucell/>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [148] “Enfucell SoftBattery,” *Enfucell*. [Online]. Available: <https://www.enfucell.com/softbattery>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [149] “Printed Electronics,” *QUAD industries*, 2017. [Online]. Available: <http://www.quad-ind.com/printed-electronics/>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [150] S.-Y. Wu, C. Yang, W. Hsu, and L. Lin, “3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors,” *Microsystems Nanoeng.*, vol. 1, no. April, p. 15013, 2015.
- [151] R. Suba, “Smart diaper with flexible sensor invented in Japan: Say buh-bye to diaper rash,” *Tech Times*, 2014. [Online]. Available: <http://www.techtimes.com/articles/3324/20140211/smart-diaper-with-flexible-sensor-invented-in-japan-say-buh-bye-to-diaper-rash.htm>. [Accessed: 14-Aug-2017].
- [152] E. Martínez, “Un termómetro adhesivo para bebés,” *El diario Vasco*, Madrid, España, 08-Jan-2015.
- [153] E. Rivero, “Tatuaje temporal para monitorear los niveles de glucosa,” *Unocero*, 2015. [Online]. Available: <https://www.unocero.com/noticias/ciencia/salud/tatuaje-temporal-para-monitorear-los-niveles-de-glucosa/>. [Accessed: 14-Aug-2017].
- [154] A. Guitarte, “Epilepsia monitorizada, el próximo hito de los wearables,” *Somos medicina*. [Online]. Available: <http://www.somosmedicina.com/2015/12/epilepsia-monitorizada-el-proximo-hito.html>. [Accessed: 15-Aug-2017].



- [155] S. Otero, "Introducción a la impresión funcional y electrónica impresa." 2016.
- [156] Tactotek, "Injection Molded Structural Electronics," *Tactotek*, 2017. [Online]. Available: <http://www.tactotek.com/use-cases/>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [157] C. Davies, "2018 Range Rover Velar First Drive: The Midsize SUV to beat," *Slash gear*, 2017. [Online]. Available: <https://www.slashgear.com/2018-range-rover-velar-first-drive-the-midsize-suv-to-beat-01493447/>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [158] V. Kantola, J. Kulovesi, L. Lahti, R. Lin, M. Zavodchikova, and E. Coatanéa, *Bit Bang – rays to the future*. Helsinki, Finland: Aalto University School of science and technology, 2009.
- [159] "The Ripple Effect," *coffeeripples*, 2017. [Online]. Available: <http://www.coffeeripples.com/>. [Accessed: 16-Aug-2017].
- [160] ESPOCKET, "O'2 NAILS." [Online]. Available: <http://www.o2nails.es/v11-nail-printer-unas-decoradas-impresas>. [Accessed: 16-Aug-2017].
- [161] "Bioprinting," *Explaining the future.com*. .
- [162] Simon, "BASF and Poietis enter R&D agreement for 3D bioprinting and skin care," *www.3ders.org*, 2015. .
- [163] C. Shengyong, C. Chee Kai, and X. Juntong, "A Novel Bone Scaffold Design Approach Based on Shape Function and All-Hexahedral Mesh Refinement," *Comput. Tissue Eng.*, vol. 868, pp. 45–55, 2012.
- [164] G. White, "Biological 3D printer achieves breakthrough in printing human body parts for surgical attachment," <http://glitch.news>, 2016. .
- [165] L. Xu, S. R. Gutbrod, A. P. Bonifas, Y. Su, M. S. Sulkin, N. Lu, H. Chung, K. Jang, Z. Liu, M. Ying, C. Lu, R. C. Webb, J. Kim, J. I. Laughner, H. Cheng, Y. Liu, A. Ameen, J. Jeong, G. Kim, Y. Huang, I. R. Efimov, and J. A. Rogers, "3D multifunctional integumentary membranes for spatiotemporal cardiac measurements and stimulation across the entire epicardium," *Nat. Commun.*, vol. 5, pp. 1–10, 2014.
- [166] J. Izdebska and S. Thomas, *Printing on Polymers: Fundamentals and Applications*, 1st Editio. 2015.
- [167] L. R. Garrido, "Control de parámetros de impresión Introducción a las tecnologías de impresión," Valencia, Spain, 2016.
- [168] I. M. Hutchings and G. D. Martin, *Inkjet Technology for digital fabrication*, First Edit. 2012.
- [169] F. M. White, *Mecánica de Fluidos*, 5th ed. Madrid, España, 2004.
- [170] L. Rayleigh, "On the capillary phenomena of jets," *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, vol. 29, pp. 71–79, 1879.
- [171] J. Eggers, "Theory of drop formation," *Phys. Fluids*, vol. 7, no. 5, p. 941, 1995.
- [172] C. Weber, "Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles," *Z. Angew. Math. Mech.*, vol. 11, pp. 136–154, 1931.
- [173] L. G. Chaudhary, K. C. Redekopp, "The non-linear capillary instability of a liquid jet, Part 1: Theory," *J. Fluid Mech*, vol. 96, pp. 257–274, 1980.
- [174] S. Grossmann and A. Muller, "Instabilities and decay rates of charged viscous liquid jets," *Z. Phys. B Condens. Matter*, vol. 57, pp. 161–173, 1984.

- [175] J. Eggers, "Theory of drop formation," *Phys. Fluids*, vol. 7, pp. 941–953, 1994.
- [176] J. Eggers, "Nonlinear dynamics and breakup of free-surface flows," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 69, no. 3, pp. 865–930, 1997.
- [177] S. E. Bechtel, M. G. Forest, and K. J. Lin, "Closure to all orders in 1-D models for slender viscoelastic free jets: An integrated theory for axisymmetric, torsionless flows," *Stab. Appl. Anal. Contin. Media*, vol. 2, pp. 59–100, 1992.
- [178] J. Eggers and T. F. Dupont, "Drop Formation in a One-Dimensional Approximation of the Navier-Stokes Equation," vol. 262, pp. 205–221, 1994.
- [179] V. Grubelnik and M. Marhl, "Drop formation in a falling stream of liquid," *Am. J. Phys.*, vol. 73, no. 5, p. 415, 2005.
- [180] T. Tate, "On the magnitude of a drop of liquid formed under different circumstances," *Philos. Mag.*, vol. 27, no. 181, pp. 176–180, 1864.
- [181] W. D. Harkins and F. E. Brown, "The determination of surface tension (free surface energy), and the weight of falling drops: The surface tension of water and benzene by the capillary height method," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 41, no. 4, pp. 499–524, 1919.
- [182] O. Breslouer, "Rayleigh-Plateau Instability: Falling Jet Analysis and Applications," *Anal. Appl.*, pp. 1–22, 2010.
- [183] J. Eggers and E. Villermaux, "Physics of liquid jets," *Reports Prog. Phys.*, vol. 71, pp. 1–79, 2008.
- [184] L. Rayleigh, "Some applications of photography," *Nat.*, vol. 44, pp. 249–254, 1891.
- [185] M. Blazincic, "Physics of Ink-jet Printing," *Dept. Appl. Math., Univ. Birmingham Kodak Eur. Res.*, no. June 2008, pp. 1–10, 2008.
- [186] O. Breslouer, "Rayleigh-Plateau Instability: Falling Jet Analysis and Applications," *Anal. Appl.*, pp. 1–22, 2010.
- [187] T. CHEN and X. LI, "Liquid jet atomization in a compressible gas stream," *J. Propuls. Power*, vol. 15, no. 3, p. 369–376., 1999.
- [188] J. W. M. Bush, "Fluid Jets," *MIT OpenCourseWare*, 2010. .
- [189] I. de F. de la F. de Ingeniería, "Una Aplicacion Acustica De Las Funciones De Bessel De Orden Entero Y De Primera Especie," Montevideo (Uruguay), 2011.
- [190] S. W. J. Smith and H. Moss, "No Title," *Proc. Roy. Soc.*, vol. 93, no. A, p. 373, 1917.
- [191] Stanley Middleman, "Modeling Axisymmetric Flows: Dynamics of Films, Jets and Drops." Academic Press, Inc., 1995.
- [192] N. Ashgriz, "Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications," vol. XXXIII, no. 2. New York, 2011.
- [193] S. TOMOTIKA, "On the Instability of a Cylindrical Thread of a Viscous Liquid Surrounded by Another Viscous Fluid," *Proc. Roy. Soc. A*, vol. 150, pp. 322–337, 1935.
- [194] P. H. Schweitzer, "Mechanism of disintegration of liquid jets," *J. Appl. Phys.*, vol. 8, no. 8, pp. 513–521, 1937.
- [195] W. E. Ranz, "Some experiments on orifice Sprays," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 36, pp. 175–181, 1958.
- [196] R. P. Grant and S. Middleman, "Newtonian jet stability," *AIChE*, vol. 12, pp. 699–78,

- 1966.
- [197] R. W. Fenn and S. Middleman, "Newtonian jet stability: The role of air resistance," *AIChE J.*, vol. 15, no. 3, pp. 379–383, 1969.
- [198] R. D. Reitz and F. V. Bracco, "Mechanisms of breakup of round liquid jets," *Encycl. Fluid Mech.*, no. May, pp. 233–249, 1986.
- [199] A. H. Lefebvre, "Atomization and sprays." Hemisphere, New York, 1989.
- [200] R. J. Donnelly and G. W., "Experiments on the capillary instability of a jet," *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 209, pp. 547–556, 1966.
- [201] D. P. Wang, "Finite amplitude effect on the stability of a jet of circular cross section," *J. Fluid Mech.*, vol. 34, no. 02, pp. 299–313, 1968.
- [202] M. C. Yuen, "Non-linear capillary instability of a liquid jet," *J. Fluid Mech.*, vol. 33, no. 01, pp. 151–163, 1968.
- [203] M. Tjahjadi, H. a. Stone, and J. M. Ottino, "Satellite and subsatellite formation in capillary breakup," *J. Fluid Mech.*, vol. 243, no. 1, p. 297, 1992.
- [204] G. I. Taylor, "Generation of ripples by wind blowing over viscous fluids," *Sci. Pap. G.I. Taylor, ed. GK Batchelor (ed.)*, vol. 3, p. 244–254, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1961.
- [205] W. A. Sirignano, "Fluid dynamics of sprays," *J. Fluid Eng.*, vol. 115, pp. 345–78, 1993.
- [206] S. P. Lin and R. D. Reitz, "Dropt and Spray Formation from a Liquid Jet," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 30, no. 1, pp. 85–105, 1998.
- [207] M. McCarthy and N. Molloy, "Review of Stability of Liquid Jets and the Influence of Nozzle Design," *Chem. Eng. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–20, 1974.
- [208] R. D. Reitz, "Atomization and other breakup regimes of a liquid jet," PhD Thesis, Princeton University, Princeton NJ, 1978.
- [209] C. Dumouchel, "On the experimental investigation on primary atomization of liquid streams," *Exp. Fluids*, vol. 45, no. 3, pp. 371–422, 2008.
- [210] W. Ohnesorge, "Formation of drops by nozzles and breakup of liquid jets," *Z. Angew. Math. Mech.*, vol. 16, pp. 355–358, 1936.
- [211] S. Shimasaki and S. Taniguchi, "Formation of Uniformly-Sized Droplets From Capillary Jet By Electromagnetic Force," in *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, 2009, no. December, pp. 1–6.
- [212] H. González García, "Control de líquidos mediante fuerzas eléctricas y magnéticas en superficies," Sevilla, 2011.
- [213] E. (Digital part Materialization), "What is Binder Jetting?" [Online]. Available: <http://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-Is-Binder-Jetting>. [Accessed: 06-Feb-2017].
- [214] C. Clanet and J. C. Lasheras, "Transition from dripping to jetting," *J. Fluid Mech.*, vol. 383, pp. 307–326, 1999.
- [215] C. Clasen, J. Bico, V. Entov, and H. G. McKinley, "Gobbling Drops: The Jetting / Dripping Transition in Flows of Polymeric Liquids," pp. 1–24, 2008.
- [216] P. Martien, S. C. Pope, P. L. Scott, and R. S. Shaw, "The chaotic behaviour of the leaky faucet," *Phys. Lett. A*, vol. 110, no. 7–8, pp. 399–404, 1985.

- [217] A. D’Innocenzo and L. Renna, “Dripping faucet,” *Int. J. Theor. Phys.*, vol. 35, no. 5, pp. 941–973, 1996.
- [218] H. Helmholtz, “On the Sensations of Tone,” *Longmans, Green, Co.*, pp. 43, 372–374, 1885.
- [219] J. De Jong, M. Versluis, G. De Bruin, D. Lohse, H. Reinten, M. Van Den Berg, H. Wijshoff, and N. De Jong, “Acoustical and optical characterization of air entrapment in piezo-driven inkjet printheads,” *Proc. - IEEE Ultrason. Symp.*, vol. 2, no. c, pp. 1270–1271, 2005.
- [220] J. de Jong, R. Jeurissen, H. Borel, M. van den Berg, H. Wijshoff, H. Reinten, M. Versluis, A. Prosperetti, and D. Lohse, “Entrapped air bubbles in piezo-driven inkjet printing: Their effect on the droplet velocity,” *Phys. Fluids*, vol. 18, no. 12, pp. 1–7, 2006.
- [221] J. E. Fromm, “Numerical Calculation of the Fluid Dynamics of Drop-on-Demand Jets,” *IBM J. Res. Dev.*, vol. 28, no. 3, pp. 322–333, 1984.
- [222] J. F. Dijksman, “Hydrodynamics of small tubular pumps,” *J. Fluid Mech.*, vol. 139, pp. 173–191, 1984.
- [223] R. B. Bird, R. C. Armstrong, and O. Hassager, *Dynamics of Polymeric Liquids Fluid Mechanics*, 2nd edn. Vol.1, Chichester, 1987.
- [224] J. F. Dijksman, “Hydro-Acoustics of Piezoelectrically Driven Ink- Jet Print Heads,” *Flow Turbul. Combust.*, no. 61, pp. 211–237, 1998.
- [225] J. T. Thomson, *Theory of Vibration with Applications*. George Allen & Unwin , London, 1981.
- [226] J. F. Dijksman, “Hydro-Acoustics of Piezoelectrically Driven Ink- Jet Print Heads,” *Flow Turbul. Combust.*, no. 61, pp. 211–237, 1999.
- [227] Fujifilm Dimatix Inc., “Fujifilm Dimatix Materials Printer DMP-2800 Series User Manual.” 2010.
- [228] Fujifilm Dimatix Inc., “Jettable Fluid Formulation Guidelines,” 2013.
- [229] A. Bibl, J. A. Higginson, K. Von Essen, and A. Xu, “SINGLE-USE DROPLET EJECTION MODULE,” US7631962B2, 2009.
- [230] I. Apex Microtechnology, “Driving Piezoelectric Actuators,” vol. 2012. pp. 1–13, 2012.
- [231] S. W. Gotmare, “Thermal degradation and aging of high temperature piezoelectric ceramics,” 2008.
- [232] E. L. Kyser and S. B. Sears, “Method and apparatus for recording with writing fluids and drop projection means therefor,” 1976.
- [233] E. Stemme and G. Stemme, “A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump,” *Sensors Actuators A. Phys.*, vol. 39, no. 2, pp. 159–167, 1993.
- [234] Y. Uetsuji, T. Hiramori, N. Nishiguchi, H. Kuramae, and K. Tsuchiya, “PERFORMANCE ENHANCEMENT OF A VALVELESS PUMP DRIVEN BY A NOBLE PIEZOELECTRIC COMPOSITE ACTUATOR,” *Int. J. Comput. Methods Exp. Meas.*, vol. 2, no. 4, pp. 392–402, 2014.
- [235] Wikipedia, “Cerámica piezoeléctrica.” [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Cerámica\\_piezoeléctrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Cerámica_piezoeléctrica). [Accessed: 20-May-2018].

- [236] Morgan Advanced Materials, "Piezoelectric Ceramics Electro Ceramic Solutions," *Technical Ceramics*. 2013.
- [237] Morgan Advanced Materials, "Piezoelectric Ceramics Electro Ceramic Solutions," *Technical Ceramics*. 2013.
- [238] CeramTec., "Hochleistungskeramik in der Piezotechnik." .
- [239] A. Cardona and N. Nigro, "Accionamiento mediante actuadores piezoeléctricos de alas flexibles para micro-vehículos aéreos súper maniobrables inspirados en la biología," *Mecánica ...*, vol. XXV, no. January, pp. 2359–2381, 2006.
- [240] S. W. Gotmare, "THERMAL DEGRADATION AND AGING OF HIGH TEMPERATURE PIEZOELECTRIC," 2008.
- [241] D. de física aplicada. UPV, "Influencia de la temperatura en los efectos ferroeléctrico y piezoeléctrico." .
- [242] T. Roopinder, "XJet Gets Funded to 3D Print Most Accurate Metal Parts to Date," *engineering.com*, 2016. [Online]. Available: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/11702/XJet-Gets-Funded-to-3D-Print-Most-Accurate-Metal-Parts-to-Date.aspx>. [Accessed: 09-Jan-2018].
- [243] A. Bibl, Z. Chen, and J. Birkmeyer, "PRINT HEAD WITH THIN MEMBRANE," 2008.
- [244] Z. Chen, J. Birkmeyer, and A. Bibl, "POLISHING PIEZOELECTRIC MATERIAL," vol. 1, no. 19, 2008.
- [245] T. C. Manjunath and B. Bandyopadhyay, "SMART CONTROL OF CANTILEVER STRUCTURES USING OUTPUT FEEDBACK," *Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 51–68, 2006.
- [246] H. Seitz and J. Heinz, "Modelling of a microfluidic device with piezoelectric actuators," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 14, no. 8, pp. 1140–1147, 2004.
- [247] C. D. Stow and M. G. Hadfield, "An Experimental Investigation of Fluid Flow Resulting from the Impact of a Water Drop with an Unyielding Dry Surface," *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 373, no. 1755, pp. 419–441, 1981.
- [248] R. B. Brown and M. M. Sidahmed, "Simulation of spray dispersal and deposition from a forestry airblast sprayer," *Trans. ASAE.*, vol. 44, no. 1, pp. 11–17, 2001.
- [249] M. M. Mohebi and J. R. G. Evans, "The trajectory of ink-jet droplets: Modelling and experiment," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 60, no. 13, pp. 3469–3476, 2005.
- [250] G. G. Stokes, "On the effect of the internal friction of fluids on the motion pendulum.," *Trans. Cambridge Philos. Soc.*, vol. 9, no. 8, 1851.
- [251] M. Mott, J. H. Song, and J. R. . Evans, "Microengineering of ceramics by direct ink-jet printing," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 82, no. 7, pp. 1653–1658, 1999.
- [252] A. J. Reynolds, *Turbulent Flows in Engineering*. London: Wiley, 1974.
- [253] J. M. Coulson, J. F. Richardson, J. H. Harker, and J. . Backhurst, *Chemical Engineering Volume 2: Particle Technology and Separation Processes*, vol. 2, no. August. 1991.
- [254] F. M. White, *Mecánica de Fluidos*, Quinta edi. Madrid, España, 2004.
- [255] J. M. DALLAVALLE, *Micromeritics*, 2nd edn. 1948.

- [256] L. SCHILLER and A. NAUMANN, "Über die grundlegenden Berechnungen der Schwerkraftaufbereitung," *Z. Ver. deut. Ing.*, vol. 77, p. 318, 1933.
- [257] F. J. M. Ruiz-Cabello, "Efecto de la rugosidad y heterogeneidad superficial en fenómenos de mojado," Universidad de Granada, 2009.
- [258] P. G. DeGennes, F. Brochard-Wyart, and D. Quéré, "Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves." Springer, New York, p. 303, 2004.
- [259] T. Young, "An Essay on the Cohesion of Fluids," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, vol. 95, pp. 65–87, 1805.
- [260] P. S. Laplace, "Supplément a la théorie de l'action capillaire," *Trait. la Mécanique Céleste*, pp. 419–498, 1806.
- [261] M. A. Rodríguez-Valverde and M. Tirado-Miranda, "Doscientos años de meniscos líquidos," *Rev. española física*, vol. 20, no. 3, pp. 51–56, 2006.
- [262] A. Marmur, "Soft contact: measurement and interpretation of contact angles," *Soft Matter*, vol. 2, no. 1, p. 12, 2006.
- [263] J. W. Gibbs, *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs*. New York: Dover Publications Inc., 1961.
- [264] A. Marmur, "Line Tension and the Intrinsic Contact Angle in Solid – Liquid – Fluid Systems," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 466, no. 186, pp. 462–466, 1997.
- [265] R. Shuttleworth, "THE SPREADING OF A LIQUID OVER A ROUGH SOLID," *Discuss. Faraday Soc.*, vol. 3, pp. 16–22, 1948.
- [266] W. Laws, P. S. Swain, and R. Lipowsky, "Contact Angles on Heterogeneous Surfaces: A New Look at," *Langmuir*, vol. 14, no. 10, pp. 6772–6780, 1998.
- [267] C. W. Extrand, "Model for Contact Angles and Hysteresis on Rough and Ultraphobic Surfaces," *Langmuir*, vol. 18, no. 23, pp. 7991–7999, 2002.
- [268] F. J. M. Ruiz-cabello, H. Kusumaatmaja, M. A. Rodri, J. Yeomans, and M. A. Cabrerizo-vi, "Modeling the Corrugation of the Three-Phase Contact Line Perpendicular to a Chemically Striped Substrate," *Langmuir Press*, vol. 25, no. 9, pp. 8357–8361, 2009.
- [269] D. Li and F. . Y. H. Lin, "Effect of Corrugations of the Three-Phase Line on the Drop Size Dependence of Contact Angles," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 142, no. 1, pp. 224–231, 1991.
- [270] M. Iwamatsu, "Contact angle hysteresis of cylindrical drops on chemically heterogeneous striped surfaces," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 297, pp. 772–777, 2006.
- [271] S. Iliev and N. Pesheva, "Nonaxisymmetric drop shape analysis and its application for determination of the local contact angles," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 301, pp. 677–684, 2006.
- [272] E. Pierce, F. J. Carmona, and A. Amirfazli, "Understanding of sliding and contact angle results in tilted plate experiments," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 323, no. 1–3, pp. 73–82, 2008.
- [273] R. E. Johnson and R. H. Dettre, "Contact Angle Hysteresis. III. Study of an Idealized Heterogeneous Surface," *J. Phys. Chem.*, vol. 68, no. 7, pp. 1744–1750, 1964.
- [274] C. Huh and S. G. Mason, "Effects of surface roughness on wetting (theoretical)," *J.*

- Colloid Interface Sci.*, vol. 60, no. 1, pp. 11–38, 1977.
- [275] C. W. Extrand and Y. Kumagai, “An Experimental Study of Contact Angle Hysteresis,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 191, no. 2, pp. 378–383, 1997.
- [276] R. N. Wenzel, “Resistance of solid surfaces to wetting by water.,” *J. Ind. Eng. Chem. (Washington, D. C.)*, vol. 28, pp. 988–994, 1936.
- [277] A. Marmur, “From hydrophilic to superhydrophobic: Theoretical conditions for making high-contact-angle surfaces from low-contact-angle materials,” *Langmuir*, vol. 24, no. 14, pp. 7573–7579, 2008.
- [278] D. Quéré and M. Reyssat, “Non-adhesive lotus and other hydrophobic materials,” *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 366, no. 1870, pp. 1539–1556, 2008.
- [279] C. W. Extrand, “Contact Angles and Hysteresis on Surfaces with Chemically Heterogeneous Islands,” *Langmuir*, vol. 19, pp. 3793–3796, 2003.
- [280] L. Gao and T. J. McCarthy, “How Wenzel and Cassie were wrong?,” *Langmuir*, vol. 23, no. 7, pp. 3762–3765, 2007.
- [281] L. Gao and T. J. McCarthy, “An attempt to correct the faulty intuition perpetuated by the wenzel and cassie ‘laws,’” *Langmuir*, vol. 25, no. 13, pp. 7249–7255, 2009.
- [282] A. Marmur and E. Bittoun, “When wenzel and cassie are right: Reconciling local and global considerations,” *Langmuir*, vol. 25, no. 3, pp. 1277–1281, 2009.
- [283] A. Marmur, “The lotus effect: Superhydrophobicity and metastability,” *Langmuir*, vol. 20, no. 9, pp. 3517–3519, 2004.
- [284] Attension, “Influence of surface roughness on contact angle and wettability,” *Theory Note 7*, pp. 1–3, 2015.
- [285] B. Derby and N. Reis, “Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions,” *MRS Bull.*, vol. 28, no. 11, pp. 815–818, 2003.
- [286] L. Bergström, “Rheological properties of concentrated, non-aqueous silicon nitride suspensions,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 79, no. 12, pp. 3033–40, 1996.
- [287] B. H. Kaye, *Powder Mixing*. London: Chapman & Hall, 1997.
- [288] N. Reis and B. Derby, “Ink jet deposition of ceramic suspensions: modelling and experiments of droplet formation,” in *MRS Symp*, 2000, vol. 624, pp. 65–70.
- [289] P. C. Duineveld, M. M. de Kok, M. Buechel, A. Sempel, K. A. H. Mutsaers, P. van de Weijer, I. G. J. Camps, T. van de Biggelaar, J.-E. J. M. Rubingh, and E. I. Haskal, “Ink-jet printing of polymer light-emitting devices,” *Int. Soc. Opt. Eng.*, vol. 4464, pp. 59–67, 2002.
- [290] B. Derby, “Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution,” *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 395–414, 2010.
- [291] C. Mundo, M. Sommerfeld, and C. Tropea, “Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 21, no. 2, pp. 151–173, 1995.
- [292] K. Seerden, N. Reis, J. Evans, P. Grant, J. Halloran, and B. Derby, “Ink-jet printing of wax-based alumina suspensions,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 84, no. 11, pp. 2514–2520, 2001.

- [293] R. Bhole and S. Chandra, "Parameters controlling solidification of molten wax droplets falling on a solid surface," *J. Mater. Sci.*, vol. 34, no. 19, pp. 4883–4894, 1999.
- [294] S. Schiaffino and A. Sonin, "Molten droplet deposition and solidification at low Weber numbers," *Phys. Fluids*, vol. 9, no. 11, pp. 3172–3187, 1997.
- [295] S. Schiaffino and A. a. Sonin, "Formation and stability of liquid and molten beads on a solid surface," *J. Fluid Mech.*, vol. 343, pp. 95–110, 1997.
- [296] D. B. van Dam and C. Le Clerc, "Experimental study of the impact of an ink-jet printed droplet on a solid substrate," *Phys. Fluids*, vol. 16, no. 9, pp. 3403–3414, 2004.
- [297] A. L. Yarin, "DROP IMPACT DYNAMICS: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing...", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 38, no. 1, pp. 159–192, 2006.
- [298] M. Rein, S. Q. Armster, J. P. Delplanque, and E. J. Lavernia, "Thermo-fluid mechanisms controlling droplet based materials processes," *Int. Mater. Rev.*, vol. 47, no. 6, pp. 265–301, 2002.
- [299] J. Madejski, "Droplets on impact with a solid-surface," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 26, pp. 1095–1098, 1983.
- [300] S. Chandra and C. T. Avedisian, "On the collision of a droplet with a solid Surface," *Proc. R. Soc. London*, vol. 432, no. Series A, pp. 13–41, 1991.
- [301] M. Pasandideh-Fard, Y. M. Qiao, S. Chandra, and J. Mostaghimi, "Capillary effects during droplet impact on a solid surface," *Phys. Fluids*, vol. 8, no. 3, p. 650, 1996.
- [302] T. Mao, D. C. S. Kuhn, and H. Tran, "Spread and rebound of liquid droplets upon impact on flat surfaces," *AIChE*, vol. 43, no. 9, pp. 2169–2179, 1997.
- [303] B. L. Scheller and D. W. Bousfield, "Newtonian drop impact with a solid surface," *AIChE*, vol. 41, no. 6, pp. 1357–1367, 1995.
- [304] C. Ukiwe and D. Y. Kwok, "On the maximum spreading diameter of impacting droplets on well-prepared solid surfaces," *Langmuir*, vol. 21, no. 2, pp. 666–673, 2005.
- [305] C. Clanet, C. Béguin, D. Richard, and D. Quéré, "Maximal deformation of an impacting drop," *J. Fluid Mech.*, vol. 517, pp. 199–208, 2004.
- [306] Y. Son, Chongyoun Kim, A. Doo Ho Yang, and D. J. Ahn, "Spreading of an Inkjet Droplet on a Solid Surface with a Controlled Contact Angle at Low Weber and Reynolds Numbers," *Langmuir*, vol. 24, no. 6, pp. 2900–2907, 2008.
- [307] S. Bakshi, I. V. Roisman, and C. Tropea, "Investigations on the impact of a drop onto a small spherical target," *Phys. Fluids*, vol. 19, no. 3, 2007.
- [308] J. Eggers, M. A. Fontelos, C. Josserand, and S. Zaleski, "Drop dynamics after impact on a solid wall: Theory and simulations," *Phys. Fluids*, vol. 22, no. 6, 2010.
- [309] C. Josserand and S. T. Thoroddsen, "Drop Impact on a Solid Surface," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 48, no. 1, p. annurev-fluid-122414-034401, 2016.
- [310] I. V. Roisman, R. Rioboo, and C. Tropea, "Normal impact of a liquid drop on a dry surface: model for spreading and receding," *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 458, no. 2022, pp. 1411–1430, 2002.
- [311] T. Bennet and D. Poulikakos, "Estimating the maximum spreading of a droplet impacting a solid surface," *J. Mater. Sci.*, vol. 28, no. 4, pp. 963–970, 1993.
- [312] M. Rein, "Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces," *Fluid Dyn.*



- Res., vol. 12, no. 2, pp. 61–93, 1993.
- [313] S. Jung, “Fluid characterisation and drop impact in inkjet printing for organic semiconductor devices,” no. April, pp. 1–178, 2011.
- [314] B. Derby, “Inkjet printing ceramics: From drops to solid,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 31, no. 14, pp. 2543–2550, 2011.
- [315] P. J. Smith, D. Y. Shin, J. E. Stringer, B. Derby, and N. Reis, “Direct ink-jet printing and low temperature conversion of conductive silver patterns,” *J. Mater. Sci.*, vol. 41, no. 13, pp. 4153–4158, 2006.
- [316] S. Schiaffino, A. Ain, and A. Sonin, “Motion and arrest of a molten contact line on a cold surface: An experimental study,” *AIP Conf. Proceedings-American Inst. Phys.*, vol. 9, no. 8, pp. 2217–2226, 1997.
- [317] P. C. Duineveld, “The stability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate,” *J. Fluid Mech.*, vol. 477, pp. 175–200, 2003.
- [318] J. Stringer and B. Derby, “Limits to feature size and resolution in ink jet printing,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 29, no. 5, pp. 913–918, 2009.
- [319] S. H. Davis, “Moving contact lines and rivulet instabilities. Part 1: The static rivulet,” *J. Fluid Mech.*, vol. 98, no. 5, pp. 225–242, 1980.
- [320] R. Berger, “Integration des equations du mouvement d'un fluide visques incompressible,” *Handb. der Phys. VIII/2*, vol. stromungsm, pp. 1–384, 1963.
- [321] E. M. Aparrow and A. Haji-Sheikh, “Flow and heat transfer in ducts of arbitrary shape with arbitrary thermal boundary conditions,” *trans ASME J. Heat Transf.*, vol. 88, pp. 351–358, 1966.
- [322] D. Soltman and V. Subramanian, “Inkjet-printed line morphologies and temperature control of the coffee ring effect,” *Langmuir*, vol. 24, no. 5, pp. 2224–2231, 2008.
- [323] M. Monzón, Z. Ortega, A. Hernández, R. Paz, and F. Ortega, “Anisotropy of photopolymer parts made by digital light processing,” *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 1, pp. 1–15, 2017.
- [324] A. G. Marín, H. Gelderblom, A. Susarrey-Arce, A. van Houselt, L. Lefferts, J. G. E. Gardeniers, D. Lohse, and J. H. Snoeijer, “Building microscopic soccer balls with evaporating colloidal fakir drops,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 109, no. 41, pp. 16455–8, 2012.
- [325] R. D. Deegan, O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S. R. Nagel, and T. a Witten, “Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops,” *Lett. to Nat.*, vol. 389, pp. 827–829, 1997.
- [326] P. J. Yunker, T. Still, M. A. Lohr, and A. G. Yodh, “Suppression of the coffee-ring effect by shape-dependent capillary interactions,” *Nature*, vol. 476, no. 7360, pp. 308–311, 2011.
- [327] S. Amiri, L. Duroux, and K. L. Larsen, “Silver nanoparticle colloids with  $\gamma$ -cyclodextrin: enhanced stability and Gibbs-Marangoni flow,” *J. Nanoparticle Res.*, vol. 17, no. 1, 2015.
- [328] E. Fribourg-Blanc, D. M. T. Dang, and C. M. Dang, “Characterization of silver nanoparticle based inkjet printed lines,” *Microsyst. Technol.*, vol. 19, no. 12, pp. 1961–1971, 2013.

- [329] J. Park and J. Moon, "Control of colloidal particle deposit patterns within picoliter droplets ejected by ink-jet printing," *Acta Mater.*, vol. 22, no. 8, pp. 3506–3513, 2006.
- [330] J. R. Greer and R. A. Street, "Thermal cure effects on electrical performance of nanoparticle silver inks," *Acta Mater.*, vol. 55, no. 18, pp. 6345–6349, 2007.
- [331] R. Print, "Autodesk to show Netfabb additive manufacturing software at TCT Show," *tct magazine*, 2017. [Online]. Available: Print,. [Accessed: 06-Oct-2017].
- [332] U. of Tokyo, "Japanese researchers develop ultrathin, highly elastic skin display," *techxplore.com*, 2018. [Online]. Available: <https://techxplore.com/news/2018-02-japanese-ultrathin-highly-elastic-skin.html>. [Accessed: 23-Jul-2018].





