

METODOLOGÍA DFMA DE REDISEÑO DEL CONJUNTO ESTRUCTURAL ELECTROSOLDADO DE UNA MÁQUINA

TESIS DOCTORAL

Projectes d'Innovació Tecnològica en l'Enginyeria de Producte i Procés
(PITEPP)

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
DEPARTAMENT DE PROJECTES D'ENGINYERIA

Barcelona, 2015

Doctorando:

Huáscar Paz Bernales

Director:

Carles Riba Romeva

Departament d'Enginyeria Mecànica. Universitat Politècnica de Catalunya.

Co-directora:

Irene Buj

Departament d'Enginyeria Mecànica. Universitat Politècnica de Catalunya.



RESUMEN

En la presente tesis doctoral se aplicó la metodología DFMA (Diseño para la fabricación y el montaje) al rediseño eficiente de una bancada de un equipo industrial de construcción electrosoldada con el fin de simplificar las soluciones y abaratar los costes. Para ello se personalizó la metodología DFMA general para las particularidades de este tipo de base estructural, aunque con las características y etapas propias de la Ingeniería Concurrente. El primer paso de la metodología consistió en capturar las funciones técnicas que debía cumplir la bancada, en base al análisis de un equipo industrial existente. Para ello, se propuso una representación gráfica de funciones capturadas que se pudieran integrar en el mismo sistema de diseño CAD, que sintetizaran el conocimiento y permitieran su transmisión a los diseñadores conceptuales. Posteriormente, de acuerdo con las posibilidades del diseño de la disposición del conjunto estructural, se determinó la combinación óptima de procesos de fabricación y materiales para la simplificación del diseño. Con ello, se procedió a la interpretación y personalización de aquellas directrices orientadas a la fabricación y al montaje, con el objetivo de facilitar la generación de sugerencias de simplificación de la complejidad del diseño. Como soporte para poder realizar una comparativa cuantitativa entre la solución rediseñada y la del diseño original, se propuso utilizar una herramienta de evaluación de la complejidad, la cual tiene un efecto directo en los costes de producción. A fin de ilustrar los resultados de la aplicación de la metodología, se muestra un caso de rediseño de una bancada de un desintegrador de tierras para la industria cerámica hasta la etapa de materialización. Por último se exponen las conclusiones y posibles trabajos futuros.

Códigos UNESCO: 3313.12 Equipo y maquinaria industrial; 3313.15 Diseño de máquinas; 5306.02 Innovación tecnológica.

Palabras clave: DFMA; Bancada; Reglas de diseño; Diseño de producto; Maquinaria; Soldadura





ABSTRACT

In this thesis the methodology DFMA (Design for manufacturing and assembly) is applied to the efficient redesign of a bench of an industrial welded construction equipment in order to simplify the solutions and reduce costs. For this, the overall methodology DFMA was customized to the particularities of this type of structural base, although with the characteristics and stages of Concurrent Engineering. The first step of the methodology was to capture the technical functions to be performed by the bedplate, based on the analysis of an existing industrial equipment. For this, a graphic representation of captured functions could be integrated in the same CAD system that allowed synthesizing knowledge and enabling its transmission to the conceptual designers. Subsequently, in accordance with the possibilities of the layout design of the structural assembly, the optimal combination of materials and manufacturing processes for simplifying the design was determined. With this, it was proceeded to the interpretation and personalization of those guidelines aimed at manufacturing and assembly, in order to facilitate the generation of suggestions for simplifying design complexity. As a support to make a quantitative comparison between the redesigned solution and the original design, it was proposed to use a tool for assessing the complexity, which has a direct effect on production costs. To illustrate the results of the application of the methodology, it is shown a case redesign of a bedplate of a soil desintegrator for the ceramics industry to the stage of embodiment design. Finally conclusions and possible future work are presented.

UNESCO Codes: 3313.12 Equipos and industrial machinery; 3313.15 Design of machines; 5306.02 Technological innovation.

Keywords: DFMA; Bedplate; Design Rules; Product Design; Machinery; Welding.





RESUM

En la present tesis doctoral es va aplicar la metodologia DFMA (Disseny per la fabricació i el muntatge) al redisseny eficient d'una bancada d'un equip industrial de construcció electrosoldada amb la finalitat de simplificar les solucions i abaratir els costos. Per tal efecte es va personalitzar la metodologia DFMA general per les particularitats d'aquest tipus de base estructural, encara que amb les característiques i etapes pròpies de l'Enginyeria Concurrent. El primer pas de la metodologia va consistir en capturar les funcions tècniques que havia de complir la bancada, en base a l'anàlisi d'un equip industrial existent. Per fer-ho, es va proposar una representació gràfica de funcions capturades que es poguessin integrar en el mateix sistema de disseny CAD, que sintetitzessin el coneixement i permetessin la seva transmissió als dissenyadors conceptuals.

Posteriorment, d'acord amb les possibilitats del disseny de la disposició del conjunt estructural, es va determinar la combinació òptima de processos de fabricació i materials per la simplificació del disseny. Amb tot, es va procedir a la interpretació i personalització d'aquelles directrius orientades a la fabricació i el muntatge, amb l'objectiu de facilitar la generació de suggerències de simplificació de la complexitat del disseny. Com a suport per poder realitzar una comparativa quantitativa entre la solució redissenyada i la del disseny original, es va proposar utilitzar una eina d'avaluació de la complexitat, la qual té un efecte directe en els costos de producció. Amb la finalitat d'il·lustrar els resultats de l'aplicació de la metodologia, es mostra un cas de redisseny d'una bancada d'un desintegrador de terres per la indústria ceràmica fins l'etapa de materialització. Per últim s'exposen les conclusions i possibles treballs futurs.

Codis UNESCO: 3313.12 Equip i maquinària industrial; 3313.15 Disseny de Màquines; 5306.02 Innovació tecnològica.

Paraules clau: DFMA; Bancada; Regles de disseny; Disseny de producte; Maquinària; Soldadura





AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mis directores Carles Riba Romeva (Profesor de la ETSEIB y Director del CDEI) y a Irene Buj (Profesora de la ETSEIB) de la Universitat Politècnica de Catalunya, por sus valiosas aportaciones y apoyo durante el curso de la investigación. También me gustaría transmitir mi agradecimiento a mis compañeros del CDEI (entre ellos especialmente a Carles Domènech, Sònia Llorens, Elena Blanco, Andreu Presas, Sònia Mestre y David Martínez) por toda la ayuda que me han proporcionado para la realización de este trabajo de tesis.

Por último y especialmente importante, los reconocimientos particulares a mi familia, especialmente a Patricia, Eric, Diana, Mónica y José Antonio por su paciencia y ánimos respectivos durante el desarrollo de esta investigación.





PREFACIO

La presente investigación se lleva a cabo en cumplimiento parcial de los requisitos para la obtención del Doctorado en Ingeniería Industrial en el programa Proyectos de Innovación Tecnológica en la Ingeniería de Producto y Proceso (PITEPP) y se llevó a cabo en el Centre d'Equips Industrials de la Universitat Politècnica de Catalunya, España. El período de la investigación duró desde enero de 2011 hasta septiembre de 2015.





ÍNDICE

Resumen.....	3
Abstract.....	5
Resum.....	7
Agradecimientos	9
Prefacio	11
Índice de figuras	18
Índice de tablas.....	21
Indice de ecuaciones	21
Glosario	23
1. Introducción	25
1.1. Planteamiento del problema	29
1.2. Antecedentes	31
1.3. Definición de la investigación.....	34
1.3.1. Hipótesis	35
1.3.2. Objetivos de la investigación.....	35
1.3.3. Alcance de la investigación.....	36
1.4. Metodología de la investigación.....	36
1.5. Contenido de la tesis.....	38
2. Diseño para la fabricación y el montaje (DFMA)	41
2.1. El concepto de <i>DFMA</i>	42



2.2.	Objetivos generales del DFMA	43
2.2.1.	Objetivos concretos del DFMA sobre la bancada.	43
2.3.	Metodologías DFMA desarrolladas	45
2.4.	Ingeniería concurrente.	47
2.4.1.	Ciclo de vida y costes asociados	48
2.4.2.	Herramientas informáticas	50
2.5.	Resumen del capítulo	53
3.	Captura de funciones	54
3.1.	Concepto de función y representación de funciones	57
3.2.	Posibilidades de CAD.	60
3.3.	Representación de las funciones. Identificación, análisis y representación de las funciones básicas de la bancada.....	64
3.3.1.	Elemento de espacio:.....	64
3.3.2.	Elemento de par prismático:	65
3.3.3.	Elemento de anclaje de la bancada:	66
3.3.4.	Elemento de anclaje de un elemento intermedio:	66
3.3.5.	Elemento de distancia entre dos elementos:	67
3.3.6.	Elemento de agujero:.....	67
3.3.7.	Elemento de entrada de material:	68
3.3.8.	Elemento de volumen ocupado:.....	68
3.3.9.	Elemento de par de revolución:	69
3.3.10.	Elemento de aplicación de una fuerza:	69
3.3.11.	Elemento de entrada de un laberinto:	70
3.3.12.	Elementos de representación de un sellado rotativo:.....	70
3.3.13.	Elementos de representación de una zona ocupada:	71
3.4.	Ejemplo de representación de las funciones de un elemento estructural. 71	
3.5.	Resumen del capítulo	74



4.	Normalización de materiales y procesos en la construcción de los elementos estructurales de las máquinas	75
4.1.	Simplificación de procesos y materiales	77
4.2.	Diseño de disposición de conjunto apropiado	78
4.3.	Método de Construcción Diferencial	79
4.3.1.	Caso de ejemplo: Talleres Felipe Verdés (CDEI-UPC) Testera amasadora.	80
4.3.2.	Caso de ejemplo: Plasfi (CDEI-UPC). Cabezal de sujeción para la manipulación de bolsas.....	81
4.4.	Método de Construcción Integral	82
4.4.1.	Caso de ejemplo: Roglan Equipment (CDEI-UPC). Puente de mesa de corte de lona de 3 ejes.	83
4.4.2.	Caso de ejemplo: Hirt (CDEI-UPC). Máquina de relajación muscular.	85
4.5.	Método de Construcción Compuesto	86
4.6.	Contabilización de los procesos asociados.....	87
4.7.	Contabilización del material utilizado	88
4.8.	Resumen del capítulo	88
5.	Evaluación del diseño desde el punto de vista de la fabricación y el montaje	91
5.1.	Costes y complejidad.....	91
5.2.	Complejidad del diseño.....	92
5.3.	Estimación de la complejidad.....	94
5.4.	Estimación de la complejidad del diseño de una bancada.....	95
5.5.	Estimación de la complejidad del diseño de una bancada de construcción electrosoldada.	97



5.6.	Ejemplo de estimación y selección de la complejidad de una testera	100
5.7.	Resumen del capítulo	104
6.	Metodología.....	107
6.1.	Inicio del rediseño y acuerdo de los requerimientos	113
6.2.	Análisis de las funciones. Concepto de diseño	114
6.2.1.	Análisis de las funciones de la máquina original.....	114
6.2.2.	Análisis de diseño de la bancada original	115
6.3.	Captura y representación de las funciones de la bancada original	115
6.4.	DFA. Rediseño conceptual y de materialización en base a directrices de montaje.....	116
6.5.	Simplificación y normalización de procesos de fabricación y variantes de materiales.....	116
6.5.1.	Simplificación y normalización de los procesos de fabricación (DFM)	117
6.5.2.	Simplificación y normalización de las variantes de los materiales (DFM)	117
6.6.	Evaluación. Determinación del mejor concepto de diseño.....	117
6.7.	Diseño de detalle	118
6.8.	Resumen del capítulo	118
7.	Caso de estudio: Desintegrador.....	119
7.1.	Inicio del rediseño y acuerdo de los requerimientos	121
7.1.1.	Ámbito del trabajo realizado.....	121
7.1.2.	Organización del equipo de trabajo	121
7.1.1.	Objetivo general del caso.....	121



7.1.2.	Objetivos concretos del DFMA sobre la bancada	122
7.2.	Análisis de las funciones. Concepto de diseño	122
7.2.1.	Descripción de la máquina original	122
7.2.2.	Análisis de las funciones de la máquina original.....	124
7.2.3.	Descripción de la bancada original	125
7.2.4.	Análisis de diseño de la bancada original	126
7.3.	Captura y representación de las funciones de la bancada.....	128
7.4.	DFA. Diseño conceptual y de materialización en base a directrices de montaje	130
7.5.	Simplificación y normalización de los procesos de fabricación y variantes de materiales (DFM).....	137
7.5.1.	Simplificación y normalización de los procesos de fabricación (DFM)	137
7.5.2.	Simplificación y normalización de las variantes de los materiales (DFM)	138
7.6.	Evaluación. Determinación del mejor concepto de diseño.....	144
7.6.1.	Análisis de bancada rediseñada	144
7.6.2.	Evaluación	146
7.7.	Diseño de detalle (DFM)	148
7.8.	Resultados del caso de estudio	149
7.9.	Resumen del capítulo	150
8.	Conclusiones, contribuciones y trabajos futuros.....	152
8.1.	Conclusiones	152
8.2.	Principales contribuciones	153
8.3.	Trabajos futuros	153
9.	Bibliografía.....	156



Índice de figuras

Figura 1. Metodología de rediseño <i>DFMA</i> de bancadas (elaboración propia)....	27
Figura 2. Taller Felipe Verdés («TFV», 2015).	29
Figura 3. Equipamiento industrial del sector de la cerámica («TFV», 2015)	30
Figura 4. Metodología de la tesis	37
Figura 5. Centre de Disseny d'Equips Industrials («CDEI-UPC», 2015)	38
Figura 6 Evolución de las metodologías de diseño de máquinas (elaboración propia)	41
Figura 7. Pieza estructural de soporte de los rodamientos de una amasadora rediseñada. (a) chapa posterior y portarrodamientos (b) chapa exterior (elaboración propia) (c) conjunto («TFV», 2015).....	44
Figura 8. Pieza estructural de soporte de los rodamientos de una amasadora rediseñada. (a) chapa posterior y portarrodamientos (b) chapa exterior (c) conjunto (elaboración propia)	45
Figura 9. Esquema iterativo de diseño <i>DFMA</i> (Boothroyd et al., 2002).....	45
Figura 10. Características clave de la Ingeniería Concurrente. (Ullman, 2008) .	48
Figura 11. Inversión comprometida vs realizada en el transcurso de un proyecto (Riba, 2002).....	50
Figura 12. Herramientas PLM para las fases del proceso de diseño y fabricación (Enrique & La, 2008)	51
Figura 13. Gestión del ciclo de vida del producto (Ullman, 2008)	52
Figura 14. Ejemplo de líneas de fuerza en rótula (Pugh, 1991)	55
Figura 15. (a) Ejemplo de representación de una función general y (b) de subfunciones (funciones principales) de una máquina de ensayo de tracción (Pahl et al., 2007)	58
Figura 16. Ejemplo de diseño modular TDD con multiesqueletos (Chu et al., 2014)	61
Figura 17. Ejemplo del uso de un esqueleto para diseño de componentes de una lavadora (Mun et al., 2009).....	62
Figura 18. Foto (Chu et al., 2014)	63
Figura 19. Elemento de condicionamiento de espacio	64



Figura 20. Elemento de par prismático.....	65
Figura 21. Elemento de anclaje de la bancada	66
Figura 22. Elemento de canclaje intermedio	66
Figura 23. Elemento de distancia entre elementos	67
Figura 24. Elemento de representación de un agujero.....	67
Figura 25. Elemento de entrada de material	68
Figura 26. Elemento de volumen ocupado cilíndrico.....	68
Figura 27. Elemento de par de revolución.....	69
Figura 28. Elemento de aplicación de fuerza	69
Figura 29. Elemento de un laberinto	70
Figura 30. Elemento de un sellado rotativo	70
Figura 31. Elemento de de una zona ocupada.....	71
Figura 32. Fichas técnicas de amasadoras de doble eje. Cortesía de Talleres Felipe Verdés(«TFV», 2015)	72
Figura 33. (a) Amasadora (b) doble eje con palas («TFV», 2015)	72
Figura 34. Esquema de funciones mecánicas de una amasadora (elaboración propia)	73
Figura 35. Ejemplo de bancadas de máquina herramienta (a) bancada mecanizada (b) fabricación de bancada (c) bancada mecano-soldada («Calderería Leorpe», s. f.)	76
Figura 36. Testera o pieza estructural de soporte de los rodamientos de una amasadora (a) esquema de la testera original (b) esquema de la testera rediseñada (elaboración propia) («TFV», 2015).....	80
Figura 37. Cabezal de sujeción para manipulación de bolsas. Cortesía de Plasfi («Plasfi», s. f.)	81
Figura 38. Máquina de 3 ejes de corte de lona (cortesía Roglan Equipment)....	83
Figura 39. Estructura del puente original (cortesía Roglan Equipment)	83
Figura 40. Solución constructiva del puente original (cortesía Roglan Equipment)	84
Figura 41. Perfil de aluminio diseñado (cortesía CDEI-UPC).....	84
Figura 42. Puente rediseñado (cortesía CDEI-UPC).....	84
Figura 43. Máquina de relajación muscular. Evolución del carro por medio de construcción integrada en fundición de aluminio (cortesía HIRT / CDEI-UPC)...	85
Figura 44. Chasis de motocicleta. Perfilera y cuerpo de fundición de aluminio soldados (cortesía Derbi («Derbi», s. f.)).....	87



Figura 45. Pieza estructural de soporte de los rodamientos de una amasadora rediseñada. (a) imagen parcial de la amasadora (b) esquema de la testera actual (elaboración propia) («TFV», 2015)	100
Figura 46. Testera de soporte de los rodamientos de una amasadora rediseñada. (a) conjunto (b) conjunto sin tapa (c) tapa (elaboración propia) («TFV», 2015)	101
Figura 47. Testera de soporte de los rodamientos de una amasadora rediseñada por el CDEI-UPC (elaboración propia)	101
Figura 48. Metodología de rediseño <i>DFMA</i> de bancadas (elaboración propia).	110
Figura 49. Esquema de planificación y proceso de diseño (adaptado de Pahl y Beitz (2007).....	111
Figura 50. Esquema iterativo de diseño <i>DFMA</i> , adaptado de (Boothroyd et al., 2002).	112
Figura 51. Foto de catálogo de empresa fabricante de la máquina	123
Figura 52. Imágenes de la máquina («TFV», 2015).	123
Figura 53. Imágenes de la bancada en CAD 3D de la máquina (por cortesía de TFV).	125
Figura 54. CAD 3D de la máquina (por cortesía de TFV).....	126
Figura 55. Bancada original (por cortesía de TFV).....	127
Figura 56. Construcción electrosoldada de la bancada original (por cortesía de TFV).	127
Figura 57. Construcción electrosoldada de la bancada original (por cortesía de TFV).	128
Figura 58. Esquema de las funciones de la bancada (elaboración propia)	129
Figura 59. Esquema 3D de las funciones de la bancada (elaboración propia)	129
Figura 60. Rediseño del soporte lateral de la bancada.	131
Figura 61. Esquema 3D del rediseño conceptual de la bancada, a partir de las funciones (elaboración propia). “U” lateral inferior de una pieza	132
Figura 62. Esquema 3D del rediseño conceptual de la bancada, a partir de las funciones (elaboración propia). “U” lateral inferior de dos piezas.....	132
Figura 63. Diseño de materialización de la bancada.	134
Figura 64. Fase de montaje de la bancada rediseñada <i>DFMA</i>	135
Figura 65. Posicionamiento de las guías.....	136
Figura 66. Análisis del diseño original de la bancada del desintegrador (elaboración propia esía de TFV).	139
Figura 67. Explosión bancada rediseñada <i>DFMA</i>	144
Figura 68. Diseño de materialización de la bancada.....	145
Figura 69. Diseño de materialización de la máquina.....	146



Índice de tablas

Tabla 1. Tabla de pesos asignados a los procesos de montaje de los diseños de bancades y fabricación para la evaluación de los diseños de bancadas.	97
Tabla 2. Tabla de evaluación de diseños de bancades (elaboración pròpia).....	99
Tabla 3. Tabla de evaluación del diseño inicial de la testera de una amasadora (Verdés, n.d.).....	103
Tabla 4. Bancada original. Número de piezas totales y número de piezas diferentes.....	140
Tabla 5. Análisis espesores materiales de compra de la bancada.....	142
Tabla 6. Análisis espesores materiales de compra de la bandada rediseñada DFMA.	143
Tabla 7. Bancada original. Número de piezas totales y número de piezas diferentes.....	144
Tabla 8. Tabla de evaluación de diseño desde el punto de vista de la fabricación y el montaje.	147
Tabla 9. Tabla resumen de las evaluaciones	150

Indice de ecuaciones

Ecuación 1.....	95
Ecuación 2.....	95
Ecuación 3.....	96
Ecuación 4.....	96
Ecuación 5.....	96





Glosario

CAE: *computer-aided engineering*. Diseño asistido por ordenador

CAM: *computer-aided manufacturing*. Fabricación asistida por computadora

Complejidad:

CSCW: *Computer Supported Cooperative Working* Trabajo cooperativo asistido por computadora (TCAC)

DFA: *Design for Assembly*. Diseño para el montaje.

DFM: *Design for Manufacturing*. Diseño para la fabricación.

DFMA: *Design for Manufacturing and Assembly*. Diseño para la fabricación y el montaje.

DFSS: *Design for Six Sigma*. Diseño para Six Sigma

DFX: *Design for X*. Diseño para X

FEA: *Finite Element Analysis*. Herramientas de análisis por elementos finitos.

Ingeniería concurrente.

IPPD: *Integrated Product and Process Design*, Diseño Integrado Producto y Diseño de Procesos

KBE: *Knowledge Based Engineerin*, Ingeniería Basada en el Conocimiento

KBS: *Knowledge Based System*, Sistema Basado en el Conocimiento

PDM: *Product Data Management*, Gestión de datos de producto

PLM: *Product Life Cycle Management*. Gestión del ciclo de vida del producto

TDD: *Top Down Design*: Diseño de arriba abajo.





1. INTRODUCCIÓN

El tejido industrial en Cataluña ha sufrido un fuerte revés en esta última década debido a la crisis económica y energética que ha tenido lugar. Muchas pymes con actividades de diseño y de fabricación de bienes de equipo han desaparecido, sobre todo aquellas fuertemente dependientes del sector de la automoción o de la construcción. Las que continúan su actividad es en gran parte gracias a su posicionamiento en el mercado y su presencia internacional. Asimismo, la calidad de sus productos y su diferenciación han jugado un gran papel en ello. No obstante, las empresas del sector de industrias de bienes de equipo de han sufrido reestructuraciones organizativas y de optimización de sus recursos, fruto de planes profundamente reflexionados acordes con un mayor conocimiento de las propias empresas y sus productos.

El panorama actual no aventura un crecimiento económico importante a corto plazo, lo cual fomenta que las pymes ganen terreno en los mercados por una parte innovando y por otra siendo más competitivas, reduciendo el tiempo de lanzamiento de sus productos al mercado y reduciendo los costes asociados a los productos; “(...) es conveniente la implantación creciente de procesos de mejora continua (*Lean Manufacturing*) en las pequeñas y medianas empresas nacionales, con el objeto de incrementar la productividad y la calidad, reducir el consumo energético y lograr la excelencia operativa y de mantenimiento” Ministerio de Industria (Industria, 2013).

Dentro del contexto explicado anteriormente, el desarrollo de la metodología DFMA aplicada a máquinas del sector de bienes de equipo, concretamente a una máquina desintegradora, que se estudia en la presente tesis, puede representar una ayuda para el rediseño de máquinas y reducir su coste de fabricación y montaje.

Los proyectos de rediseño, en general, parten con la ventaja de aprovechar el conocimiento de las funciones y comportamiento actuales cosechados con el tiempo de uso de la máquina (Gopsill, McAlpine, & Hicks, 2011).

Se entiende por Ingeniería Concurrente (Riba, 2002) una nueva forma de concebir la ingeniería de diseño y desarrollo de productos y servicios de forma global e integrada donde concurren las siguientes perspectivas:

- Desde el punto de vista del producto, se toman en consideración tanto la gama que se fabrica y ofrece a la empresa como los requerimientos de las distintas etapas del ciclo de vida y los costes o recursos asociados
- Desde el punto de vista de los recursos humanos, colaboran profesionales que actúan de forma colectiva en tareas de asesoramiento y de decisión (con presencia de las voces significativas) o de forma individual en tareas de impulsión y gestión (gestor de proyecto), tanto si pertenecen a la



empresa como si son externos a ella (otras empresas, universidades o centros tecnológicos)

- Y, desde el punto de vista de los recursos materiales, concurren nuevas herramientas basadas en tecnologías de la información y la comunicación sobre una base de datos y de conocimientos cada vez más integrada (modelización 3D, herramientas de simulación y cálculo, prototipos y útiles rápidos, comunicación interior, Internet).

Hay metodologías de Ingeniería Concurrente como las propuestas por (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007; Riba, 2002; Ullman, 2008), pautadas y con ejemplos, de aplicación general para productos, piezas o máquinas.

No obstante, en muchas ocasiones el diseñador percibe que la aplicación de estas metodologías y herramientas están fuera de su alcance, y las consideran no productivas y que ralentizan el proceso de diseño y como resultado, los diseñadores son reacios a aceptarlas (Hsu, Fuh, & Zhang, 1998).

Por ello, esta investigación propone una metodología de ingeniería concurrente que aporta las siguientes ventajas:

1. No exige conocimientos previos del DFMA para resultar amigable para el usuario.
2. La metodología está estructurada en pasos concretos para facilitar su seguimiento.
3. Se propone una herramienta de captura de funciones técnicas del conjunto estructural de la máquina, para servir de definición gráfica del punto de partida de la parte creativa del diseño.
4. Se proponen etapas de aplicación con recomendaciones de diseño DFM y DFA.
5. Se propone una herramienta de evaluación de costes para comparar el rediseño elaborado con el diseño de partida.

La metodología consta de las siguientes etapas:

1. Inicio del rediseño.
2. Análisis de las funciones de la máquina actual (precedente)
3. Captura y representación gráfica de las funciones técnicas de la bancada.
4. Rediseño para la fabricación y el montaje (según directrices DFA).
5. Simplificación y normalización de las tecnologías y variantes de materiales (según directrices DFM).



6. Evaluación de la complejidad de diseño de las alternativas en base a los materiales usados y a las operaciones efectuadas en cada una de ellas y selección del concepto.
7. Diseño de detalle (según directrices DFM).

En la figura 1 se presenta un esquema de la metodología de rediseño propuesta:

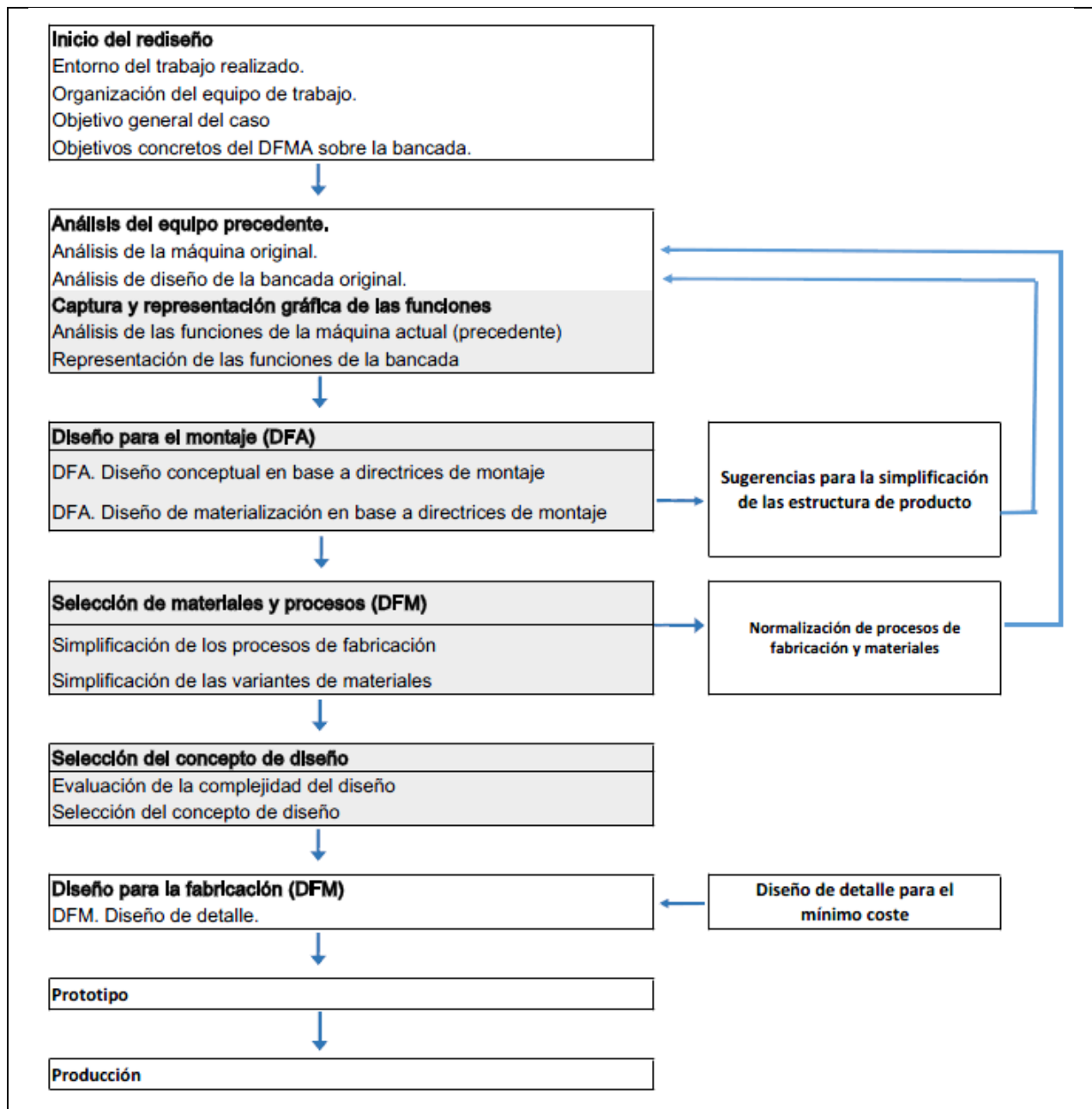


Figura 1. Metodología de rediseño DFMA de bancadas (elaboración propia).



En el esquema de la Figura 1, se muestra el proceso de rediseño de una bancada de construcción electrosoldada. Las etapas siguen una secuencia indicada por las flechas. Las etapas con fondo gris son aquellas en las que se centra la presente investigación.

Esta metodología se explica en el apartado 6.



1.1. Planteamiento del problema

El interés por esta tesis, para la realización de una metodología DFMA orientada al rediseño de equipos industriales con un elemento base estructural de construcción electrosoldada, tiene su origen en un trabajo de rediseño en el año 2007 para la empresa Talleres Felipe Verdés¹ («TFV», 2015). Esta empresa estaba inmersa en un proyecto de gran envergadura consistente en arrancar una planta piloto de producción integral en construcción de maquinaria, que abarcaría la instalación de corte por láser, planchistería por control numérico, almacén de chapa inteligente y mecanizado de piezas, montaje y acabado de maquinaria e instalaciones accesorias (Figura 2).



Figura 2. Taller Felipe Verdés («TFV», 2015).

La empresa TFV utilizaba como soporte de diseño de proyectos el software *Autocad* y *ProEngineer*, permitiendo integrar el diseño en un sistema de comunicación que permitiría en el futuro aprovechar la información generada para la programación de los equipamientos de última generación adquiridos por TFV.

La adquisición fue de un equipamiento de corte por láser capaz de cortar chapa de 20 mm de acero con una tolerancia de una décima y dos plegadoras por control numérico con las que se podía plegar hasta 6 m lineales. Con estos equipamientos la empresa podía abarcar nuevas operaciones internamente, con gran calidad,

¹ Talleres Felipe Verdés, en adelante TFV, empresa catalana fabricante de equipos industriales de procesamiento de áridos para la fabricación de productos cerámicos, con presencia internacional, localizada en Igualada (Barcelona).



rapidez de producción y disminuyendo los costes de materiales, subcontratación y de compra de materiales. Ello conllevaba una revisión desde piezas hasta equipos industriales en su totalidad.

Durante el aprovisionamiento de estos equipos industriales, encargaron al *Centre de Disseny d'Equips Industrials* («CDEI-UPC», 2015) el rediseño de un desintegrador² de tierras para la industria cerámica (Figura 3) y la impartición de formación en *DFMA* para un equipo de ingeniería junior, de cuatro personas, en un departamento bautizado en su momento como “Proyectos Independientes”, que tenía su actividad en la etapa de diseño conceptual y de materialización y del que se esperaba adquirieran una mentalidad de *time to market* y de “flexibilidad de fabricación de máquina a máquina”.

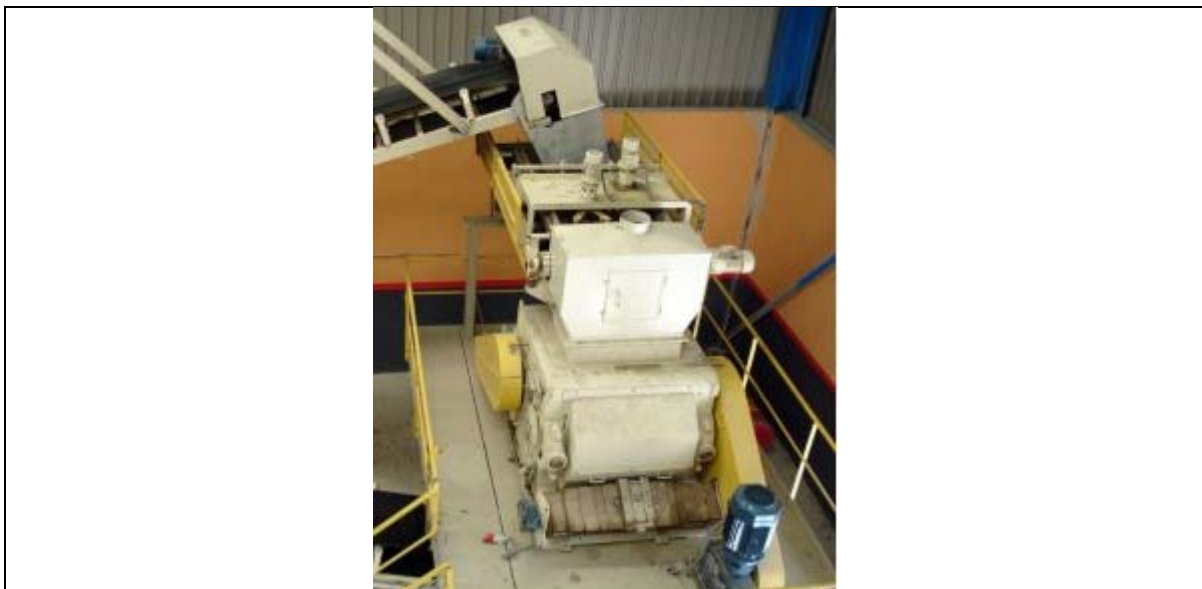


Figura 3. Equipamiento industrial del sector de la cerámica («TFV», 2015)

El punto de partida fue analizar el diseño vigente del desintegrador, de su bancada y de las nuevas tecnologías de conformación como sustitución a las de oxicorte, calderería, soldadura y mecanizados, en aquel momento con gran carga de operaciones. El objetivo era identificar mejoras de los diferentes puntos y formar en el conocimiento de la máquina. Al combinar los avances en el conocimiento del desintegrador, con el conocimiento del funcionamiento de la empresa y las tareas de comunicación entre los equipos tanto universitario como de la empresa fue

² El desintegrador de estudio es una máquina basada en dos rodillos enfrentados que giran en sentido contrario y separados para disminuir la granulometría de la tierra que pasa entre ellos («Desintegrador», 2007)



fraguándose la sensación de falta de un puente de enlace entre la teoría DFMA y su aplicación para la tipología de bancadas de la que se estaba analizando. Por esta razón se consideró interesante proponer ciertos pasos y ejemplos que pudieran facilitar la adaptación de esta metodología. Y es en esta labor en la que se consideró investigar y proponer una metodología DFMA para el rediseño de elementos estructurales electrosoldados de equipos industriales.

Se conocen investigaciones en relación a la metodología de diseño con enfoques a la fabricación y el montaje:

- Literatura de procesos de diseño (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002; Pahl et al., 2007; Pugh, 1991; Riba, 2002; Ullman, 2008),
- Diferentes aportaciones metodológicas con el objetivo de mejorar el proceso de diseño y mejorar el producto diseñado desde el punto de vista del coste y la simplificación las operaciones de fabricación y montaje para tipologías de productos concretos (Aguilar, Roman-Flores, & Huegel, 2013; Albiñana & Vila, 2012; Bergerson, 2010; Estrada & Lloveras, 2011; Garetti, Rosa, & Terzi, 2012; Harik & Sahmrani, 2010; Kalyun & Wodajo, 2012; Llorente Galera, 2009; Samy & ElMaraghy, 2012),
- Metodologías de estimación de los costes de producto general de diseño o investigaciones de análisis de los modelos de Ingeniería Basada en el Conocimiento (*Knowledge Based Engineering*, KBE) (Ferrer, Rios, Ciurana, & Garcia-Romeu, 2010; Tiwari, Jain, & Tandon, 2013) para automatizar procesos de estimación de costes desde etapas conceptuales.

No obstante, se han realizado pocos estudios con respecto al rediseño de bancadas de equipos industriales de construcción electrosoldada. La metodología DFMA aporta directrices metodológicas conceptuales generales de diseño, por lo que para casos particulares como la fabricación de desintegradores de tierras de las que se pueden fabricar algunas decenas al año, es decir, de baja producción, se consideran necesarias pautas metodológicas más concretas.

En el caso particular de este trabajo de investigación, se ha creado un guión metodológico, se ha realizado una labor de extraer la metodología "lógica" y se ha adoptado para este nuevo escenario, explicitando los elementos metodológicos desarrollados en la aplicación del caso para constituir la base de una metodología más general.

1.2. Antecedentes

Actualmente el enfoque de la calidad en los Sistemas Six Sigma ya engloba los conceptos de Ingeniería Concurrente y DFMA (Ullman, 2008). El conocimiento temprano de los costes permite detectar cuáles son los puntos de diseño que tienen mayor coste asociado y así concentrar los esfuerzos de diseño en ellos.



Dentro de los bienes de equipo, hay máquinas de procesos de diversos sectores (sector alimentario, lavadoras industriales, cerámica, etc.) que presentan bancadas como elementos base construida por electrosoldadura. Por lo general, son máquinas automáticas de fuente eléctrica, para fabricación en *lay-out* de una planta.

Un equipamiento industrial para un proceso de fabricación concreto se suele construir sobre una bancada metálica. En caso de que esta tenga unas dimensiones importantes, suele ser de construcción electrosoldada. La bancada es el elemento que sirve fundamentalmente de soporte estructural al conjunto y, además, de referencia de montaje al resto de componentes, que se diseñan y montan en relación a ésta.

Debido a la gran variedad de equipamientos, se tiene igual variedad en los diseños de sus respectivas bancadas, por lo cual frecuentemente se tienen diseños poco repetidos. Ésta es quizá la razón por la que el diseño de este tipo de elementos está poco referenciado en la bibliografía técnica.

En el diseño de este elemento de base se prevén las geometrías, las relaciones y muchos requerimientos de los demás elementos, por lo que las decisiones tomadas en su diseño condicionan el resto del equipamiento y en el ciclo de vida general del equipo en general. Por la experiencia que el CDEI-UPC ha adquirido en el DFMA al diseñar equipamientos de diferentes sectores, se hace la observación de que una solución depurada del elemento base (carcasa, bancada, bastidor) es un punto clave en la optimización del diseño tal que permita disminuir, de forma notable, los costes de montaje y fabricación.

Para reducir el coste asociado a las máquinas y el tiempo de salida al mercado por medio del rediseño, se debe afinar el proceso de diseño del conjunto estructural en esta tipología de máquinas.

El punto de partida del rediseño de un equipamiento es el diseño actual con sus funciones y costes de referencia. Por función no se entiende la función de la máquina en sí, sino las funciones internas mecánicas que ha de relizar la bancada para que la máquina cumpla con los requisitos globales de la máquina.

No obstante, para ello se hace necesario conocer el equipamiento en su totalidad para entender cómo cumple con sus funciones, cómo se comporta y cuáles son sus condicionantes de diseño. Asimismo, es menester conocer los detalles de partida y las especificaciones, para actualizarlas con respecto a las necesidades del mercado actuales, materiales y procesos de fabricación innovadores, para asegurar que los requerimientos de partida sean realistas.

Para ello, es preciso realizar en primer lugar una actualización de la interpretación de las especificaciones y condicionantes ya que, en ocasiones, ligeras matizaciones en una especificación puede permitir adoptar nuevas soluciones, materiales, componentes de mercado, tecnologías de fabricación, mejorar el diseño modular o reducir el plazo de salida al mercado.



Para la toma de decisiones, es necesario disponer del mayor conocimiento posible del equipo desde las etapas iniciales del diseño. También es necesario que este conocimiento sea el correcto y actualizado (Tiwari et al., 2013). Ullman (2008) destaca el hecho de que a medida que avanza el tiempo de la etapa de diseño se va conociendo en más profundidad el problema de diseño, pero paradójicamente se va teniendo menos margen de maniobra sobre el propio diseño ya que las decisiones que se van adoptando van condicionándolo.

En el rediseño DFMA, al compartir los elementos esenciales del Diseño Concurrente, se hace obligada una revisión de los condicionamientos y funciones que debe respetar el elemento base. Para ello, es menester extraer las funciones y comportamiento que debe tener, es decir, cómo queda afectado por las especificaciones y principios de solución que rigen el diseño vigente del equipamiento.

La información que se destila de las especificaciones, según el principio de solución general, servirá de referencia o marco durante la secuencia de fases de diseño, esto es, para el diseño conceptual, para el diseño de materialización y finalmente para el diseño el de detalle. En la fase de interpretación de las especificaciones del cliente y durante la generación del diseño conceptual, es recomendable su formalización o incluso representación.

El conocimiento que se maneja es ingente, ya que aglutina la experiencia de los expertos conocedores del equipo, tanto de diferentes áreas tecnológicas, como de su ciclo de vida. Por ello resulta complejo concentrar el conocimiento esencial para ponerlo a disposición para su uso ágil y eficaz por parte de una sola persona o de un equipo de diseño conceptual para la toma de decisiones correctas en etapas tempranas de diseño.

Hay disponible bibliografía en las que se exponen teorías de representación de funciones de las máquinas con el objetivo de facilitar la captación y comunicación de la información a los diseñadores y equipo de diseño en general, durante el diseño del equipo industrial. Según como se representen estas funciones, puede resultar más o menos complejo el aprovechamiento real de la información y conocimiento para el diseñador (De Fazio et al., 1993; Gao et al., 2007).

En ocasión del trabajo contratado por la empresa Talleres Felipe Verdés con el Centre de Disseny d'Equips Industrials de la UPC, se encargó el rediseño de una nueva máquina de procesamiento de áridos con el objetivo abaratar los costes. Para ello, la estrategia era la de optimizar el uso de los materiales acotando su uso y margen de elección, y las gestiones asociadas a las compras. Esto determina la estructura de la construcción de la bancada y las tecnologías a utilizar.

El material en sí es el mismo acero de máquinas, pero se decide partir de chapas de espesores concretos y un tipo de perfil (únicamente para las guías) para la construcción de la bancada electrosoldada. Concretamente, se realiza un trabajo de ordenación, selección y delimitación de los materiales que se utilizarán y los



formatos en que se compran. De esta forma se normaliza el uso de los materiales a utilizar para una máquina.

Para comenzar a esbozar el nuevo diseño de la máquina, una vez ya se conoce en su totalidad y se acota el uso de los materiales y tecnologías de fabricación, se aplican las recomendaciones orientadas al montaje (*Design for Assembly*, DFA) y a la fabricación (*Design for Manufacturing*, DFM). Para ello, es necesario realizar un seguimiento paralelo de la posible reducción de costes, a cuyo fin se propone una metodología de evaluación.

Se parte del entendimiento de que la teoría sobre diseño de transmisiones está muy pautada en la literatura, de manera que siguiendo las recomendaciones se llegaría a soluciones alternativas similares (Norton, 1998). Sin embargo, en el caso de las bancadas puede haber muchas alternativas; DFMA y las diferentes metodologías presentes en bibliografía son aplicables a las bancadas de construcción electrosoldada y hay ciertos pasos implícitos a realizar, cuya identificación, remarcación y presentación de una forma sistemática en una metodología personalizada (particularizada) para el rediseño de sistemas estructurales metálicas construidas por electrosoldadura, puede facilitar su comprensión, acogimiento y sintonización de la mentalidad del diseñador y por ende de las organizaciones de las empresas de diseño y fabricación de equipos industriales.

Con el fin de facilitar el rediseño de equipos y máquinas industriales basadas en bancadas estructurales de acero construidas por electrosoldadura, se analiza e investiga la posible existencia de metodologías cercanas a este tipo de diseño. Para ello se cuenta con el soporte de la experiencia de empresas del sector de fabricación de equipos industriales.

Finalmente se propone una metodología de rediseño de los elementos estructurales que, adaptada a dicho fin, enfoque toda la perspectiva DFMA en cada decisión, en etapas tempranas de la fase de diseño, de forma que se tenga en cuenta la repercusión de dichas decisiones en el posterior montaje y fabricación del equipamiento, así como en otras actividades de la empresa, como por ejemplo: la decisión de construir un componente específico en lugar de una pieza normalizada de mercado, su impacto en las operaciones de compras, en la gestión de almacenes, etc.

1.3. Definición de la investigación

En base a lo expuesto en el apartado 1.2, se plantea la pregunta principal de la investigación:

¿Es posible definir una metodología DFMA que facilite la simplificación de un diseño existente de una bancada de un equipo industrial de construcción electrosoldada, de forma que se reduzcan sus tareas de montaje y fabricación?

Asimismo se plantean las siguientes preguntas:



¿Es posible capturar las funciones de la bancada de forma que se sirvan de referencia en el proceso de diseño de una forma eficiente?

¿Normalizar el uso de materiales y tecnologías permite simplificar el diseño y reducir las operaciones de montaje y fabricación?

¿Se puede evaluar cuantitativamente alternativas de diseño de bancadas de construcción electrosoldada desde etapas tempranas de diseño desde el punto de vista del montaje y la fabricación?

1.3.1. Hipótesis

En base a la pregunta de la investigación, se plantea la siguiente hipótesis general y en las hipótesis particulares:

Hipótesis general

Se puede definir una metodología DFMA de fácil aplicación por los equipos técnicos habituales en las empresas, que facilite la simplificación de un diseño existente de una bancada de un equipo industrial de construcción electrosoldada, de forma que se reduzcan sus tareas de montaje y fabricación.

Hipótesis particulares

- Se puede proponer la aplicación de recomendaciones de diseño orientadas al montaje y a la fabricación de una forma ordenada y pautada.
- A partir de la interpretación de las especificaciones y el conocimiento de la máquina se puede capturar las funciones técnicas del conjunto estructural de una máquina de una manera que facilite la descripción de la misma.
- Se puede reconsiderar de una forma ordenada y pautada las tecnologías y los materiales utilizados en la construcción del conjunto estructural de la tipología de esa investigación para simplificar su diseño y reducir las operaciones de montaje y fabricación.
- Se puede determinar los criterios y métodos de ponderación, más relevantes, que permitan evaluar diferentes soluciones desde el punto de vista de la fabricación y el montaje.

1.3.2. Objetivos de la investigación

Objetivo general de la investigación.

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un método de rediseño de bancadas electrosoldadas de bienes de equipo, basado en la metodología DFMA, que facilite al diseñador el conocimiento de las funciones de la máquina, la



generación de soluciones de materialización y la evaluación de éstas desde un punto de vista de fabricación y montaje.

Objetivos particulares de la investigación.

- Orientar los pasos a seguir en la fase inicial de diseño de una bancada por construcción electrosoldada por DFMA.
- Capturar las funciones de la bancada de una máquina para ponerlas a disposición del ingeniero de diseño.
- Facilitar la normalización de los materiales y tecnologías de fabricación utilizados en la construcción del conjunto estructural de la tipología de esa investigación simplificar su diseño y reducir las operaciones de montaje y fabricación.
- Determinar los factores más relevantes de y métodos de ponderación, que permitan evaluar diferentes soluciones desde el punto de vista de la fabricación y el montaje aplicables a bancadas electrosoldadas.

1.3.3. Alcance de la investigación

El alcance principal de la investigación se limita al desarrollo de una metodología aplicable a empresas fabricantes de bienes de equipo industriales, que se caracteriza por el diseño y la fabricación de máquinas de fabricación unitaria o de pequeñas series, destinadas a intervenir en procesos operativos de fabricación de productos o prestación de servicios. Acostumbran a requerir mantenimientos y reconfiguraciones debido a su uso intensivo y su larga vida útil.

En concreto, se centra en el rediseño del conjunto estructural (bancada) del equipo industrial, tomando como punto de partida las funciones y la arquitectura de un diseño antecedente de la máquina. Se ha tenido en cuenta que ciertas dimensiones y componentes importantes suelen condicionar estas funciones técnicas de partida. Además, la tecnología utilizada para la construcción es la fabricación electrosoldada.

Aunque el objetivo final es ofrecer un diseño alternativo a la empresa que pueda reducir los costes asociados a la máquina, en general, al revisar todos los detalles del nuevo diseño, ha sido posible mejorar algunas de las prestaciones del producto, como por ejemplo su uso, el transporte, el mantenimiento, los efectos medioambientales u otros.

1.4. Metodología de la investigación

Se trata de una investigación aplicada exploratoria, con el objetivo de conocer, definir y esquematizar detalladamente las etapas del proceso de rediseño de bancadas de bienes de equipo construidas por electrosoldadura aplicando



técnicas DFMA, para reducir los costes de fabricación y montaje asociados al diseño (Figura 4).

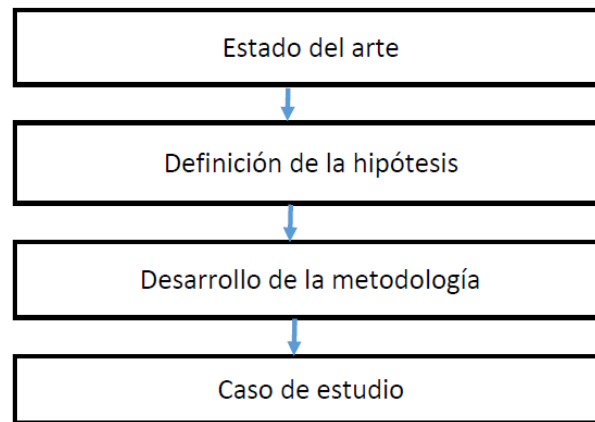


Figura 4. Metodología de la tesis

Los pasos seguidos para la realización de la tesis se detallan a continuación:

- Estudio del estado del arte, concretamente con exploración de los avances en metodologías y terminología según las referencias bibliográfica existentes. El estado del arte contempla la experiencia en el caso de transferencia tecnológica con empresas fabricantes de bienes de equipo.
- Definición de la hipótesis: a partir del estado del arte se detecta la oportunidad de definir las bases para la propuesta de una metodología.
- Desarrollo de la metodología: Se basa en un caso realizado, consistente en un proyecto de rediseño para reducir los costes de fabricación y montaje de una bancada de un desintegrador, que realizó el equipo universitario CDEI-UPC en colaboración con la empresa TFV, que diseña, fabrica y comercializa bienes de equipo industriales. Según la experiencia del centro universitario respecto al rediseño de bancadas, se observa el hecho de que existe poca bibliografía al respecto, por lo que se realiza un análisis cualitativo de los pasos metodológicos realizados en colaboración con la empresa.
- Aplicación de la metodología en el caso de estudio.

Para llevar a cabo la tesis doctoral se ha contado con la infraestructura del Centro de Diseño de Equipos Industriales (CDEI-UPC), que es un centro experto en desarrollo de equipos industriales, cuyo campo de actuación abarca desde la concepción, el diseño, la simulación y el cálculo de bienes de equipo y productos, hasta la gestión de su prototipado y ensayo. El CDEI-UPC pertenece a la Universitat Politècnica de Catalunya y forma parte de la Red de Centros de Apoyo a la Innovación Tecnológica de la Generalitat de Catalunya (marca TECNIO) y del Centre Tecnològic CIT-UPC.



Figura 5. Centre de Disseny d'Equips Industrials («CDEI-UPC», 2015)

Dada la estrecha relación de colaboración que el CDEI-UPC (Figura 5) mantiene con numerosas empresas fabricantes de bienes de equipo, se ha contado con la posibilidad de obtener datos que han permitido generar el caso de aplicación del método propuesto en esta tesis doctoral.

Concretamente, el investigador ha participado como jefe de proyecto en el proyecto del caso de estudio del rediseño del desintegrador del apartado 7 y en los proyectos de los ejemplos de la testera de la amasadora (apartado 4.3.1), el rediseño del puente de una mesa de corte de lona 3 ejes (4.4.1). Asimismo siguió las evoluciones de los proyectos del CDEI-UPC («CDEI-UPC», 2015) utilizados en los apartados 4.3.2 y 4.4.2 de una pinza para sujetar bolsas y una máquina de relajación muscular, respectivamente.

Asimismo, se ha contado con los recursos que ofrece la UPC (servicio de biblioteca) y el Departamento de Proyectos de la UPC y los conocimientos adquiridos durante la fase de docencia del programa de doctorado interuniversitario PITEPP, y que se ha realizado de forma conjunta entre la Universitat Politècnica de Catalunya, la Universitat de Girona (UdG) y la Universitat Jaume I de Castelló (UJI).

1.5. Contenido de la tesis

En este apartado se presenta el contenido de la tesis, con una breve explicación de sus capítulos:

Capítulo 1: Introducción.

En este capítulo se plantea el problema de la tesis, las hipótesis, los objetivos de la tesis, el alcance, la metodología y su contenido.



Capítulo 2: Diseño para la fabricación y el montaje (DFMA)

En este capítulo se presenta el concepto de Diseño para la fabricación y el montaje (DFMA), su evolución y sus características.

Capítulo 3: Captura de funciones de una bancada.

En este capítulo se investiga un método para representar las funciones. Se propone una simbología de representación de funciones mecánicas de un elemento base de un equipamiento industrial.

Capítulo 4: Normalización de materiales y procesos en la construcción de los elementos estructurales de una máquina.

En este capítulo se estudia la manera de optimizar los procesos de fabricación y el uso de los materiales.

Capítulo 5: Evaluación del diseño desde el punto de vista de la fabricación y el montaje.

En este capítulo se investiga sistemas de evaluación de diseños según la complejidad del montaje y de la fabricación.

Capítulo 6: Metodología

En este capítulo se construye una metodología de soporte al rediseño de conjunto estructural de una máquina.

Capítulo 7: Caso de estudio: Desintegrador.

En este capítulo se desarrolla un caso de estudio de un desintegrador, siguiendo la metodología propuesta en el capítulo 6.

Capítulo 8: Conclusiones y trabajos futuros.

En este capítulo se expone las conclusiones de la investigación y las expectativas de trabajos futuros.

Capítulo 9: Bibliografía.





2. DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN Y EL MONTAJE (DFMA)

En la actualidad, en los sectores de automoción, productos informáticos, línea blanca y en general de fabricación masiva de productos, se tiene en cuenta el ciclo de vida de estos, desde etapas tempranas de diseño, y con la participación de un equipo de expertos de diferentes áreas, cuya participación en el diseño afecta en las diferentes etapas del ciclo de vida.

Sin embargo, las tecnologías DFMA demuestran cada vez más su capacidad de incidencia en otros tipos de industria cuyos productos se fabrican de forma unitaria o en pequeñas series, como es el objeto de la presente investigación.

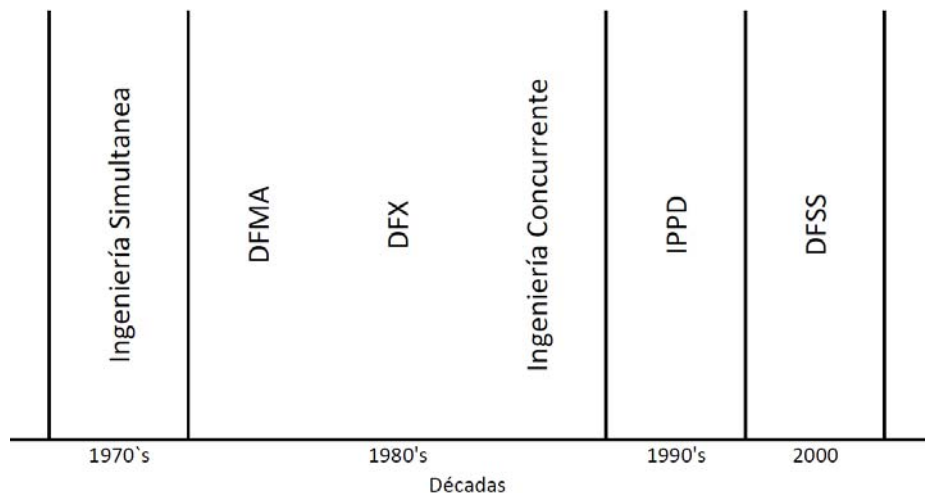


Figura 6 Evolución de las metodologías de diseño de máquinas (elaboración propia)

El DFMA consiste en el enfoque en el diseño hacia las etapas de fabricación y el montaje del ciclo de vida. Esta metodología dio paso a las metodologías DFX (Andreasen, Kvist, Pedersen, & Fiil-Nielsen, 2006), que fue el embrión de la Ingeniería Concurrente. Más tarde, evolucionó al concepto de Diseño Integrado Producto y Diseño de Procesos (*Integrated Product and Process Design*, IPPD). En la actualidad, la metodología Diseño para *Six Sigma* (*Design for Six Sigma*, DFSS) engloba también la metodología DFMA ya que los objetivos en la mejora del diseño como disminución de la complejidad y optimización de los procesos y materiales, están en consonancia con los objetivos de DFSS (Figura 6).



2.1. El concepto de *DFMA*

Como punto de partida se interpreta el significado literal del acrónimo DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly*), tal como la define la Real Academia Española («RAE», s. f.)

Diseño:

- “Traza o delineación de un edificio o de una figura.”
- “Proyecto, plan.”
- “Concepción original de un objeto u obra destinados a la producción en serie.
- “Forma de cada uno de estos objetos“.
- “Descripción o bosquejo verbal de algo.”

Fabricar:

- “Producir objetos en serie, generalmente por medios mecánicos.”

Montar:

- “Armar, poner en su lugar las piezas de cualquier aparato o máquina”

Bienes de equipo:

- “m. pl. insumo: Conjunto de bienes empleados en la producción de otros bienes.”

De estas definiciones, se puede considerar el DFMA aplicado a las máquinas industriales como una concepción original de una máquina industrial para que sus piezas sean fabricadas y montadas eficientemente, en una producción en serie por medios mecánicos.

El montaje puede ser manual, automático fijo o automático flexible. En el caso del rediseño de la bancada de una máquina industrial, se consideran las operaciones manuales o con equipos auxiliares para la manipulación de piezas grandes y pesadas.

Al considerar un rediseño tomando como punto de partida un diseño anterior, se considera como objetivo facilitar las operaciones de fabricación y montaje y reducir los costes asociados de la máquina por medio de un diseño optimizado de la máquina tal que realiza las mismas funciones.

En los años 60 (Kuo, Huang, & Zhang, 2001) algunas empresas fabricantes de productos comenzaron a confeccionar guías de fabricación con el objetivo de



facilitar el diseño de piezas a los diseñadores, como fue el caso de General Electric Corp. (Kuo et al., 2001).

Ya a finales de los años 70, detectada la repercusión de las operaciones de montaje en los costes de producción de un producto, se investigaron métodos de montaje y se realizaron evaluaciones de tiempos de montaje para evaluar la repercusión de las opciones de diseño y tener información de su impacto en el coste final. Para ello, se reunieron el conocimiento y las recomendaciones de diseño en guías de diseño para el montaje o DFA.

Más tarde se añadirían conceptos de diseño para la fabricación, reunidos en guías de diseño para la fabricación o DFM y originando la metodología conjunta de diseño para la fabricación y el montaje o DFMA (Boothroyd et al., 2002).

2.2. Objetivos generales del DFMA

Actualmente, las empresas que aplican metodologías DFMA tienen por objetivo reducir los costes del producto manteniendo su función, la fiabilidad y *time-to-market*³.

Son numerosos y vistosos los casos de las empresas de automoción, motocicletas, fabricantes de aparatos informáticos y electrónicos, o maquinaria en general, que aplican DFMA para concebir sus productos («Boothroyd Dewhurst, Inc.», 2015).

Al margen de su volumen de producción, siempre consiguen disminuir en mayor o menor medida los costes de fabricación y montaje de sus productos. Ejemplos claros son la eliminación de elementos de tornillería (tornillos, tuercas, pernos, arandelas), conectores, componentes (rodamientos, motores, etc.), eliminación de piezas redundantes o diseño de piezas para facilitar el montaje de un conjunto.

Además generalmente estos productos diseñados por medio de DFMA acostumbran a tener una estructura modular que facilita su mantenimiento y su reparación.

2.2.1. Objetivos concretos del DFMA sobre la bancada.

La aplicación del DFMA sobre la bancada tiene como objetivos o requerimientos:

- Asegurar las funciones de la máquina, aunque al analizarlas, también suele ser posible detectar mejoras en el diseño que implicaban cambios en las

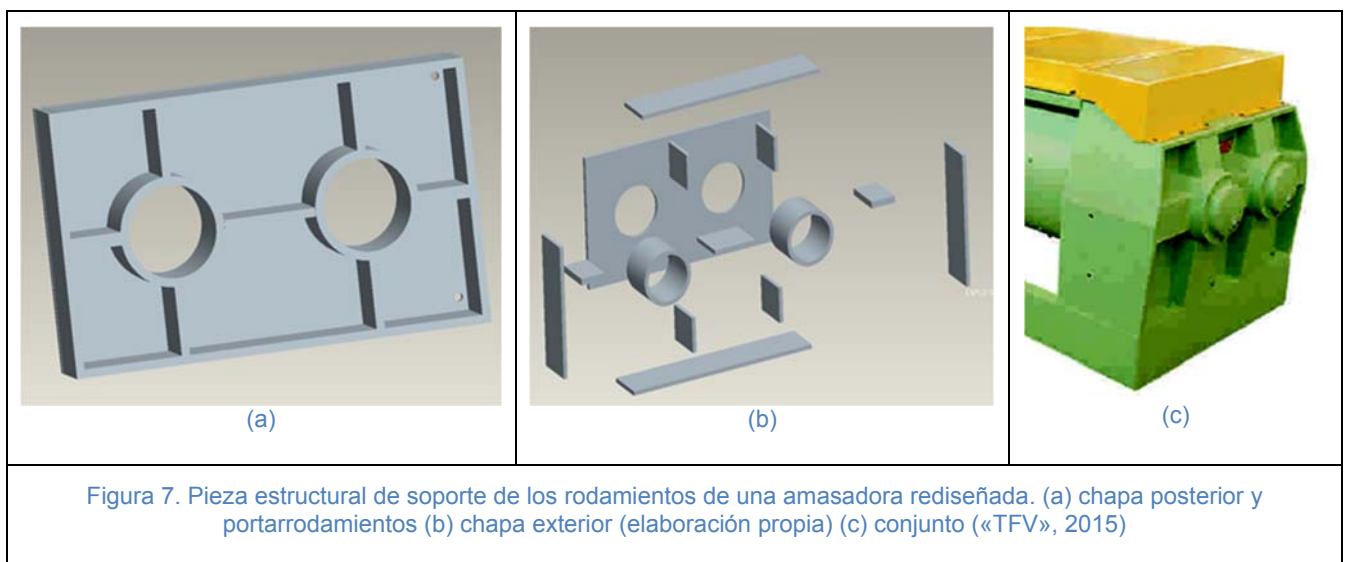
³ Time to market (TTM), tiempo que transcurre entre que un producto es concebido y está disponible para la venta («Wikipedia», s. f.).



prestaciones de la máquina. No obstante la presente tesis se centra en el ámbito de las actuaciones del DFMA.

- Mantener la calidad de la máquina.
- Simplificar el diseño, identificando las piezas redundantes, minimizando el número de piezas, dotando a las piezas de multifunciones
- Mejorar la fabricación, disminuyendo las operaciones de fabricación y haciendo uso de tecnologías de fabricación más eficientes para el caso en concreto.
- Mejorar las operaciones de montaje, disminuyendo el número de operaciones a realizar, facilitándolas y disminuyendo el tiempo dedicado a efectuar el montaje de la máquina.
- Recortar al mismo tiempo los costes de fabricación y de montaje.
- Realizar un uso eficiente de los materiales y recursos energéticos.

A modo de ilustración de los objetivos comentado en 2.2.1, se muestra una pieza de soporte de la bancada (“testera”) de una amasadora construida por electrosoldadura, de gran robustez, y una propuesta de rediseño de la misma, pero siempre manteniendo las funciones. En la Figura 7 (a), se esquematiza la pieza original. En la Figura 7 (b) se muestra una vista explosionada de la misma. En la Figura 7 (c) se muestra la pieza real.



En la Figura 8 (a) muestra un esquema de una propuesta de rediseño DFMA de la testera de sin la tapa. En la Figura 8 (b) se muestra la tapa. En la Figura 8 (c) se muestra el conjunto entero rediseñado de la testera. La propuesta de rediseño muestra menor número de piezas totales, tiene un aspecto más simple, con menos piezas totales, menos piezas diferentes y menos direcciones de montaje.

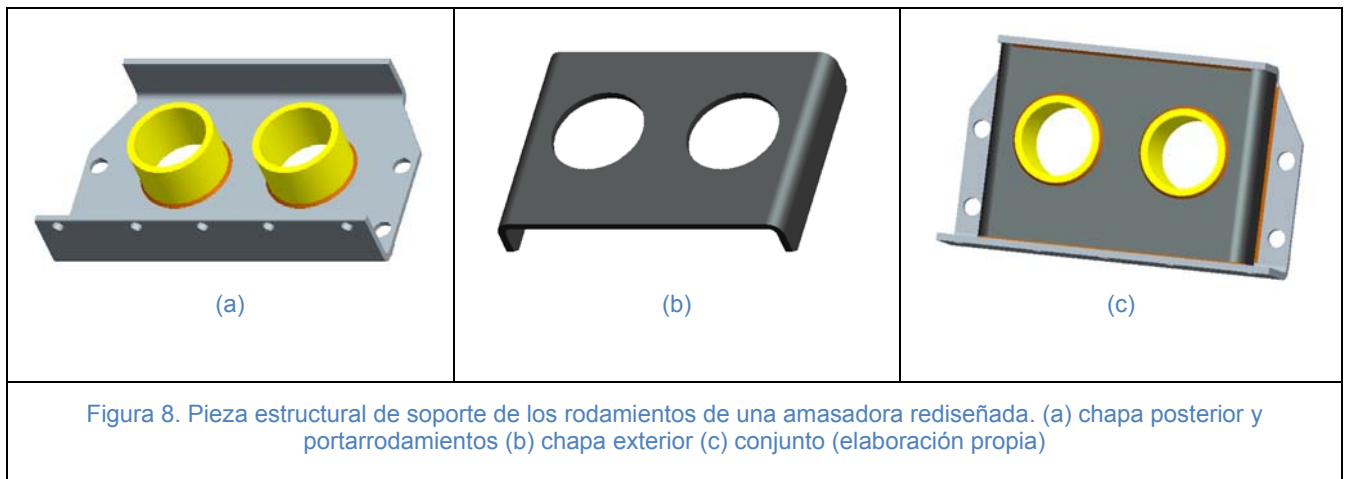


Figura 8. Pieza estructural de soporte de los rodamientos de una amasadora rediseñada. (a) chapa posterior y portarrodamientos (b) chapa exterior (c) conjunto (elaboración propia)

2.3. Metodologías DFMA desarrolladas

En general las metodologías de diseño DFMA siguen un esquema de simplificación de un diseño aplicando directrices o recomendaciones para la fabricación y el montaje y realizando evaluaciones que permitan valorar la mejora en el diseño (Bogue, 2012; Edwards, 2002) (Figura 9).

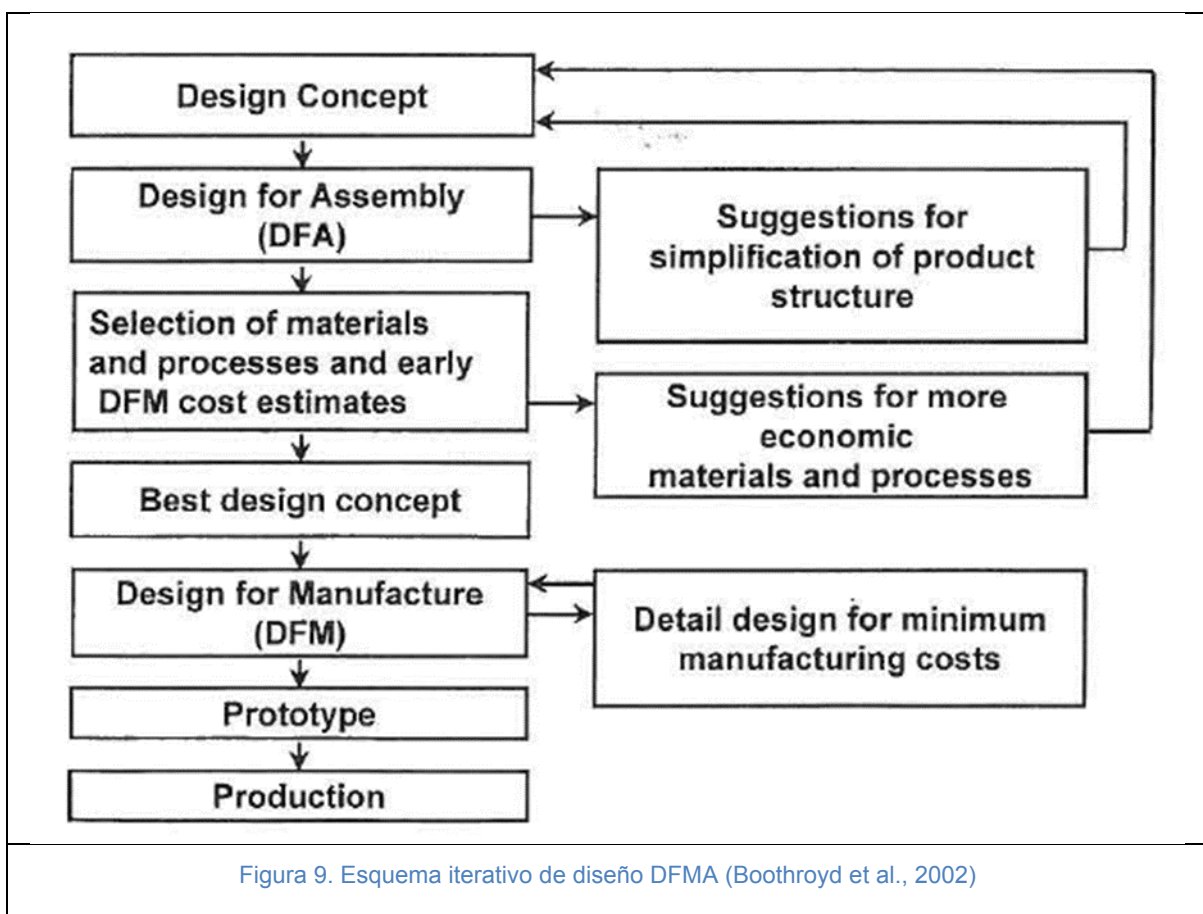


Figura 9. Esquema iterativo de diseño DFMA (Boothroyd et al., 2002)



Al abordar un diseño o rediseño de un producto desde la etapa de diseño, se puede hacer según tres enfoques (Bogue, 2012):

- “Seguir un conjunto general de normas o directrices no cuantitativas y que requieren ser interpretadas en cada caso.
- Aplicar una metodología DFMA desarrollada.
- Automatizar el proceso utilizando los programas informáticos adecuados, de manera que el análisis cuantitativo se puede aplicar al diseño.”

Una metodología DFA relevante de evaluación y mejora del producto es la de Boothroyd y Dewhurst (2002), pero hay otras metodologías DFA alternativas, como la de Hitachi (the AEM - "método de montaje evaluación"), Lucas (el "método Lucas DFA") y Fujitsu (PSE - "sistema de evaluación de la productividad") (Bogue, 2012; Zakaria, 2009):

- Metodología de Boothroyd y Dewhurst: Consiste en emplear una evaluación cuantitativa del tiempo de montaje, asignando a cada pieza un valor estimado del tiempo de su montaje. Se suman estos tiempos y el valor resultante se utiliza como una guía para la calidad del diseño global. El producto se rediseña utilizando estos valores lo que permite concentrarse a mejorar el diseño de los elementos que contribuyen en mayor medida al tiempo de montaje total. Sin embargo, ello requiere perspicacia y conocimiento por parte del diseñador (Bogue, 2012; Todić, Lukić, Milošević, Jovičić, & Vukman, 2012).
- Método de Evaluación del ensamblaje Hitachi (Hitachi Assembly Evaluation Method): El principal objetivo es facilitar mejoras mediante la identificación de las debilidades de diseño en la etapa más temprana posible en el proceso de diseño. Ello se logra mediante el uso de dos índices: la "relación de puntuación de la evaluación montabilidad", que se utiliza para evaluar la calidad del diseño mediante la determinación de la dificultad de las operaciones de montaje y la "relación de coste de montaje", usado para indicar las mejoras en el coste de montaje (Bogue, 2012; Todić et al., 2012).
- El método Lucas: fue resultado de una colaboración con la Universidad de Hull y se diferencia de otros métodos en que no utiliza un análisis de costes. Se trata de la asignación de factores de penalización asociados a potenciales problemas de diseño (funcionales, de manipulación y de unión). Es similar al método de Hitachi pero con la inclusión de la manipulación, así como la inserción (Bogue, 2012).
- Sistema de evaluación de productividad Fujitsu (Fujitsu Productivity Evaluation System): A diferencia de otros métodos de DFA, no es un procedimiento de refinamiento para ser utilizado después de la finalización del diseño, pero tiene como objetivo crear un diseño detallado que es fácil de fabricar y montar de la manera más rentable (Bogue, 2012).



Diferentes autores realizan aportes metodológicos para facilitar el DFMA desde diferentes enfoques:

- Lebacqz, Brechet, Shrercliff, Jeggy y Salvo (2002) aportan una metodología para la selección de proceso de unión en el diseño.
- Tasalloti, Eskelinen, Kah y Martikainen (2015) investigan una metodología de diseño de estructuras soldadas, con el soporte de una aplicación integrada a una base de datos PDM con datos de materiales y procedimientos de soldadura que asiste al diseñador para facilitar la toma de decisiones con un enfoque DFMA (Tasalloti et al., 2015),
- Giudice, Ballisteri y Risitano (2009) destacan la importancia del soporte de los estudios simultáneos FEA y como soporte en el desarrollo del DFMA para trabajar a nivel de conjuntos y de piezas lo antes posible y ayudar a la redefinición de soluciones de diseño preliminares.
- Stauffer y Smith (2005), proponen una herramienta de análisis DFA, adaptada para las construcciones soldadas de gran escala, pero de bajo volumen, para identificar donde se concentran los principales costes en las soluciones constructivas electrosoldadas.
- Niebles (2007) investiga una metodología de diseño y desarrollo de productos soldados en base a conocimientos de tecnologías de soldadura para la fabricación y ensamblaje (montaje) de productos soldados.
- Bergerson (2010) realiza una implantación de la metodología DFMA para el rediseño de un conjunto estructural de construcción electrosoldada

2.4. Ingeniería concurrente.

Así, basándose en las metodologías DFMA, en la década de los 80 apareció el concepto de Ingeniería Concurrente, como un proceso que extendía el enfoque de la fabricación y el montaje, a todo el ciclo de vida. La Ingeniería Concurrente (Amaya, 1999; Gagnon, Leduc, & Savard, 2012), es la integración de equipos de personas, herramientas de diseño y técnicas e información sobre el producto y los procesos utilizados para desarrollar dicho producto. Durante cada etapa del desarrollo de un producto, se requiere las opiniones de diferentes personas, que son tenidas en cuenta en el equipo de diseño de producto. Esto elimina muchos de los problemas respecto a la metodología tradicional “de comunicarse por encima de la pared”.

Sus diferentes puntos de vista, ayudan a tener presente los pormenores de todo el ciclo de vida del producto desde a etapa de diseño. Mediante el uso de herramientas y técnicas informáticas, los equipos están en contacto con la información. No obstante, hay margen de mejora en las técnicas que afectan a la cultura del diseño y las herramientas de soporte (Riba, 2002; Ullman, 2008).



En los 90, este concepto evolucionó a Diseño Integrado Producto y Diseño de Procesos (*Integrated Product and Process Design*, IPPD), en el que el término “Integrado”, en lugar de “Concurrente” o “Simultáneo”, matiza un mayor esmero en el pensamiento acerca de lo que se necesita para desarrollar eficazmente un producto (Ullman, 2008). No obstante hoy en día al referirse a Ingeniería Concurrente, se incluye también este matiz comentado. Posteriormente, a finales de los 90 tomó relevancia la calidad en el ciclo de desarrollo de productos, con la evolución de la metodología Six Sigma a Diseño para *Six Sigma* (DFSS, *Design for Six Sigma*). (Ullman, 2008).

La Ingeniería Concurrente (así como el DFMA) se basa en nueve características clave (Ullman, 2008), que se clasifican bajo tres conceptos (Figura 10):

- Equipos de trabajo.
- Herramientas y técnicas.
- Información de producto y proceso.

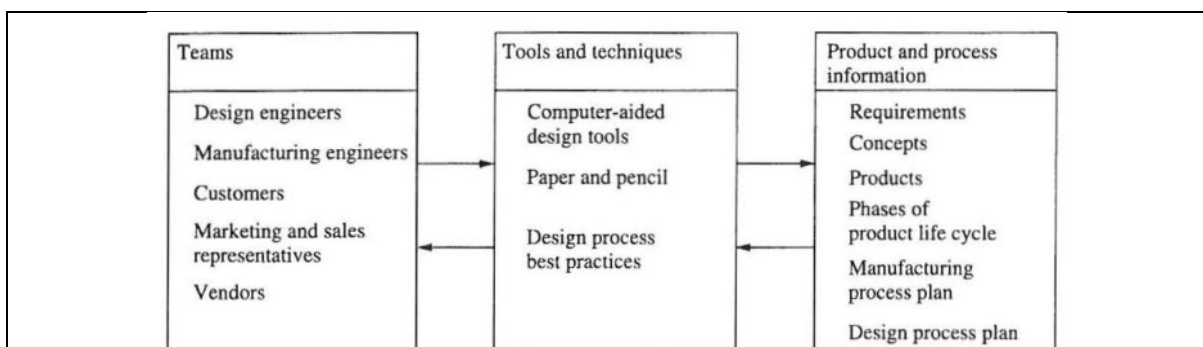


Figura 10. Características clave de la Ingeniería Concurrente. (Ullman, 2008)

2.4.1. Ciclo de vida y costes asociados

En la literatura se pueden encontrar dos conceptos de ciclo de vida que están relacionados, el ciclo de vida del producto y el ciclo de vida del proyecto (Riba, 2002):

- Ciclo de vida de un producto: es el conjunto de las etapas que recorre un producto desde que se crea hasta su fin de vida. Existen múltiples clasificaciones de las etapas del ciclo de vida de producto, pero en un primer resumen se podrían agrupar en las siguientes:
 - Definición y toma de decisiones
 - Diseño y desarrollo
 - Fabricación
 - Distribución y comercialización
 - Uso y mantenimiento
 - Retirada y fin de vida (posible reutilización)



- Ciclo de vida de un proyecto: es el conjunto de etapas que recorre un proyecto (en este trabajo interesan principalmente aquellos que conllevan la fabricación de un producto y / o la prestación de un servicio) desde que se inicia hasta que finaliza o es abandonado.

Diseñar para el ciclo de vida requiere considerar el producto desde su concepción hasta el fin de vida.

Así pues, por ejemplo, el ciclo de vida de un coche (producto) comprendería su concepción, su desarrollo, la fabricación, su venta, el uso y mantenimiento y su fin de vida. En cambio, el ciclo de vida de un modelo de automóvil (proyecto) es su concepción y desarrollo, el lanzamiento al mercado y la evolución de la fabricación y de las ventas.

Los costes asociados al ciclo de vida de un producto van más allá de los costes que tiene la empresa de diseño y producción (fabricación y montaje) (Asiedu & Gu, 1998). La empresa también incurre en gastos de transporte, almacenamiento, desperdicios, roturas o servicios de garantía.

Por otra parte el usuario también tiene unos costes asociados al uso: transporte, gasto de energía, de material y de retirada o fin de vida. Asimismo la sociedad asume costes relacionados con la producción, transporte y retirada del producto, en forma de gestión de los desperdicios, de la polución, de los daños a la salud, de la gestión de embalajes o de la retirada de servicio al final de la vida de los productos (Asiedu & Gu, 1998).

Los costes de producción y construcción de los productos incluyen los de la fabricación, ensamblaje y ensayos, los asociados a la amortización de las instalaciones, al desarrollo del proceso, a las operaciones de producción, al control de calidad y requerimientos iniciales de soporte logístico.

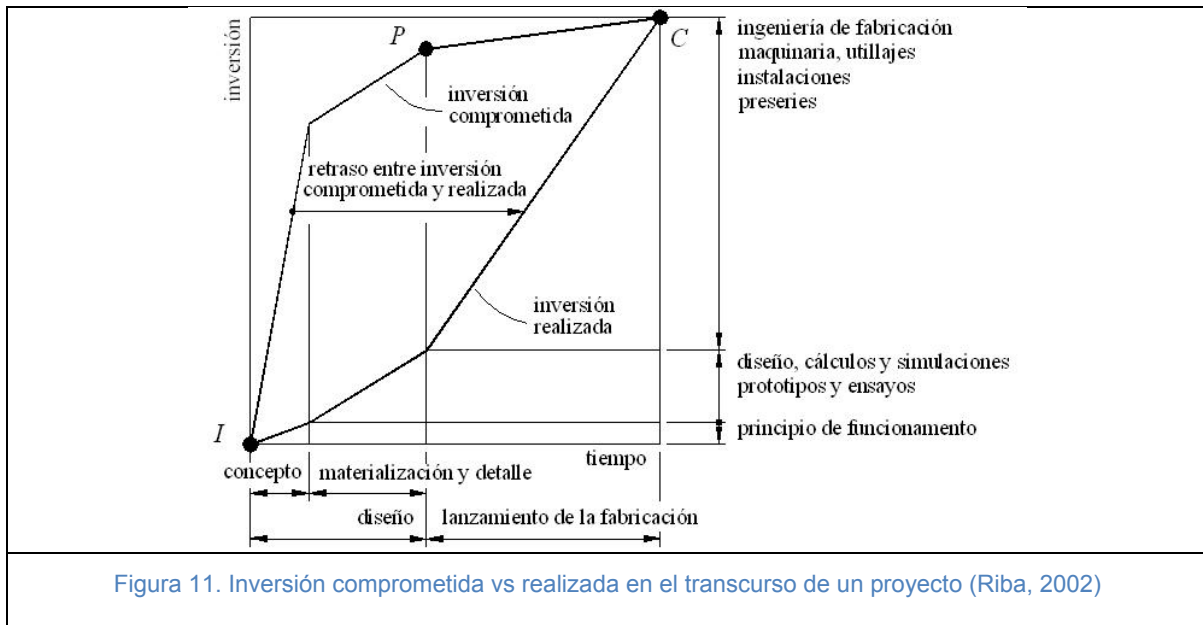
Conocer los costes lo antes posible y con precisión permite a las empresas evaluar si pueden emprender un proyecto, saber contra qué presupuesto se debe trabajar para evitar gastos por relajación en el control de los costes o permitir al diseñador no solo ser consciente de la importancia de sus decisiones de diseño en las etapas de producción, sino también del impacto que tiene en el entorno, en la sociedad (Asiedu & Gu, 1998; Knight, 2005; Riba, 2002).

El coste de diseño es, básicamente, considerado como el esfuerzo humano requerido para terminar un diseño. Hay dos partes en el coste de diseño: el coste previsto y el coste no planificado. El coste no planificado aparece de la repetición innecesaria de los esfuerzos de diseño debido a las influencias de otras tareas de diseño y se considera negativamente, ya que los. Esta iteración innecesaria es un resultado de un error de diseño o el fracaso diseño debido a descuidar algo conocido previamente, y, además, la falta de conocimiento. La reanudación de diseño no cubre los cambios de diseño debido a los cambios de requisitos, que se considera como no-monotónica (Krishnan et al. 1997). Es importante entender el



retrabajo diseño de modo que el esfuerzo total de diseño / costo se puede entender mejor

Tal como se muestra en la Figura 11 en la fase de diseño se compromete gran parte de la inversión futura a realizar durante las etapas de diseño y fabricación (Riba, 2002, p. 27).



El diseño DFMA se centra en la parte de los costes asociados al ciclo de vida de un producto. Se tienen costes de investigación, de producción, operativos y de fin de vida, que repercuten en el coste final de un producto. En el precio final del producto fabricado se acumulan todos los costes asociados. Para identificarlos lo ideal es tener un sistema preciso de control de costes en la empresa.

Una empresa necesita tener suficiente margen de beneficio para no interferir en su actividad en el mercado (Ullman, 2008). Errores frecuentes en la estimación del coste de un producto, ya sea la sobreestimación del coste de un producto que puede conducir a gastar lo necesario hasta alcanzar el coste estimado, o por el contrario, una estimación muy inferior al coste real, puede llevar a la empresa a no acabar el proyecto o incluso a la quiebra (Asiedu & Gu, 1998). Por ello, es de gran ayuda controlar los costes y disminuirlos en la medida de lo posible. Estrategias de simplificación de un diseño se pueden orientar al ahorro en el uso de materiales, en la disminución de horas de montaje o disminución de operaciones de fabricación.

2.4.2. Herramientas informáticas

El *software* de soporte a las actividades de diseño en los últimos años ha experimentado una gran evolución, por lo que están presentes como asistencia en todas las actividades relacionadas con el diseño.



Riba y Molina (2006) proponen una taxonomía de aplicaciones y herramientas actuales basadas en computadora, que apoyan el proceso de desarrollo de proyectos. En la Figura 12: se muestra un esquema de dicha taxonomía, que consta de las siguientes partes:

- “Sistemas orientados a funciones que apoyan tareas específicas de ingeniería. Por ejemplo: CAD, CAM, CAE, KBES - *Knowledge Based Engineering System*, Prototipos Rápidos...”.
- Sistemas de coordinación que apoyan secuencias de actividades y flujo de información(....)”.
- Sistemas colaborativos para apoyar la cooperación entre ingenieros, es decir, CSCW - *Computer Supported Cooperative Working*... .
- Sistemas de administración de información del producto (PDM – *Product Data Management*, PLM – *Product Life Cycle Management*) y sistemas de ingeniería basada en conocimiento, que facilitan el intercambio y conocimiento de información de producto y manufactura(....)”.

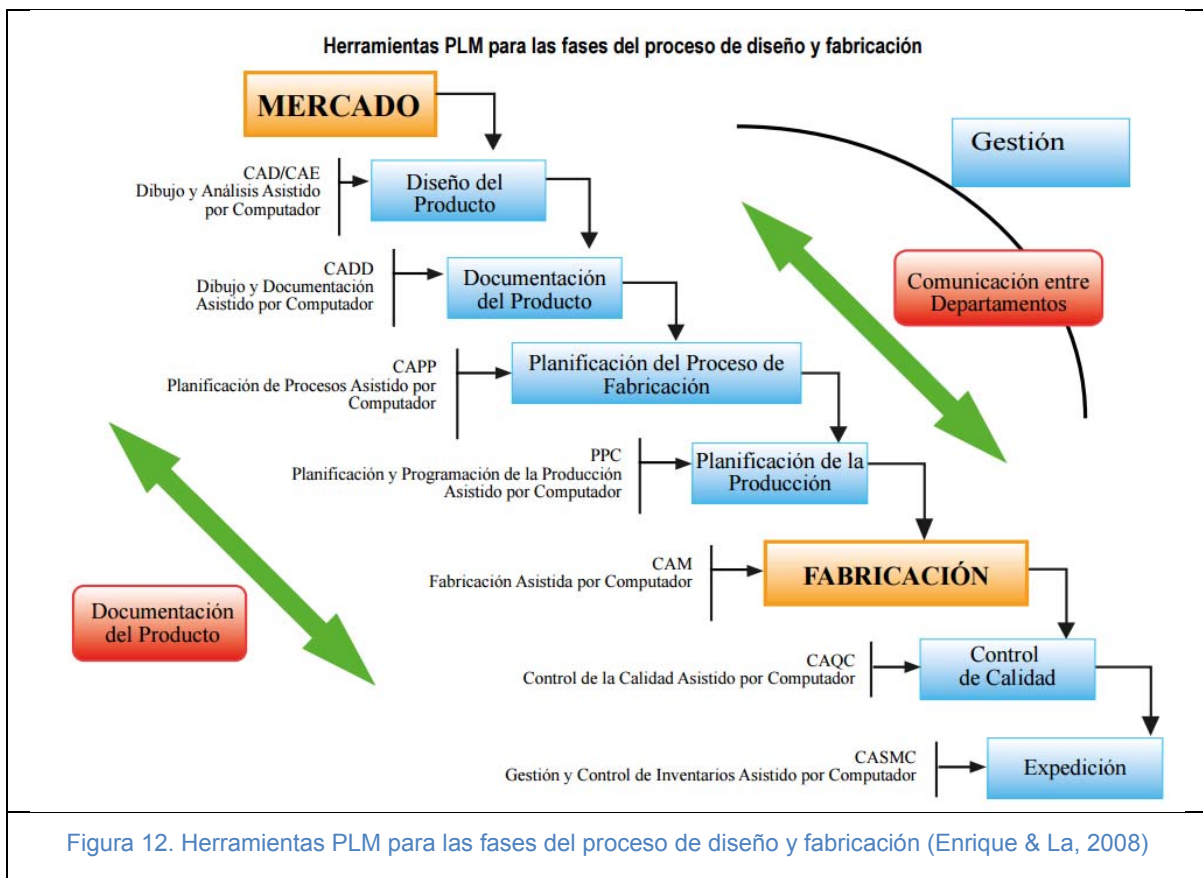


Figura 12. Herramientas PLM para las fases del proceso de diseño y fabricación (Enrique & La, 2008)

En la actualidad “(..) las soluciones PLM son herramientas integradoras, que en su conjunto permiten administrar y ejecutar los proyectos de diseño y desarrollo a lo largo de sus ciclos de vida(....)”(Riba & Molina, 2006) (Figura 12 y Figura 13)



“A diferencia de los sistemas iniciales de gestión de la información de producto, PDM (*Product Data Management*) en que se gestionaba la información referente a geometría y función de los productos, en la actualidad los sistemas informáticos de gestión integrada de la información de productos durante su ciclo de vida, PLM (*Product Lyfe-cycle Management*), dan soporte desde la definición de la información del producto “de la cuna a la tumba”. Esta información se proporciona en formas y lenguajes comprensibles para los diferentes interesados, desde los ingenieros al personal de fabricación o de recursos humanos. Se centra en la información que debe ser administrada para apoyar esa vida”(Ullman, 2008).

Como se muestra en la Figura 13, un sistema PLM se estructura en seis tipos de información y se centra en las actividades que ocurren durante la vida, PLM de un producto (Ullman, 2008).

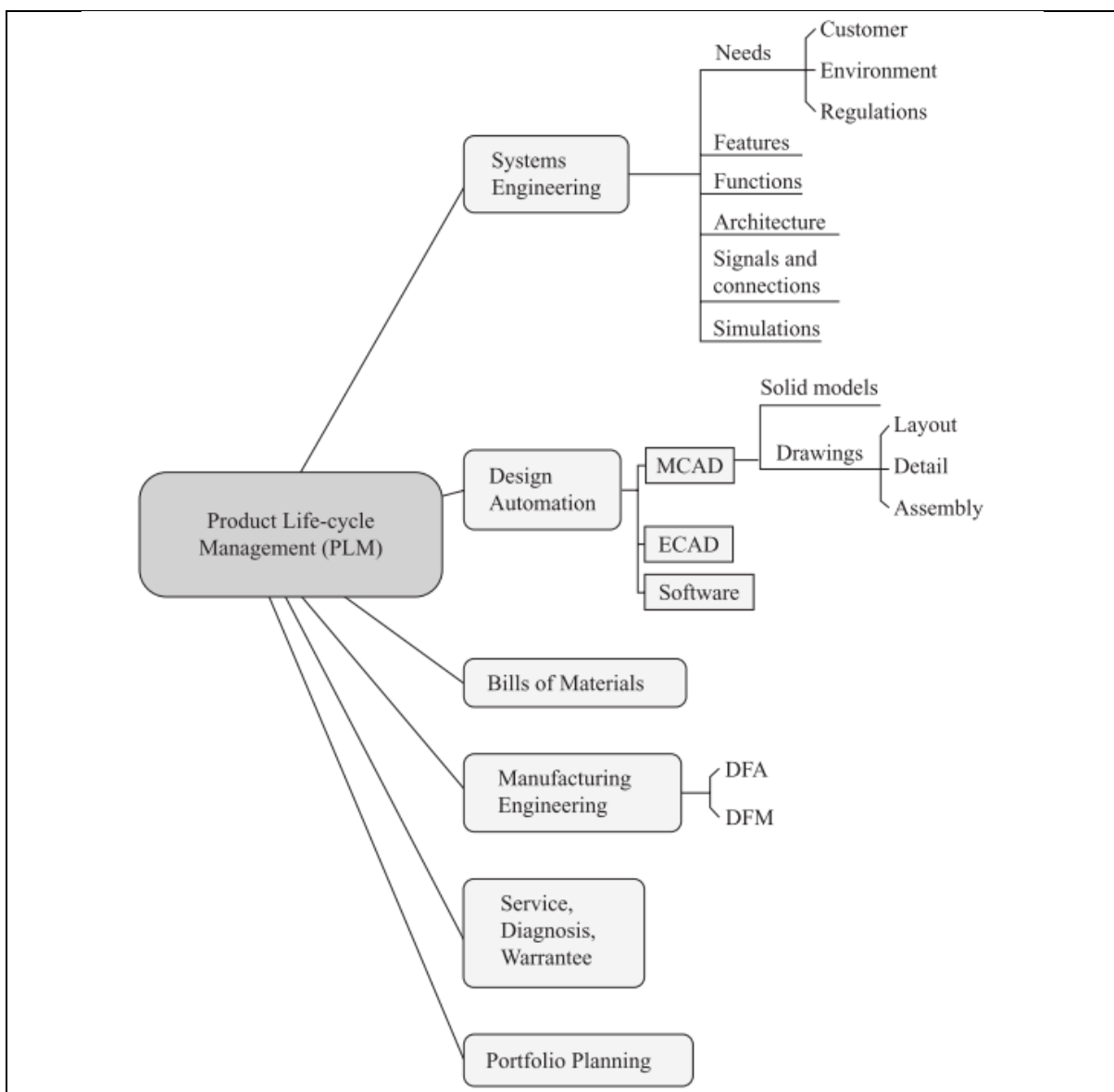


Figura 13. Gestión del ciclo de vida del producto (Ullman, 2008)



“Del mismo modo es importante destacar que la introducción de estas tecnologías no pretende desplazar, automatizar o reemplazar las habilidades y el conocimiento técnico de los humanos. Más bien pretende servir como medio de apoyo y de facilitación, frente a las limitantes de la colaboración a distancia en los procesos de ingeniería concurrente “ (Riba & Molina, 2006).

Boothroyd y Dewhurst («Boothroyd Dewhurst, Inc.», 2015) desarrollaron un software de soporte informático de diseño para la fabricación y el montaje, disponible en la actualidad. Se centra en mejorar la eficiencia de montaje de los productos y en una elección de los materiales y procesos de fabricación óptimos, (Bogue, 2012).

2.5. Resumen del capítulo

La metodología DFMA es una herramienta potente de mejora de un diseño, que por lo general ayuda a conseguir reducir los recursos necesarios para la fabricación y el montaje de una máquina con la consiguiente reducción de los costes de producción.

Se trata de un un proceso iterativo en el que se va depurando el diseño, siguiendo unas etapas y con las características de la ingeniería concurrente. Complementa el proceso de diseño clásico, pero enfocado a la simplificación del diseño según directrices DFA o DFM y haciendo uso de las herramientas de soporte digital disponibles.

En proceso de rediseño, en general, es importante poder aprovechar el conocimiento de diseños previos y en lo posible automatizar las tareas, haciendo uso de bases de datos de diseños similares.

No obstante, en el campo de equipos industriales y concretamente en el rediseño del elemento base de construcción electrosoldada, la cual requiere de muchos recursos materiales y de mano de obra, se dispone de metodologías de carácter general.

Se ha investigado métodos de DFMA desde metodologías generales hasta especializadas en temas concretos y se ha considerado de gran utilidad facilitar la aplicación de la metodología DFMA al conjunto estructural de una bien de equipo, de construcción electrosoldada.



3. CAPTURA DE FUNCIONES

En las metodologías de diseño, en la etapa conceptual se realiza la identificación de las funciones de una máquina (Pahl et al., 2007; Riba, 2002; Ullman, 2008) y a partir de estas funciones, se procesa su información, descomponiendo las funciones en subfunciones, aplicando luego herramientas de generación de ideas, para conseguir principios de solución para un nuevo diseño. En un rediseño, las funciones se pueden obtener por medio de ingeniería inversa mediante el análisis de la máquina (Ullman, 2008), para comprenderlas en su totalidad.

En todo caso, las funciones de las máquinas que proponen en la literatura de diseño se refieren a las funciones de flujo, esto es, flujo de energía, material e información (Pahl et al., 2007; Riba, 2002; Ullman, 2008).

Las funciones de flujo clásicas se traducen en esquemas de bloques y de flujos entre estos bloques Pahl y Beitz (2007), expresados por medio de esquemas en 2D que tienen por misión expresar la estructura funcional (módulos e interfaces de flujos). En cambio, en la presente tesis deben capturarse y registrarse las funciones mecánicas de las bancadas. Para ello se propone su representación en formato 3D empleando una simbología que cristalice el conocimiento respecto de las funciones mecánicas de las bancadas, obtenidas por medio de análisis exhaustivos del funcionamiento y comportamiento de la máquina, así como con el soporte necesario de las opiniones de expertos conocedores de la misma.

En lo concerniente a las bancadas, lo que las condiciona tiene que ver con unas funciones mecánicas, como son las de:

- soportar cargas,
- de anclaje de la bancada al suelo,
- de fijación de módulos o componentes sobre la propia bancada,
- de permitir la regulación de sistemas mecánicos o piezas,
- de absorber vibraciones o,
- de servir de base o referenciación de otros componentes.

Por ejemplo, al aplicar recomendaciones DFA (apartado 6.4) y al mismo tiempo generar un diseño de la disposición de conjunto del elemento estructural (4.2) según el concepto de diseño heredado de la máquina original, una de las primeras recomendaciones generales es la de establecer un elemento base (Pahl et al., 2007; Pugh, 1991; Riba, 2002; Ullman, 2008). Para materializar este elemento base se recomienda (Riba, 2002, p. 160):

- “Procurar dar las mínimas dimensiones compatibles con la funcionalidad, ya que las sobredimensiones solo disminuyen la rigidez y la resistencia.



- Procurar llenar de material las líneas rectas que unen los puntos más solicitados (rodamientos, apoyo de guías, fuerzas exteriores), ya que así se consigue que el máximo volumen de material trabaje a tracción y compresión, lo que da la máxima resistencia y rigidez a la pieza.
- Es recomendable adoptar una combinación de formas simples (planas, de revolución) que faciliten la conformación. Las partes planas tienen poca consistencia y deben ser reforzadas con nervios o relieves.
- Las formas cerradas siempre son más rígidas que las abiertas, aspecto especialmente relevante en elementos sometidos a torsión y a flexión.
- Conviene que guarden el mayor número de simetrías respecto a las fuerzas aplicadas”.

Si se toma en consideración la segunda recomendación y se aplica en el ejemplo de la Figura 14, en que se muestra un diseño de una rótula, se observa que está construida sobre las líneas de fuerza (en el ejemplo se suponen previamente identificadas).

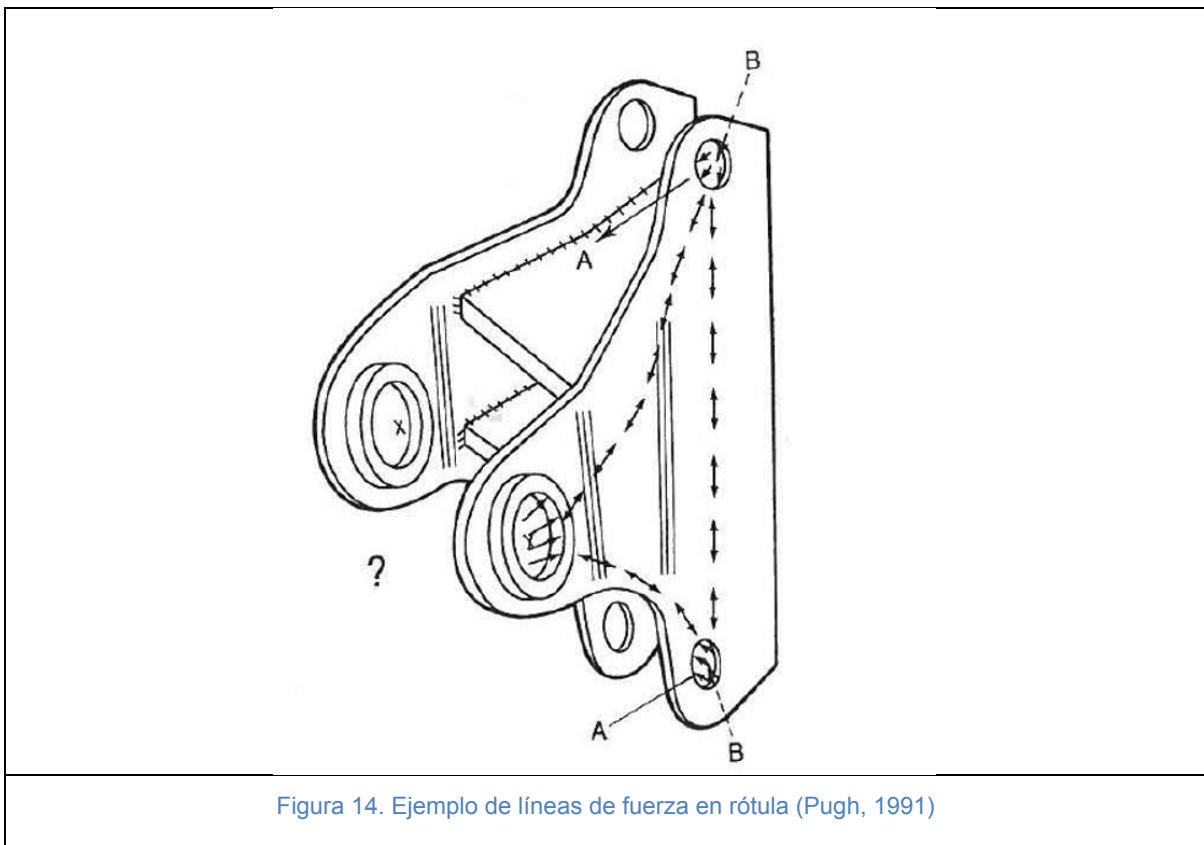


Figura 14. Ejemplo de líneas de fuerza en rótula (Pugh, 1991)

Desde el punto de vista puramente de las líneas de fuerza, si el material se coloca en la mejor posición para soportar estas líneas, el diseño tiende a la opción más simple y más barata de producir, más ligera y con menos material, como en el ejemplo de la Figura 14.



Pero con frecuencia el diseñador está más preocupado por otros condicionantes de un proyecto y no considera desde un principio las líneas de fuerza. Como resultado se elaboran diseños más complejos y más caros.

Una buena identificación por medio de esquemas visuales de las funciones de un elemento base, ayuda a tener presente esta función estructural.

Un sistema DFMA útil, sería un entorno de trabajo de diseño para modelizar geometrías y tener acceso a toda la información relacionada con la fabricación y el montaje, como parámetros críticos de diseño (Albert & Thirupathi, 2009), estudios de reducción de costes, identificación de los factores de mayor influencia en los costes, evaluaciones de fabricabilidad, comprobación de reglas de diseño o evaluaciones y recomendaciones de montaje. Algo parecido a tener un experto en fabricación mirando sobre el hombro del diseñador ofreciendo sugerencias, comentarios e información sobre la fabricación y el montaje (De Fazio et al., 1993).

En esa línea, crear un método de descripción de diseños que pudiera captar la información necesaria para representar las funciones de las bancadas, facilitaría diseñar con mayor simplicidad desde las fases iniciales del proceso de diseño. Esta información debería estar siempre disponible para su consulta por parte del diseñador y el entorno debería incentivar su uso.

En este capítulo se construye unos elementos de representación de funciones para facilitar su utilización eficiente y la toma de decisiones por parte del diseñador, ya desde la generación del concepto de la bancada. Este conocimiento puede servir de referencia en el transcurso del proceso de diseño posterior (materialización y detalle) y evitar cambios que comprometan la funcionalidad de la bancada.

Al ser en formato 3D, puede almacenarse por medio de cualquier software de modelado de diseño, facilitando la inmersión en la ingeniería moderna, basada en modelos 3D utilizados desde la etapa de diseño hasta la etapa de fabricación (herramientas PLM) como es el caso de poder realizar operaciones de mecanizado (CAM) sobre un modelo basado en modelos CAD3D. Para facilitar la comprensión de la simbología, ésta debe ser simple, con información que meramente transmita el conocimiento al diseñador sobre los condicionamientos que ha de tener en cuenta, facilitándole una perspectiva completa de la bancada. En la actualidad los avances del software informático de CAD 3D mecánico permiten utilizar estrategias de diseño *Top Down Design* TDD⁴ (PTC, 2011),

⁴ TDD (*Top Down Design*): En el modelo *top-down* se formula un resumen del sistema, sin especificar detalles. Cada parte del sistema se refina diseñando con mayor detalle. Cada parte nueva es entonces redefinida, cada vez con mayor detalle, hasta que la especificación completa



facilitado por el uso de herramientas de esqueletos que ayudan a coordinar los subconjuntos modelizados ensamblado los conjuntos en CAD 3D, pudiendo servir para anclar la representación de las funciones de la bancada en el nivel más elevado del conjunto.

3.1. Concepto de función y representación de funciones

En el diseño mecánico está muy extendido el uso de la descomposición funcional a partir de los conceptos de función. Para Pahl y Beitz y para Riba (Pahl et al., 2007, pp. 170-171; 2002, p. 126) (Figura 15):

“La función global representa la tarea global que debe realizar el producto que se va a diseñar y se establece como una caja negra que relaciona los flujos de entrada y los de salida. Sin embargo, esta presentación es muy esquemática y, para obtener una representación más precisa, hay que dividir la función global en subfunciones (correspondientes a subtareas) y a la vez, establecer las relaciones de flujos entre estas subfunciones.”

La representación del conjunto de subfunciones con las entradas y salidas así como las interrelaciones de flujos entre ellas se denomina estructura funcional”.

O para Ullman (2008, p. 177):

“(…) función dice lo que el producto debe hacer, mientras que su forma o estructura, transmite cómo va a hacer el producto lo va hacer. (...). La función es el flujo lógico de la energía (incluidas las fuerzas estáticas), el material, o información entre los objetos o el cambio de estado de un objeto causada por uno o más de los flujos”.

es lo suficientemente detallada para validar el modelo («Top-down y bottom-up - Wikipedia, la enciclopedia libre», s. f.).

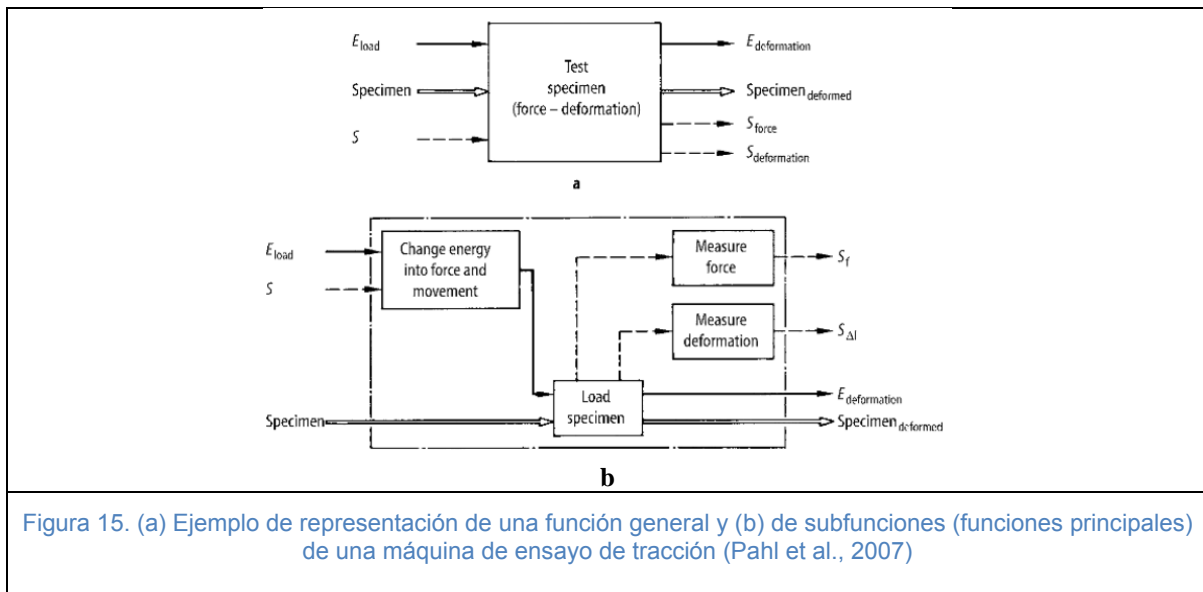


Figura 15. (a) Ejemplo de representación de una función general y (b) de subfunciones (funciones principales) de una máquina de ensayo de tracción (Pahl et al., 2007)

Para la modelización de funciones y del comportamiento de aparatos mecánicos es importante (Summers, Vargas-Hernández, Zhao, Shah, & Lacroix, 2001) destaca la importancia de análisis funcional y presenta la siguientes reflexiones:

“Existen pocas herramientas CAD que faciliten la descomposición sistemática de un problema de diseño en las funciones requeridas, y las que existen a veces no se emplean adecuadamente por diseñadores de ingeniería. El análisis funcional permite que el diseñador tenga la capacidad de ver el diseño completo en las primeras etapas. Además, vincula los objetivos del diseño con los elementos de diseño individuales, evitando así que el diseñador se centre en problemas innecesarios e irrelevantes de diseño (...).

(...) Una solución de diseño desarrollado en la etapa conceptual que satisface las funciones de diseño, puede variar en la etapa de materialización, de forma que puede dejar de satisfacer las funciones anteriores. Posteriormente, en la fase de diseño de detalle, se puede modificar más el diseño, dando un diseño final que ya no satisface las funciones originales deseadas. Esto es, se puede perder los objetivos funcionales originales en los sistemas CAD actuales, durante las fases de diseño y desarrollo del producto”

Diversos autores investigan medios KBE⁵ para capturar información relativa a características de montaje o de fabricación (Feature engineering), construyendo herramientas para el aprovechamiento de los datos relacionados con los productos para su fabricación (Dencovski & Wagner, 2008; Gao et al., 2007; Hirtz,

⁵ KBE (Knowledge Based Engineering) Ingeniería basada en el conocimiento



Stone, McAdams, Szykman, & Wood, 2002), para realizar ingeniería colaborativa compartiendo datos relacionados con las geometrías de las piezas en proceso de diseño en tiempo real (Li et al., 2004; Ma, Tang, Au, & Chen, 2009), o modelos de captura de información de montaje de (Rachuri et al., 2006).

Tiwari (2013) describe un proceso de desarrollo de una herramienta KBE en un entorno CAD aplicada al rediseño de una junta articulada, utilizando una interfaz con el programa *Knowledge Fusion* (KF) de Siemens NX («NX Knowledge Fusion for Designers», s. f.) para realizar ensamblajes mecánicos estándar y considera que el diseñador dedica la mayor parte de su tiempo en la comprensión de los diseños existentes y a las tareas de asociadas a las modificaciones y mejoras en los diseños, haciendo tareas repetitivas de la remodelación de los diseños existentes.

Tiwari (2013) Considera que mediante las herramientas KBE se puede automatizar las tareas de diseño repetitivas por medio de la captura, almacenamiento y la reutilización de conocimientos de diseño y facilitar el proceso de diseño. Esto puede permitir a los diseñadores concentrar su tiempo y esfuerzos en tareas más creativas.



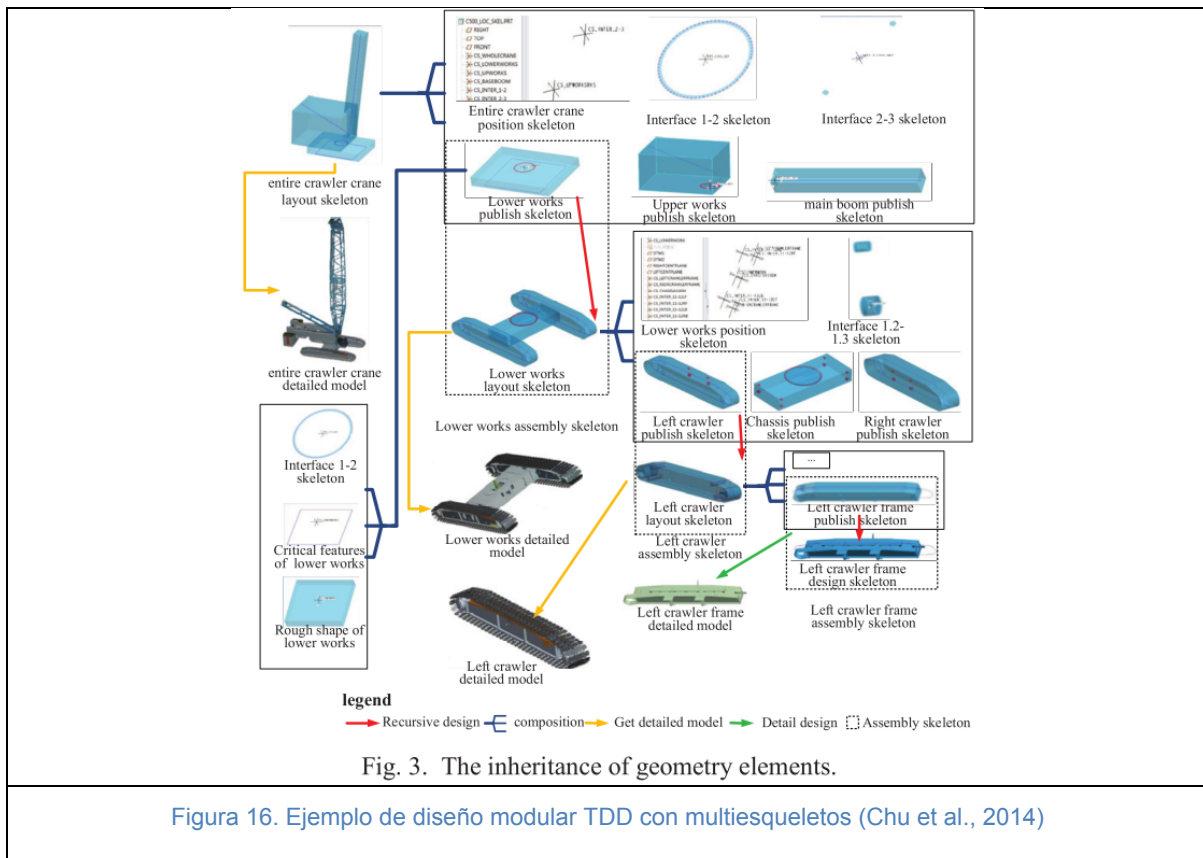
3.2. Posibilidades de CAD.

En este subapartado se explica las posibilidades actuales de las tecnologías CAD para poder hacer uso de los esqueletos para plasmar la representación gráfica de las funciones propuestas por el presente autor en el apartado 3.3.

El CAD 3D actual permite trabajar con esqueletos, que facilitan el diseño modular y la orientación del diseño en el ensamblaje. Entre las ventajas que presenta trabajar con la estrategia de TDD con herramientas CAD según Chu (2014) (Figura 16): destacan:

- Mediante la información de diseño se facilita la transición y de asociación.
- Los módulos de ensamblaje son fáciles de reutilizar, modificar y rediseñar.
- La disposición de diferente nivel de ensamblado se puede utilizar como una base para la visualización, validación y discusión.

(Chu et al., 2014) utiliza la herramienta de esqueletos con la estrategia de poner un esqueleto en cada subensamblaje de un conjunto. En el esqueleto puede añadir espacios o componentes que pueden ser visualizados en los subensamblajes.



(Mun, Hwang, & Han, 2009) resume el uso y la utilidad del modelo de esqueleto en el trabajo colaborativo:

“Los datos del modelo esqueleto deben ser considerados como la geometría subyacente inicial para el modelado CAD. El uso de un modelo de esqueleto permite el modelado conceptual del producto antes de la creación de cualquier geometría sólida y permite el control de las relaciones de padres e hijos directos entre las características sólidas en partes o entre las partes o subconjuntos. Los elementos del modelo de esqueleto son entidades -referencias geométricas, curvas y bocetos- y entidades no geométricas- parámetros, ecuaciones y reglas. Con elementos esqueléticos, es posible especificar con precisión la disposición espacial de los componentes, interfaces entre los componentes, las limitaciones geométricas de componentes, dimensiones de los componentes y la cinemática de los componentes. Sin embargo, un modelo de esqueleto de datos no contiene información que no guarda relación con la definición de la forma de componente o que no es necesario durante el modelado detalle. Por ejemplo, la vida de fatiga o el coste de un componente no se almacenan en los datos del modelo del esqueleto, sino más bien en un documento de requisitos de diseño independiente. (...) La diferencia clave entre el enfoque de modelo de esqueleto y modelado de un conjunto típico de CAD es que en el enfoque de modelo de esqueleto, una restricción de ensamblaje se coloca entre un componente y un esqueleto en lugar de con otro componente. Como los elementos esqueléticos están referenciados



únicamente con ensamblajes, el diseño de los componentes puede llevarse a cabo de forma independiente, sin necesidad de conocer el estado de diseño de otros componentes”.

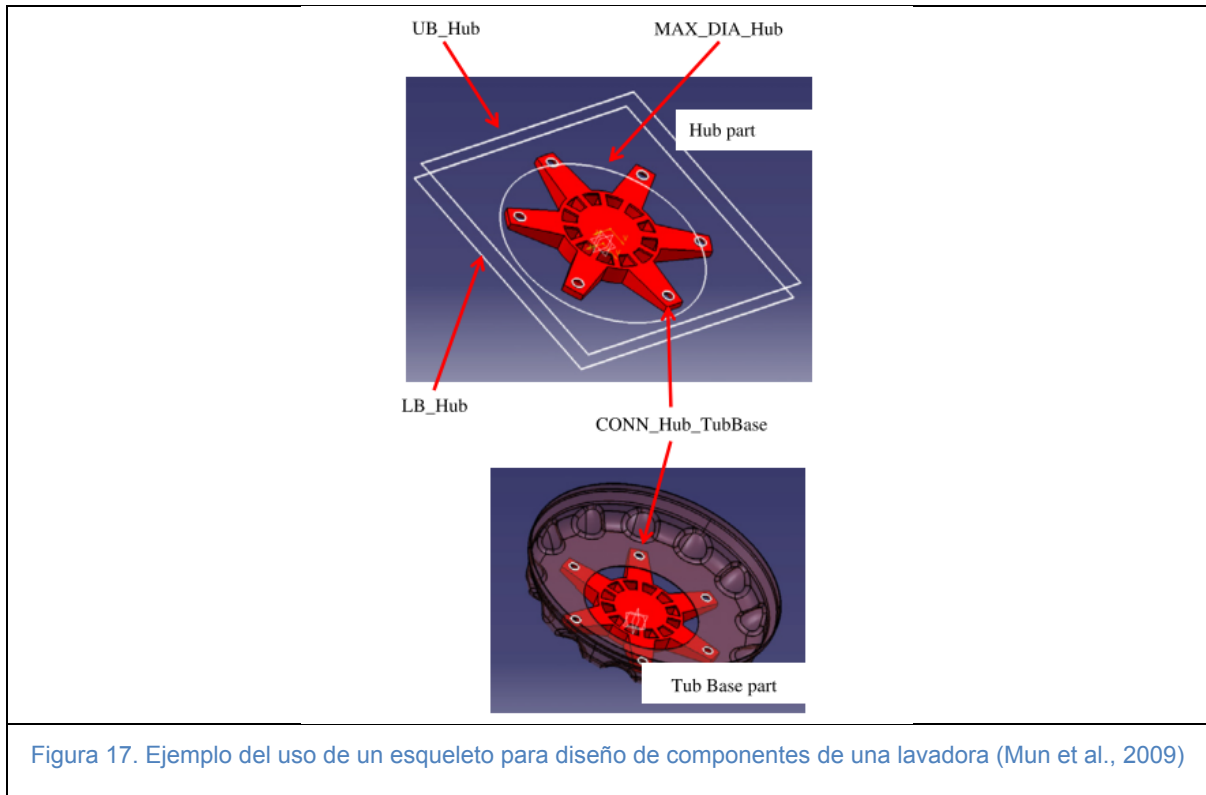


Figura 17. Ejemplo del uso de un esqueleto para diseño de componentes de una lavadora (Mun et al., 2009)

En la Figura 17 se muestra un ejemplo de un esqueleto de una lavadora que contiene una pieza con forma de estrella. Sobre el esqueleto se ensambla una pieza, que queda referenciada únicamente con el esqueleto y con ninguna otra pieza.

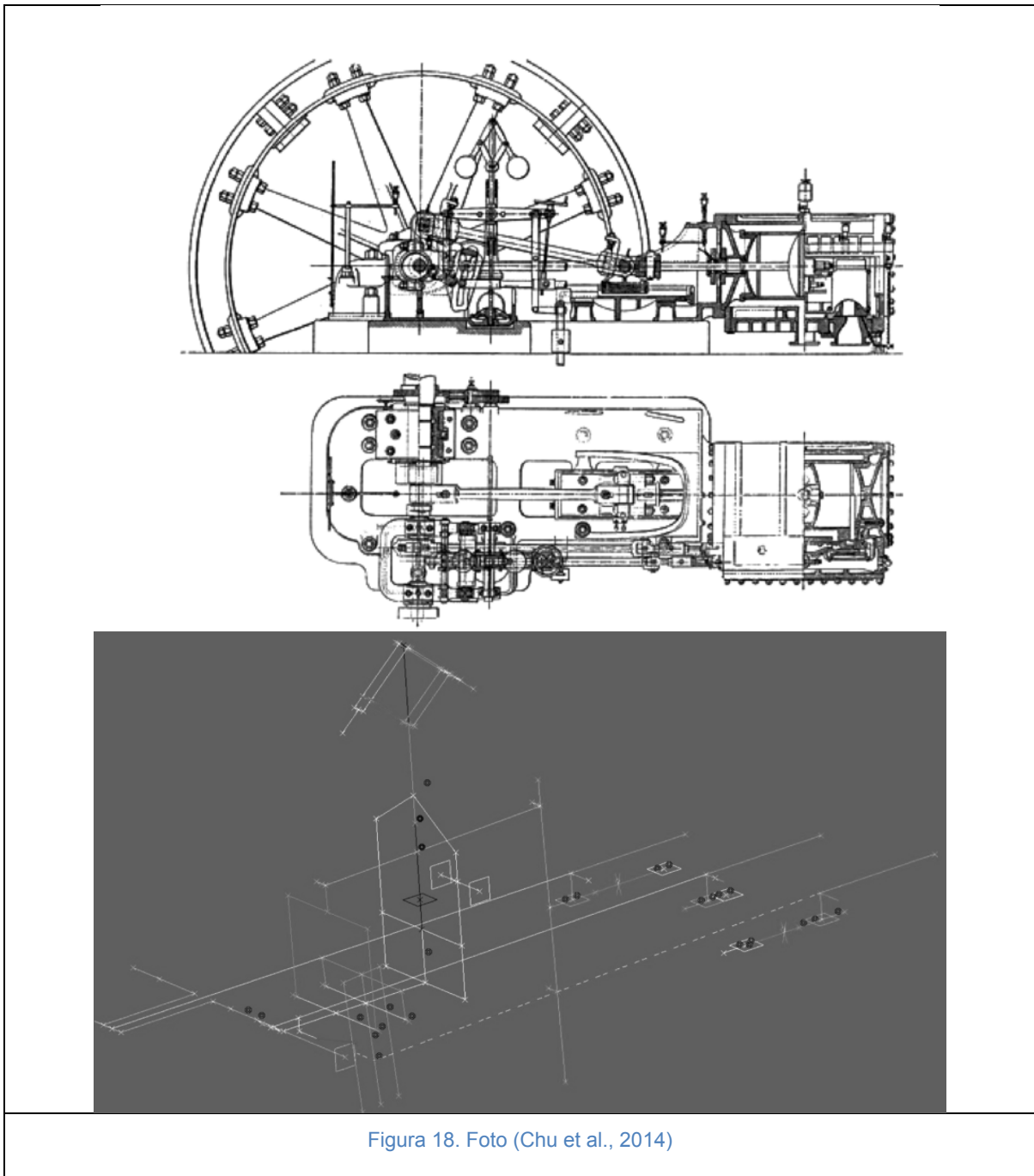


Figura 18. Foto (Chu et al., 2014)

En la Figura 18 se muestra un ejemplo de las posibilidades de modelado en CAD 3D con esqueletos Bernard (2008). Se esquematiza un modelo cinemático con Catia V5R8, de un motor de vapor con sus tres bloques (potencia, regulador y control).



3.3. Representación de las funciones. Identificación, análisis y representación de las funciones básicas de la bancada

Para facilitar los avances en los trabajos de diseño de materialización de la bancada, el investigador generó unos elementos de soporte. Se generó una primera propuesta de elementos en CAD 3D que se fueron desarrollando durante las sesiones de trabajo conjuntamente con el equipo de diseño de la empresa (con lo que hubo también una función pedagógica general).

Estos elementos representan gráficamente ciertas reglas que el diseñador debe tener en cuenta en el momento de poner material a la bancada. Se colocan en una capa del dibujo del programa CAD que puede ser ocultado o suprimido una vez ya se ha realizado el diseño de la bancada y puede consultarse cuantas veces haga falta por diferentes personas, mostrando invariable las funciones de guiado que debe cumplir la bancada. En el propio CAD se guardan los datos de ese elemento en forma de notas y de las propiedades (tamaño) y forma que se le da. Parelamente, se muestran los datos en una hoja de cálculo a modo de leyenda o indicación de los daos contenidos.

A continuación se muestran los elementos básicos recomendables para la bancada del tipo desintegrador:

3.3.1. Elemento de espacio:

Esquelet de funcionalitat					
Permet visualitzar una zona d'entrada de material de forma rectangular.					
Fitxa PMR	(Pas de material per rectangle)	Descripció paràmetre	Símbol	Valors	Unitats
		Longitud	a		mm
		Amplada	b		mm
Nota 1: Aquest element de l'esquelet es pot referenciar amb 9 punts: el centre del pla superior i els 4 vèrtex tant de la cara superior com de la infeior.					

Figura 19. Elemento de condicionamiento de espacio



En la Figura 19. Se muestra el elemento de condicionamiento de espacio. Tiene sección rectangular. Este volumen (con las dimensiones adecuadas, se usa para representar la forma de la tolva de carga de material desde el exterior.

3.3.2. Elemento de par prismático:

Esquelet de funcionalitat		Materialitza un parell prismàtic amb les mesures del dau i la cursa. Permet indicar un muntatge axial, radial o transversal.			
Fitxa PP	(parell prismàtic)	Descripció paràmetre	Símbol	Valors	Unitats
		Alçada del dau	h		mm
		Longitud del dau	l		mm
		Amplada del dau	b		mm
		Cursa	c		mm
		Força radial direcció 1	Fr1		N
		Força radial direcció 2	Fr2		N
		Força transversal 1	Ft1		N
		Força transversal 2	Ft2		N
		Moment axial	Mx		Nm
		Moment radial	Mr		Nm
Moment transversal	Mt		Nm		

Nota 1: Aquest element de l'esquelet es pot referenciar a 9 punts (eixos de simetria de pla mig i dels plans de lliscament)

Nota 2: Es poden elegir les marques de muntatge axial, muntatge radial i muntatge transversal. En cada aplicació cal suprimir les dues opcions no elegides.

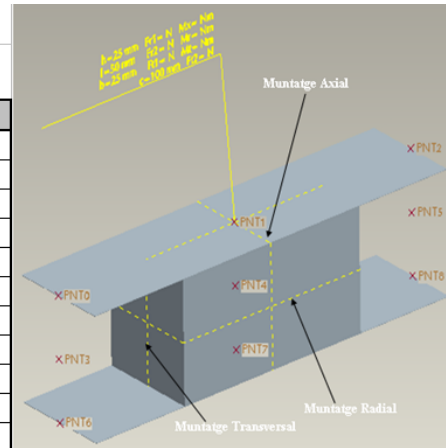


Figura 20. Elemento de par prismático

En la Figura 20 se muestra el elemento de representación de un par prismático en una direcció (de las tres posibles). Está pensado para darle las dimensiones adecuadas según su lugar de montaje. Se puede indicar la carrera máxima y el estado de fuerzas que debe poder resistir. Concretamente servirán para indicar las dimensiones de los portarrodamientos de los cilindros desintegradores, la carrera máxima que pueden realizar sobre las guías y los pesos y fuerzas aplicadas.



3.3.3. Elemento de anclaje de la bancada:

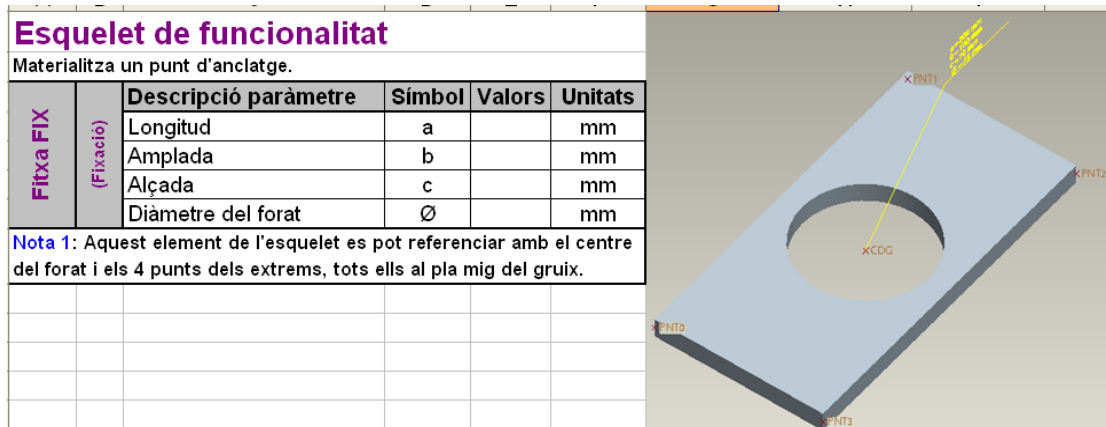


Figura 21. Elemento de anclaje de la bancada

En la Figura 21 se muestra el elemento de representación de una zona de anclaje de la bancada. Se le dimensiona adecuadamente el diámetro del agujero y los cuatro extremos. Este elemento se puede referenciar con el centro del agujero y los cuatro puntos de los extremos en el plano medio del espesor.

3.3.4. Elemento de anclaje de un elemento intermedio:

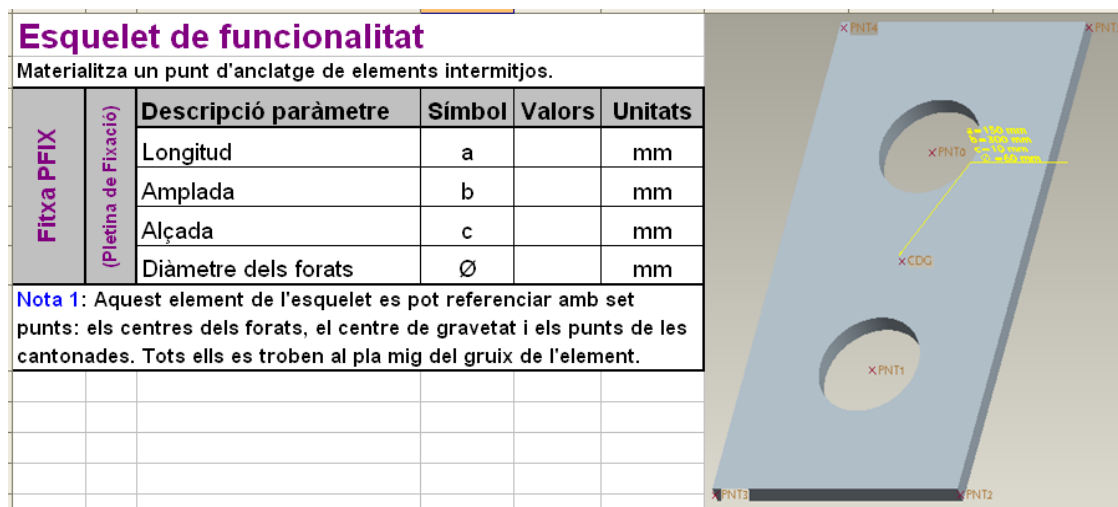


Figura 22. Elemento de anclaje intermedio

En la Figura 22 se muestra el elemento de representación de una zona de anclaje de un elemento intermedio a la bancada. Se le dimensiona adecuadamente los diámetros de los agujeros y los cuatro extremos. Este elemento presenta unas dimensiones de longitud, anchura, altura y de diámetro de los agujeros en mm. Se puede referenciar con 7 puntos, los centros de los agujeros, el centro de gravedad y los puntos de las esquinas. Se encuentran situados en el plano medio del espesor.



3.3.5. Elemento de distancia entre dos elementos:

Esquelet de funcionalitat
Mostra la distància entre elements i/o punts.

Fitxa DIS	Distanciador	Descripció paràmetre	Símbol	Valors	Unitats
		Longitud del distanciador	L		mm
		Tolerància en x	tolx		mm
		Tolerància en eix 1	tol1		mm
		Tolerància en eix 2	tol2		mm
		Força axial	Fx		N
		Força radial 1	Fr1		N
		Força radial 2	Fr2		N

Nota 1: Aquest element de l'esquelet es pot referenciar a 3 punts (centre en un extrem, el pla mig i l'altre extrem)

Figura 23. Elemento de distancia entre elementos

En la Figura 23 se muestra el elemento de representación de una distancia entre dos elementos i/o puntos. Se le da la distancia L, las fuerzas que ha de soportar y las tolerancias. Es un elemento importante para dimensionar las zonas de material de la bancada. Se puede referenciar por medio de 3 puntos, centro en un extremo, el plano medio y el otro extremo.

3.3.6. Elemento de agujero:

Esquelet de funcionalitat
Permet visualitzar la posició d'un forat.

Fitxa Forat	Descripció paràmetre	Símbol	Valors	Unitats
	Aresta 1 (base)	a1		mm
	Aresta 2	a2		mm
	Aresta 3	a3		mm
	Aresta 4	a4		mm
	Amplada	b		mm
	Angle entre arestes 1 i 2	Angle1-2		°
	Angle entre arestes 2 i 3	Angle2-3		°
Angle entre arestes 3 i 4	Angle3-4		°	

Nota 1: Numeració d'arestes en sentit antihorari.

Figura 24. Elemento de representación de un agujero

En la Figura 24 se muestra el elemento de representación de un agujero. Se le da la amplitud "b" y las aristas tienen una distancia y una inclinación concreta, según el agujero que se quiera representar.



3.3.7. Elemento de entrada de material:

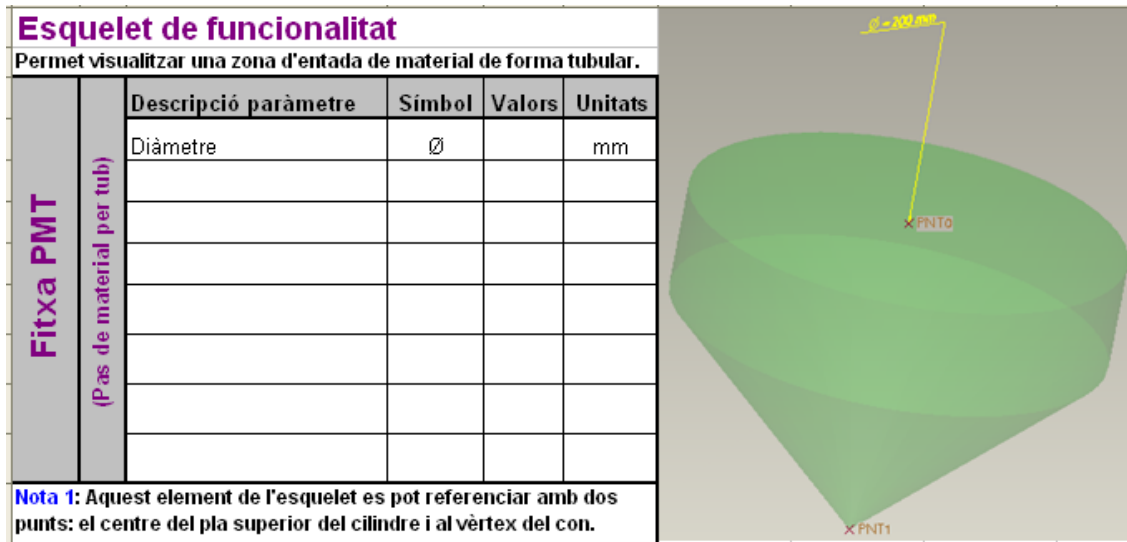


Figura 25. Elemento de entrada de material

En la Figura 25 se muestra el elemento de condicionamiento de zona de entrada de material. Sección de una tolva cilíndrica. Este volumen (con las dimensiones adecuadas, se usa para representar la forma de la tolva de carga de material desde el exterior.

3.3.8. Elemento de volumen ocupado:

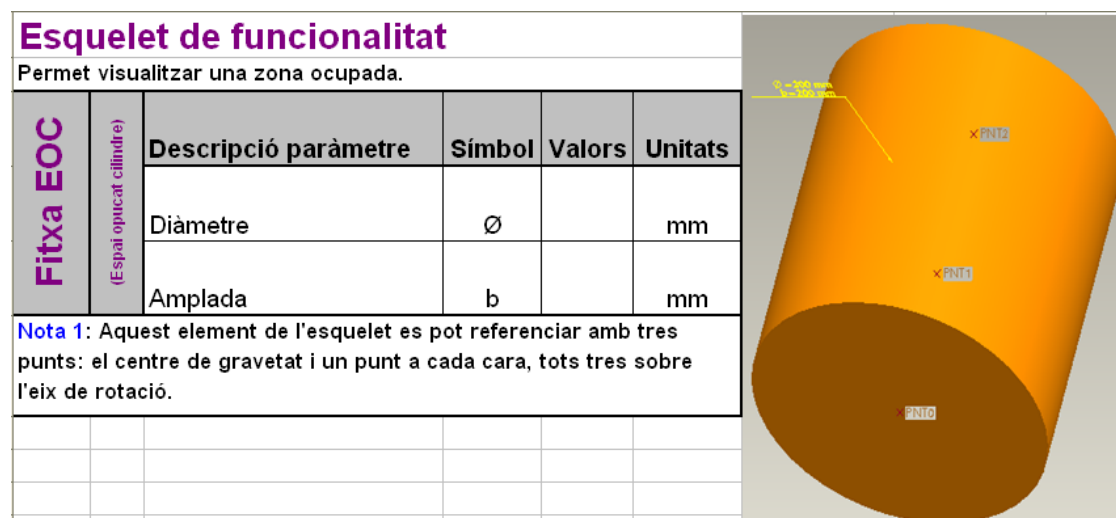


Figura 26. Elemento de volumen ocupado cilíndrico

En la Figura 26 se muestra el elemento de condicionamiento de volumen ocupado. Sección cilíndrica. Este volumen se usa con las dimensiones adecuadas para reservar un volumen cilíndrico de un diámetro concreto.



3.3.9. Elemento de par de revolució:

Esquelet de funcionalitat					
Materialitza un parell de revolució amb les mesures del diàmetre i l'amplada de l'allotjament dels rodaments. Permet indicar un muntatge axial o radial.					
Fitxa PR (parell de revolució)	Descripció paràmetre	Símbol	Valors	Unitats	
	Diàmetre	\emptyset		mm	
	Amplada del dau	b		mm	
	Força radial	Fr		N	
	Força radial axial	Fx		N	
	Moment axial	Mx		Nm	
	Moment radial	Mr		Nm	
Moment transversal	Mt		Nm		
<p>Nota 1: Aquest element de l'esquelet es pot referenciar a 3 punts (centre en els plans anterior, de simetria i posterior)</p> <p>Nota 2: Es poden elegir les línies de muntatge axial i muntatge radial. En cada aplicació cal suprimir l'opció no elegida.</p>					

Figura 27. Elemento de par de revolució

En la Figura 27 se muestra el elemento de representación de un par de revolución. Lo materializa por medio de las medidas del diámetro y la anchura de alojamiento de los rodamientos. Permite indicar un montaje axial o radial. Se pueden indicar las fuerzas y momentos que hay aplicados sobre el elemento.

3.3.10. Elemento de aplicación de una fuerza:

Esquelet de funcionalitat					
Permet visualitzar el punt d'aplicació d'una força (punta del con) i la direcció de la mateixa (inclinació del con).					
Fitxa PFOR (Punt de Força)	Descripció paràmetre	Símbol	Valors	Unitats	
	Força en x	Fx		N	
	Força en y	Fy		N	
	Força en z	Fz		N	
	Deformació en x	Ω_x		mm	
	Deformació en y	Ω_y		mm	
	Deformació en z	Ω_z		mm	
<p>Nota 1: Aquest element de l'esquelet es pot referenciar amb el punt d'aplicació de la força al vèrtex del con.</p>					

Figura 28. Elemento de aplicación de fuerza

En la Figura 28 se muestra el elemento de representación del punto de aplicación de una fuerza (punta del cono) y la dirección de la misma, según la inclinación del cono.



3.3.11. Elemento de entrada de un laberinto:

Esquelet de funcionalitat					
Materialitza un laberint.					
Fitxa LAB	(Laberint)	Descripció paràmetre	Símbol	Valors	Unitats
		Diàmetre	\emptyset		mm
		Amplada	b		mm

Figura 29. Elemento de un laberinto

Figura 29 se muestra el elemento de representación de un laberinto. Para representar un elemento de estanqueidad relevante.

3.3.12. Elementos de representación de un sellado rotativo:

Esquelet de funcionalitat					
Materialitza un element de sellatge rotatiu					
Fitxa SR	(Sellatge rotacional)	Descripció paràmetre	Símbol	Valors	Unitats
		Diàmetre exterior	\emptyset_{ext}		mm
		Diàmetre interior	\emptyset_{int}		mm
		Amplada	b		mm
Nota 1: Aquest element de l'esquelet es pot referenciar amb tres punts: el centre de gravetat i un punt a cada cara, tots tres sobre l'eix de rotació.					

Figura 30. Elemento de un sellado rotativo

En la Figura 30 se muestra el elemento de representación de un sellado rotativo. Este elemento materializa un elemento de sellado rotativo. Se puede referenciar con tres puntos: el centro de gravedad un punto en cada cara, todos en el eje de rotación.



3.3.13. Elementos de representación de una zona ocupada:

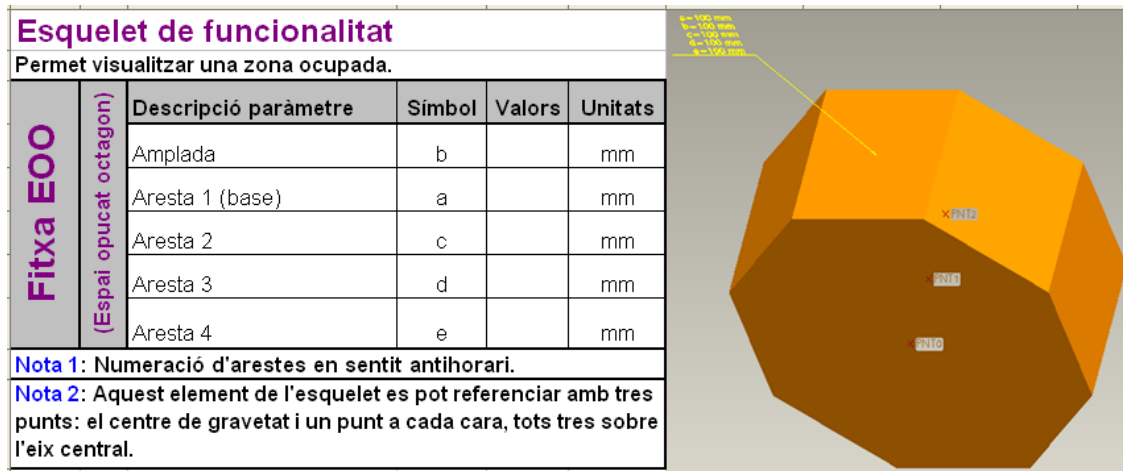


Figura 31. Elemento de de una zona ocupada

En la Figura 31 se muestra el elemento de representación de una zona ocupada con forma octogonal. El elemento permite visualizar una zona ocupada en la máquina. En este caso las aristas se numeran en sentido antihorario. Este elemento del esqueleto se puede referenciar con tres puntos: y centro de gravedad y un punto en cada cara, los tres sobre el eje central.

3.4. Ejemplo de representación de las funciones de un elemento estructural.

Como ejemplo de la representación y su utilidad, se muestra un ejemplo tomado en ocasión del inicio de unos trabajos de rediseño DFMA que la empresa Talleres Felipe Verdés S.L. («TFV», 2015) sucontrató al Centre de Disseny d'Equips Industrials («CDEI-UPC», 2015). Se analizó una amasadora de tierras para la industria.

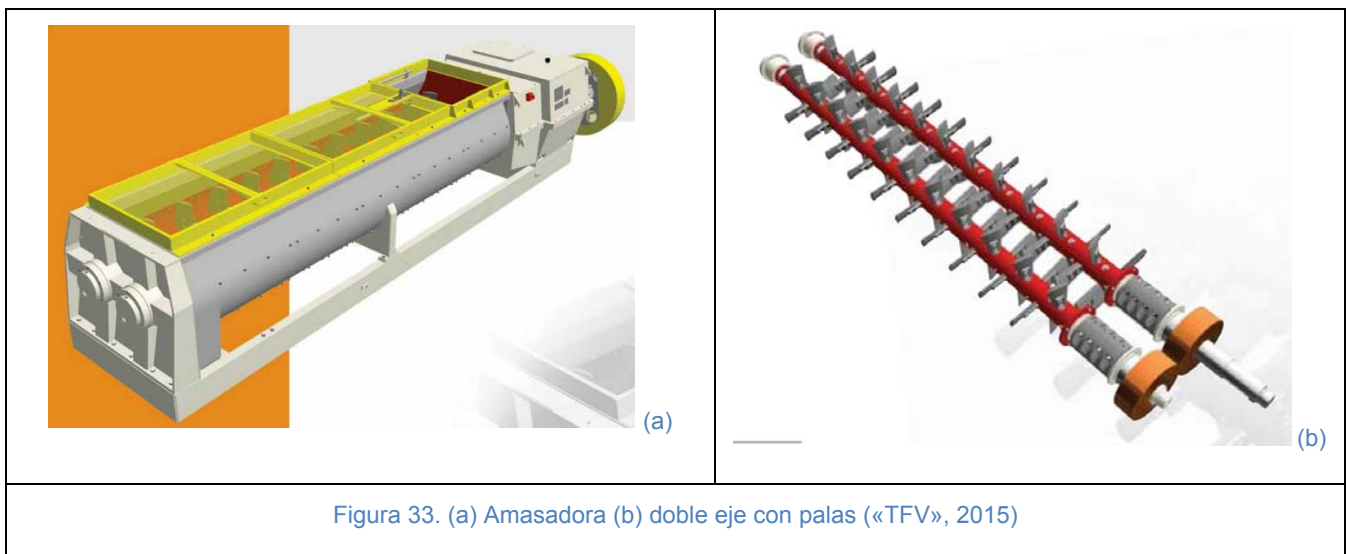
“Las amasadoras de doble eje son equipos fundamentales en el proceso de preparación para asegurar una correcta homogeneidad entre distintos tipos de arcilla y aditivos, así como para la incorporación de agua. La gama disponible alcanza producciones de hasta 180 t/h. La gran eficacia de las amasadoras de doble eje se basa en el diseño y distribución de las palas que aumentan el efecto de amasado conduciendo y presionando el material entre las palas de ambos ejes” («TFV», 2015).



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS / ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ		044D	045C	046C	046S
Longitud útil cuba amasado / Полезная длина корыта смесителя	mm / мм	2710	3500	4180	4360
Ancho útil cuba amasado / Полезная ширина корыта смесителя	mm / мм	940	1070	1250	1540
Capacidad útil cuba amasado / Полезная загрузка корыта смесителя	dm ³ / дм ³	1287	2102	3188	5101
Velocidad giro / Частота вращения валов	r.p.m. / об/мин	16 / 20	16 / 19	16 / 20 / 24	16 / 20 / 24
Potencia / Мощность привода	kw / кВт	22 / 30	45 / 55	75 / 90 / 110	132 / 160 / 200
Producción / Производительность	t/h / т/ч	24 - 38	36 - 60	54 - 120	112 - 208
Peso aproximado / Масса машины, приблизительно	kg / кг	4000	6000	10500	22000
Densidad: 1,6 kg/dm ³ / Удельная масса сырьё: 1,6 кг/дм ³					

Figura 32. Fichas técnicas de amasadoras de doble eje. Cortesía de Talleres Felipe Verdés («TFV», 2015)

En la Figura 32 se muestran datos técnicos de las amasadoras



Al analizar los conjuntos de piezas, se detectó que su diseño emulaba un diseño orientado a la fundición, pero construido por electrosoldadura. Para analizar las funciones mecánicas de la testera, en el extremo izquierdo de la Figura 33 (a), se encontró una excesiva labor de referenciación a la centésima entre piezas de construcción electrosoldada del conjunto estructural electrosoldado, desde un extremo de los ejes al otro, concretamente desde los agujeros de alojamiento de un par de rodamientos del lado de la polea (extremo izquierdo de la Figura 33 (b)), hasta el otro agujero de alojamiento del otro par de rodamientos. La construcción en ese momento de esta bancada se realizaba montando y ajustando secuencialmente las piezas (largueros) con tolerancias de alineación y



dimensiones propias de los alojamientos de los rodamientos. Cada pieza se cortaba por oxicorte. Las uniones entre piezas eran por uniones soldadas y uniones atornilladas.

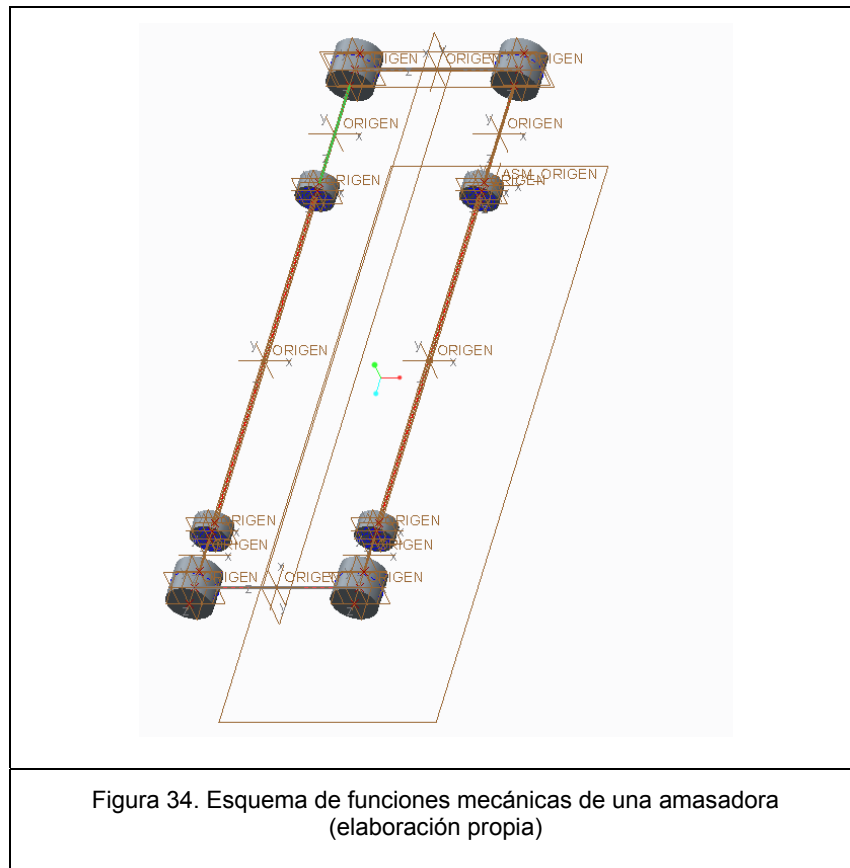


Figura 34. Esquema de funciones mecánicas de una amasadora (elaboración propia)

En la Figura 34 se muestran los elementos de pares de revolución, en los que se sitúan los rodamientos de los ejes. Se observa la representación de elementos distanciadores, que muestran la gran distancia entre los rodamientos de los dos extremos.

Con esto, se detectó que:

- por una parte, los rodamientos debían estar alineados con estrechas tolerancias para evitar que estas uniones móviles estuvieran forzadas, debido al movimiento de los ejes),
- por otra parte, dada la gran longitud de los ejes, los pequeños errores a lo largo de la
- sumado a las grandes fuerzas radiales que sufren los propios ejes debido al procesos de amasado de las tierras que comprimidas entre ellos, las referencias por medio de las piezas de la bancada desde un extremo al otro de los ejes para un trabajo de construcción soldada manual de tales dimensiones no tenía ningún efecto práctico en el funcionamiento de la máquina.



Ello permitió enfocar un diseño con tolerancias mayores y con piezas que no requerían operaciones de mecanizado, ajuste y construcción tan exigentes.

3.5. Resumen del capítulo

En el presente capítulo se ha mostrado la importancia de diseñar un elemento base visualizando las funciones mecánicas que debe cumplir desde el principio, para evitar desviaciones del diseño óptimo, como por ejemplo detectar las líneas de fuerza para adaptar el cuerpo del conjunto estructural a ellas.

Además de las líneas de fuerza, se tiene otras funciones mecánicas, las cuales, en general serían las de soportar cargas, de anclaje de la bancada al suelo, de fijación de módulos o componentes sobre la propia bancada, de permitir la regulación de sistemas mecánicos o piezas, de absorber vibraciones o de servir de base o referenciación de otros componentes

En la presente investigación, se ha elaborado una simbología de representación de funciones mecánicas de una bancada de una máquina, las cuales pueden facilitar la captura de la información de las funciones citadas, las cuales son fruto del conocimiento profundo de expertos de diferentes disciplinas y de la máquina en general. Ello permitiría tener “consultar” en la pantalla del equipo informático las funciones de la bancada que se está rediseñando.



4. NORMALIZACIÓN DE MATERIALES Y PROCESOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LAS MÁQUINAS

En el diseño de máquinas, las piezas a fabricar requieren una secuencia de procesos diferentes. En muchos casos hay un proceso de conformación inicial, a continuación un proceso de retirada de material y finalmente un proceso de acabado. Es decir, se utiliza combinaciones de procesos para cada pieza. Uno de los objetivos del análisis de DFMA es la simplificación de la estructura del producto y la consolidación de las piezas. La experiencia demuestra que en general es más económico hacer el mejor uso de las capacidades del proceso de fabricación inicial con el fin de proporcionar la mayor cantidad posible de atributos necesarios de una pieza (Ashby, 2011; Boothroyd et al., 2002; Riba, 2008).

Elegir correctamente los procesos de fabricación de una pieza o componente tiene una gran repercusión en su funcionalidad y su coste, objetivos principales del DFMA. Las decisiones tomadas en la fase de diseño sobre fabricación afectan a un gran número de aspectos posteriores que tienen una gran incidencia en los costes del producto (tipo de proceso de fabricación necesario, maquinaria, herramientas e instrumentos de medida, manipulación, transporte interior, almacenaje, etc) así como un gran peso a la hora de escoger entre fabricación propia, subcontratación o compra de productos semielaborados.

Para ayudar en la identificación de los materiales y referencias necesaria, es recomendable comenzar de una estructura de diseño (arquitectura) que permita una combinación de los procesos de fabricación y del aprovechamiento de los materiales que minimice los recursos empleados. Las decisiones tomadas en la fase de diseño sobre fabricación afectan a un gran número de aspectos posteriores que tienen una gran incidencia en los costes del producto (tipo de proceso de fabricación necesario, maquinaria, herramientas e instrumentos de medida, manipulación, transporte interior, almacenaje, etc) así como un gran peso a la hora de escoger entre fabricación propia, subcontratación o compra de productos semielaborados (Riba, 2008).

El elemento base de la máquina, la bancada, es el elemento estructural que sirve de soporte y referencia a los mecanismos y demás componentes y piezas que se montan sobre él, por lo que su diseño comporta la diseñar la estructura de diseño de la máquina (arquitectura). El diseño de este elemento base es particular para cada máquina y, en bienes de equipo, es frecuente que se construyan en base de elementos moldeados o, en base a elementos semi-elaborados. En la Figura 35 (a) se muestra un ejemplo de una bancada de una máquina herramienta. En la Figura 35 (b) se muestra una bancada de un equipo industrial fase de construcción. En la Figura 35 (c) se muestra una bancada mecano soldada.



El diseño de este elemento base es particular para cada máquina y, en bienes de equipo, es frecuente que se construyan en base de elementos moldeados o, en base a elementos semi-elaborados. En la Figura 35 (a) se muestra un ejemplo de una bancada de una máquina herramienta. En la Figura 35 (b) se muestra una bancada de un equipo industrial fase de construcción. En la Figura 35 (c) se muestra una bancada mecano soldada.

El diseño conceptual general conceptual de la bancada ya implica una referencia de los formatos de los materiales, componentes y procesos de fabricación con que se diseñarán las piezas.

La determinación de la estructura de diseño de la bancada ha de contemplar factores de modularidad, de coherencia global entre las tecnologías de procesos y formatos de materiales a utilizar, como sustituir procesos de corte y soldadura por plegados.

Una estrategia con resultados innovadores en el diseño de bancadas de máquinas es la de agrupar los materiales que se van a utilizar en el diseño, de una forma coherente, aprovechando las características comunes de los materiales semielaborados:

- diseñando con mismos materiales (aceros, aluminios, etc.),
- unificando espesores,
- unificando acabados superficiales,
- unificando calidades,
- unificando los recubrimientos.



4.1. Simplificación de procesos y materiales

Cada material tiene unas propiedades y es adecuado para unos determinados procesos de conformación. A partir de las funciones y la forma que se pide a un componente, hay que buscar la sinergia entre material y proceso de conformación:

- Por ejemplo, trabajar con chapas o perfiles metálicos y procesarlos con equipos de tecnologías avanzadas de corte (p.e. oxicorte, láser, plasma) y de plegado por control numérico permite una flexibilidad en el diseño que puede suponer una simplificación drástica del diseño y de las operaciones de fabricación y montaje.
- Por ejemplo, aprovechando la flexibilidad en la ejecución de cortes trazando geometrías complejas, o mediante el marcado láser o con plasma se puede referenciar y posicionar otras piezas, reduciendo errores humanos posteriores en la fase de construcción. Además, ello puede permitir un almacenaje y alimentación automatizados de las herramientas de corte, reduciendo los espacios requeridos para el almacenaje.
- Aprovechar las propiedades de aceros de alto límite elástico puede permitir ejecutar construcciones más ligeras, como por ejemplo utilizando materiales de SSAB, («SSAB», s. f.), que permiten reducir el peso de vehículos de transporte, permitiendo transportar más carga útil.
- Utilizar chapas con recubrimiento de protección, que se pueden troquelar y unir con roblones o uniones atornilladas, puede ahorrar una operación de pintado por motivos estéticos o con objetivos de protección anticorrosión, los cantos podrían ser cortados con punzón autoprotendiendo el área cortada y obteniendo bancadas más ligeras punzonadas con los cantos protegidos p.e. Galvalume, («Galvalume», s. f.). Por ejemplo los chasis las lavadoras de Girbau son de perfil mecanosoldado con imprimación y pintura epoxi de alta resistencia, bombos y envolventes en acero inoxidable AISI-304 y paneles en acero inoxidable AISI-304 o chapa Galvalume (aluminio y zinc) con imprimación y pintura epoxi (Hou, Hei, Wang, Cao, & Zhao, 2014)(«Automática e Instrumentación», 2004)
- Por medio de corte por láser o plasma (según espesores y calidades) se puede disponer de piezas con pestañas que sirven de autoreferenciación y autograpado con otra u otras piezas, facilitando las operaciones de montaje.

Para cada caso la empresa debe evaluar y decidir el grupo de procesos y materiales más idóneo para la bancada de su máquina. Asimismo también debe decidir que tecnologías de fabricación, que materiales o que componentes utilizará, adquirirá o subcontratará. Estas acciones se engloban dentro del diseño para la fabricación DFM, consistente en simplificar de una manera coherente y ordenada y organizada las tecnologías y materiales a utilizar.



Hay que tener en cuenta también nuevos métodos desarrollados que facilitan la elección del proceso de operación como por ejemplo la investigación de Cortés (2012) para facilitar la selección de un método de corte de chapas metálicas por medio de tecnologías de corte no convencionales, o Munguía (2009) que desarrolla una herramienta de selección de la tecnología de prototipado rápido.

4.2. Diseño de disposición de conjunto apropiado

Diseño para la Producción significa diseñar para la minimización de los costes de producción y los tiempos, manteniendo la calidad requerida del producto. Las decisiones de diseño tienen una influencia crucial en los costes, tiempos y calidad de la producción (Pahl et al., 2007, p. 356).

En el enfoque de Pahl y Beitz (2007, pp. 355-385) hacia la producción y el montaje, ofrece unas recomendaciones de diseño iniciales en relación con la producción, concretamente sobre la repercusión de la estructura de diseño (arquitectura) en la gestión posterior de la complejidad del diseño. Posteriormente, ya entrando en recomendaciones DFA de diseño conceptual y de materialización (que se abordará en el capítulo 6), es importante utilizar geometrías recomendables para cada proceso de fabricación, según las directrices DFM para dar la forma apropiada a las piezas y facilitar las operaciones de fabricación, reducción de material y utillajes. También influye la reducción del número de piezas totales y la facilidad de montaje por medio de diseño DFA.

El diseño de disposición de conjunto apropiado, desarrollado a partir de la estructura de la función, determina la división de un producto en conjuntos y componentes (Pahl et al., 2007, p. 356), y:

- identifica la fuente de los componentes,
- determina el procedimiento de la producción,
- establece las dimensiones y los tamaños de lote aproximados de componentes similares, y también los medios de unión y ensamblaje,
- define los ajustes,
- influye en los procedimientos de control de calidad adecuados

Pahl y Beitz (2007) distinguen tres métodos de construcción de la disposición de conjunto apropiada:

- Método de construcción diferencial
- Método de construcción integral
- Método de construcción compuesto



4.3. Método de Construcción Diferencial

Según Pahl y Beitz (2007, p. 356), el Método de Construcción Diferencial (*Differential Construction Method*) se refiere a la descomposición de un componente (un portador de una o varias funciones) en varias piezas de fácil producción. Esta idea viene del concepto de ingeniería ligera (*lightweigh engineering*) (Kleiner, Geiger, & Klaus, 2003), donde se introdujo este enfoque para optimizar la capacidad de carga. En ambos casos, se aplica el "principio de subdivisión para la producción"

Ello tiene ciertas ventajas e inconvenientes según Pahl y Beitz (2007, p. 356):

Ventajas:

- el uso de materiales semi-acabados o piezas estándar de fácil disponibilidad y a un precio favorable.
- fácil adquisición de piezas forjadas y de fundición.
- adaptación fácil al proceso de fabricación existente de la de la fábrica (dimensiones, peso).
- aumento de tamaño de los lotes de componentes
- reducción de las dimensiones de los componentes que permiten fácil montaje y transporte
- Aseguramiento de la calidad más simple (materiales más homogéneos)
- Mantenimiento más fácil, por ejemplo mediante la simple sustitución de piezas desgastadas
- adaptación más fácil a requisitos especiales
- reducción del riesgo de las fechas de entrega que faltan
- reducción del tiempo de producción global.

Desventajas y limitaciones:

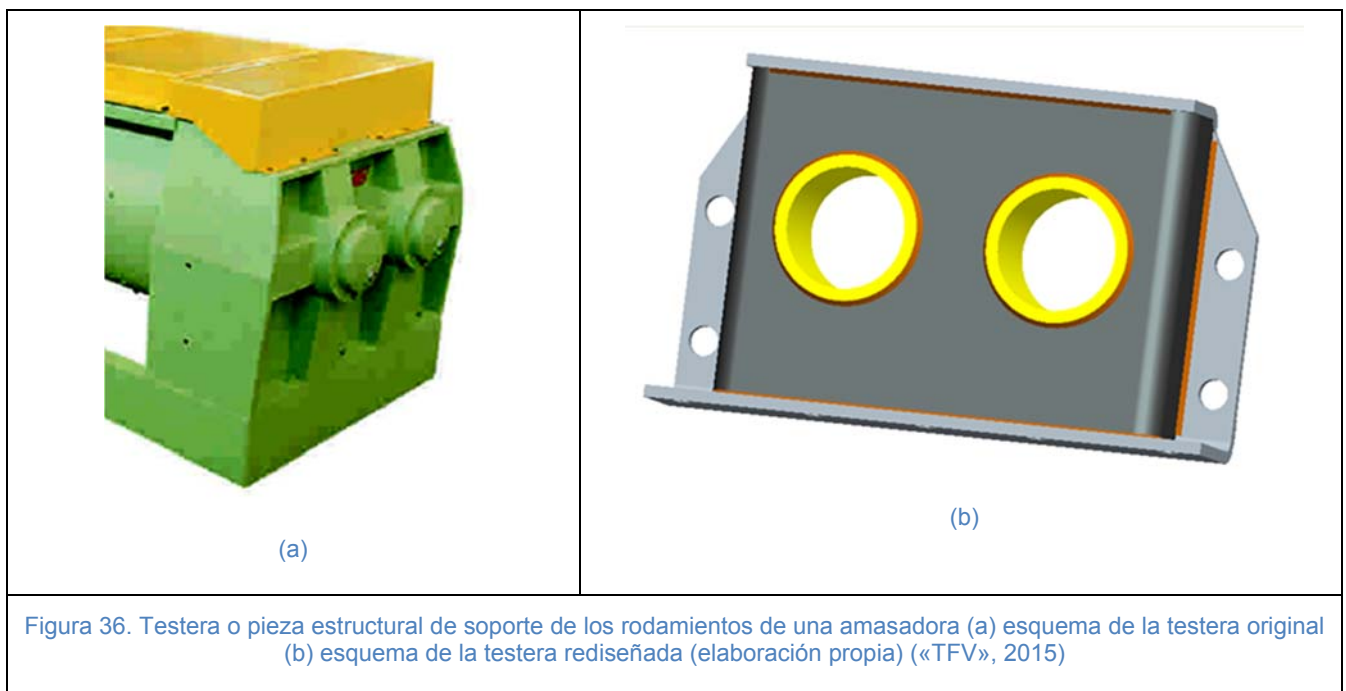
- mayor desemejamiento desembolso
- mayores costes de montaje
- mayor necesidad de control de calidad (tolerancias más pequeñas, encaja necesarias, etc.)
- limitaciones de la función debido a las articulaciones (rigidez, vibraciones, sellado).



A continuación se muestran dos ejemplos en los apartados 4.3.1 y 4.3.2 de rediseños de un elemento base por el método de construcción diferencial de la disposición de conjunto. El ejemplo del apartado 4.3.1 se centra en una testera de una amasadora y el ejemplo del apartado 4.3.2 se centra en el diseño completo de unas pinzas.

4.3.1. Caso de ejemplo: Talleres Felipe Verdés (CDEI-UPC) Testera amasadora.

Continuando con el caso del apartado 3.4, se expone el ejemplo del rediseño de la testera propuesto por el CDEI-UPC.



En la Figura 36 (a) se muestra la testera original. Es una pieza de construcción por oxicorte y soldadura con piezas de espesores diferentes.

El rediseño de la testera, Figura 36(b), presenta una estructura de construcción diferencial por medio de corte láser y plegado por control numérico ha facilitado:

- la autorreferenciación,
- el uso de chapas del mismo espesor,
- en las sustitución de cortes y uniones soldadas por doblados,
- mayor simplicidad de montaje,
- piezas más simples.



4.3.2. Caso de ejemplo: Plasfi (CDEI-UPC). Cabezal de sujeción para la manipulación de bolsas.

El diseño del mecanismo para la abertura de bolsas de la Figura 37 que diseñó el CDEI-UPC para la empresa Plasfi, presenta una construcción diferencial, en la que todas las piezas (incluidas las dentadas) son planas, del mismo espesor obtenidas por corte de láser.

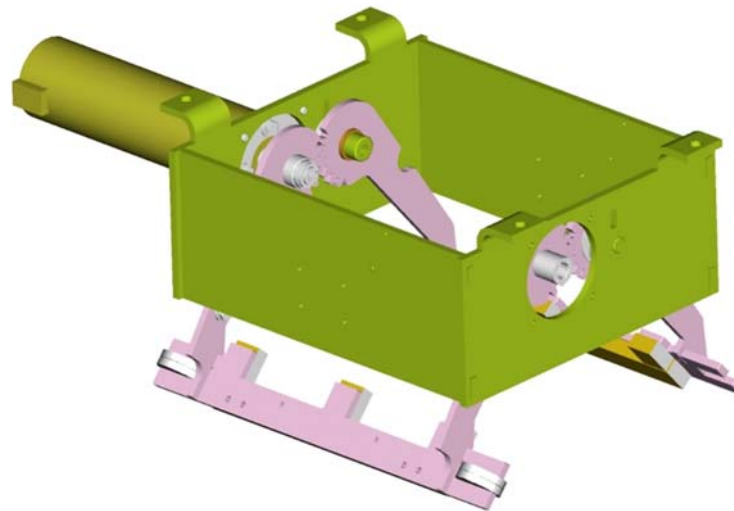


Figura 37. Cabezal de sujeción para manipulación de bolsas. Cortesía de Plasfi («Plasfi», s. f.)

En este caso, se ha normalizado el proceso de fabricación, el corte por láser.

Ello ha llevado a poder evitar otros procesos de fabricación secundarios como mecanizaciones no funcionales (ya que el corte por láser permite conseguir geometrías complejas), tratamientos térmicos o recubrimientos posteriores al aprovechar las propiedades del acero inoxidable.

También se ha normalizado los materiales:

- Chapa de acero
- Todas las chapas son del mismo espesor.
- Todas las chapas son del mismo material.
- Hacer todo de una misma chapa.
- Todas las piezas son planas

Ello ha permitido realizar las piezas con las siguientes características de diseño:



- Todas las piezas están cortadas con láser.
- Los engranajes se cortan también con láser.
- Se agrupan (nesting) y se optimiza la chapa de material semielaborado.
- Los engranajes son pinzas, es decir tienen multifunción.
- Los dentados son asimétricos, ya que si no habría interferencia no engranarían, pero al ser de corte por láser se gestiona la posición de las piezas para optimizar el material.
- Son procesos de baja serie.
- Tienen elementos de autoreferenciación.

4.4. Método de Construcción Integral

Pahl y Beitz (2007, p. 359) se refieren por Método de Construcción Integral (*Integral Construction Method*), a:

“(...) la combinación de varias partes en un solo componente. Ejemplos típicos son arrojados construcciones en lugar de construcciones soldadas, extrusiones en lugar de secciones conectadas, soldadas en su lugar de uniones atornilladas, etc. Este método se utiliza a menudo para la optimización del producto debido a los beneficios económicos de la integración de varias funciones en un componente. Este método puede de hecho ser una ventaja para técnicas específicas, producción y adquisición situaciones, en particular para mano de obra intensiva producción.

Las ventajas y desventajas del método de construcción integral son fácilmente determinados a través de una inversión de las ventajas y desventajas del método diferencial”.

A continuación se muestra dos ejemplos en los apartados 4.4.1 y 4.4.2 de rediseños de un elemento base por el método de construcción integral de la disposición de conjunto. El ejemplo del apartado 4.4.1 se centra en un puente de una mesa de 3 ejes y el ejemplo del apartado 4.4.2 se centra en el elemento base de una máquina de relajación muscular.



4.4.1. Caso de ejemplo: Roglan Equipment (CDEI-UPC). Puente de mesa de corte de lona de 3 ejes.

En la Figura 38 se muestra el equipamiento de corte de lona formado por una mesa y un puente que se desplaza a lo largo de ella. Sobre el puente hay un cabezal que desplaza sobre aquel.



Figura 38. Máquina de 3 ejes de corte de lona (cortesía Roglan Equipment)

El puente es el elemento móvil sobre el eje X de la máquina. Sus funciones principales son posicionar las herramientas en esta dirección y soportar el guiado del cabezal en el eje Y. Constructivamente el puente original Figura 39 consistía en un núcleo longitudinal y dos soportes laterales como elementos estructurales. Se añadían un conjunto de carenados con funciones de protección y de acabado estético.

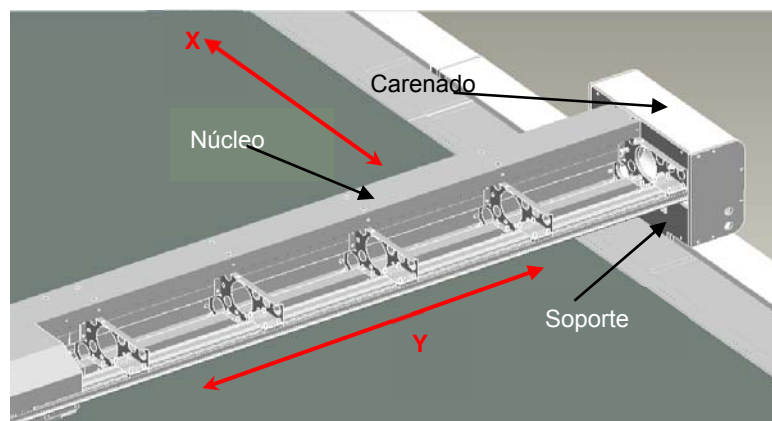


Figura 39. Estructura del puente original (cortesía Roglan Equipment)

El núcleo se construía por medio de uniones atornilladas de las chapas de acero cortadas en láser y plegadas (Figura 40).

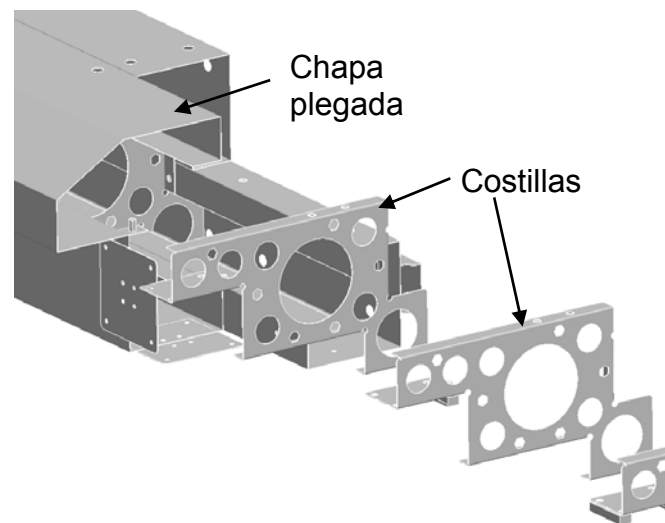


Figura 40. Solución constructiva del puente original (cortesía Roglan Equipment)

El rediseño DFMA del puente se basa en la construcción del núcleo por medio de una extrusión de aluminio (Figura 41). Los soportes laterales se mantienen de chapa de aluminio.

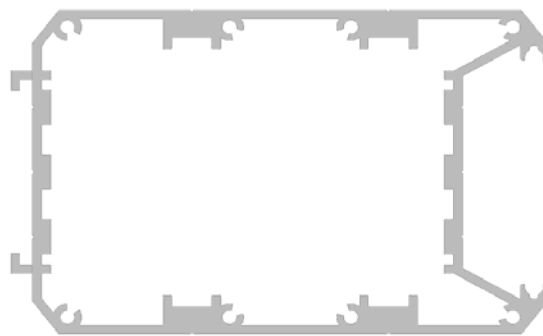


Figura 41. Perfil de aluminio diseñado (cortesía CDEI-UPC)

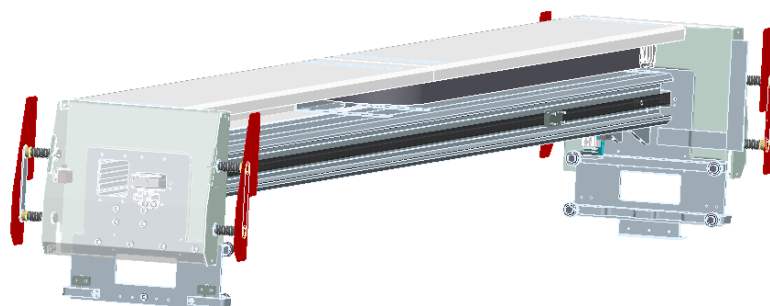


Figura 42. Puente rediseñado (cortesía CDEI-UPC)

El nuevo diseño del puente (Figura 42) presenta una estructura de diseño integral y presenta los siguientes beneficios

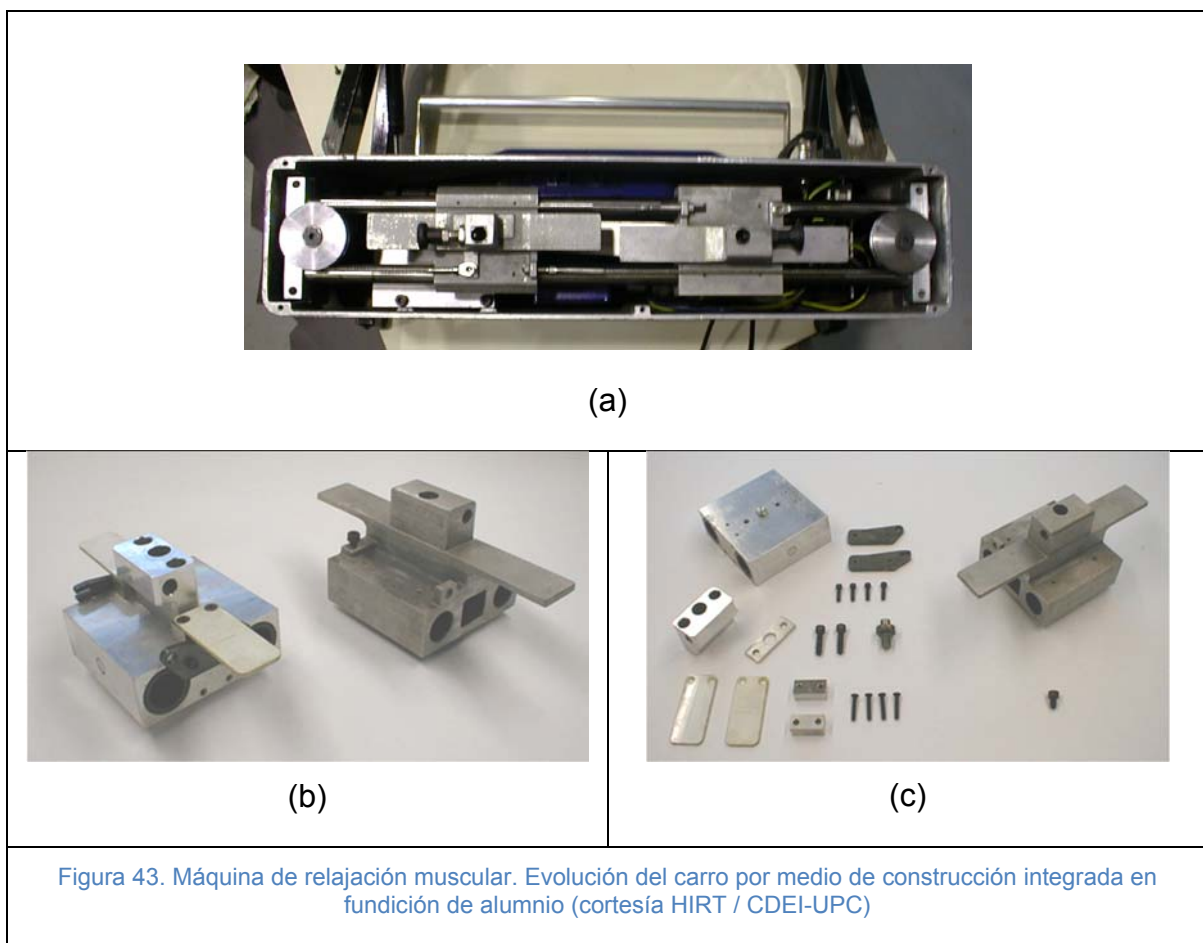


- Ratio rigidez / densidad mejorado, posibilitando mejoras en la operativa del corte.
- Mejoras en la fabricación y el montaje: el núcleo del puente es una sola pieza, se necesitan uniones y es más robusto.
- Reducción de las operaciones de montaje
- Compacidad de la solución: permite implementar de forma óptima diferentes elementos mecánicos y eléctricos.

4.4.2. Caso de ejemplo: Hirt (CDEI-UPC). Máquina de relajación muscular.

El diseño de Figura 43 (a) corresponde al rediseño de correderas de movimiento simétrico (versión mecanizada y versión moldeada) de una máquina de relajación muscular diseñada por el CDEI-UPC.

En la Figura 43 (b) se muestran las dos correderas montadas y en la Figura 43 (c) se muestran las dos correderas desmontadas.





La corredera rediseñada por fundición de aluminio, es una estructura de diseño de construcción integral. Presenta los siguientes beneficios:

- Disminuye el número de piezas a conformar y agrupar en menos tipos de piezas diferentes (aumenta los volúmenes de fabricación)
- Disminuye el número de superficies mecanizadas (centradores, tolerancias, ajustes) y disminuye el número de uniones y enlaces
- Disminuye operaciones de montaje (menos piezas, menos uniones)
- Mejora la fiabilidad (menos piezas e interfaces susceptibles de fallar)
- Mejora la mantenibilidad (facilita el montaje y desmontaje).

4.5. Método de Construcción Compuesto

El Método de Construcción Compuesto consiste en (Pahl et al., 2007, p. 356):

- “la conexión inseparable de varias piezas fabricadas por procesos diferentes a un solo componente que requiere más trabajo; por ejemplo, la combinación de piezas forjadas fundidas
- la aplicación simultánea de varios métodos de unión para la combinación de componentes (...)
- la combinación de diversos materiales para la explotación óptima de sus propiedades (...)”



Figura 44. Chasis de motocicleta. Perfilería y cuerpo de fundición de aluminio soldados (cortesía Derbi («Derbi», s. f.))

En la Figura 44, se muestra una combinación de materiales de características similares y procesos de fabricación diferentes, uniéndolos después y utilizándolos después como una sola pieza. Por ejemplo un chasis de una moto puede tener un cuerpo nervado de fundición de aluminio unido a una estructura metálica de perfiles extruidos, unido por medio de una unión soldada

4.6. Contabilización de los procesos asociados

Después de una cierta elaboración conceptual de acuerdo con las directrices DFA, es necesario analizar los procesos de fabricación de todos los componentes de la máquina, para tomar una decisión sobre la combinación de procesos que pueden optimizar los procesos de fabricación y montaje.

Es recomendable contar con expertos que conozcan procesos de fabricación fuera de los que son “familiares” en la empresa para estar abiertos a considerar nuevos procesos y nuevas combinaciones de procesos (Boothroyd et al., 2002).

En el caso de la construcción electrosoldada, la combinación de los procesos de corte por láser, plegado y mecanizado, permite mucha flexibilidad geométrica para prever detalles que faciliten la referenciación de piezas, ahorren cortes y uniones soldadas y que como resultado, disminuyan la carga de mecanizado. La tecnología de corte por láser además permite aprovechar materiales de mismo espesor agrupados en las mismas chapas a cortar (“nesting”), como se ha visto en los ejemplos de los apartados 4.3.1 y 4.3.2.

Por las propias características de los materiales:



- Los procesos más ahorradores de materiales son los moldeados y los obtenidos por deformación.
- También ahorran los semielaborados (chapas, barras, perfiles) cortados, juntos o curvados, y con pequeñas mecanizaciones.
- La mecanización es el más antiguo-económico de los procesos. Primero se compra el material y luego se reduce una parte en viruta.
- El uso de la mecanización debe estar muy justificado por las funciones del componente, y se debe limitar al máximo posible.

Para la contabilización de los materiales, se propone utilizar una hoja de cálculo.

4.7. Contabilización del material utilizado

Una vez se han normalizado los procesos de fabricación y en base a ellos, es necesario optimizar el uso de los materiales.

Es necesario analizar todos los materiales semielaborados que se utilizan para todas las piezas, ya sean fabricadas en la propia empresa o subcontratadas a empresas externas y unificar los tipos, las referencias.

Con este análisis se busca unificar materiales, calidades, tolerancias, espesores de chapas, diámetros de barras o recubrimientos, como se ha visto en los ejemplos de los casos 4.3.1 y 4.3.2. Así se facilita la identificación de los materiales esenciales y la selección del menor número de referencias diferentes.

También hay que contar con los trabajos de rediseño DFA y DFM que permiten el aprovechamiento del material por medio de geometrías simples, orientadas a procesos de fabricación concretos o aprovechando técnicas de agrupación de materiales de una misma chapa (nesting).

Para la contabilización de los materiales, se propone utilizar una hoja de cálculo.

4.8. Resumen del capítulo

La investigación en el presente capítulo, se ha centrado en combinar los procesos de fabricación y los materiales de una forma que en conjunto resulte óptima.

Se ha estudiado las repercusiones y las posibilidades que tiene la decisión del diseño de la disposición del conjunto, ya que es una decisión inicial y ello condiciona y restringe el resto de decisiones de diseño; elegir correctamente los procesos de fabricación de una pieza o componente tiene una gran repercusión en su funcionalidad y su coste, objetivos principales del DFMA.



También es destacable la importancia que tiene elegir un diseño de la disposición del conjunto adecuada a los procesos de fabricación y materiales a utilizar, siendo la combinación de estos tres aspectos, junto con diseños conceptuales preliminares clave en permitir seleccionar la mejor opción de procesos y materiales, tal como se ha argumentado con soporte de los ejemplos 4.3.1, 4.3.2, 4.4.1, 4.4.2 , en los que se pone de manifiesto los beneficios obtenidos tras la selección de los tres aspectos comentados.

Se propone las etapas de contabilización para normalización tanto los procesos como del uso de los materiales y sus formatos, para así evitar componentes o ejecuciones especiales. Por ejemplo, construir una pieza especial única en lugar de utilizar una pieza normalizada implica un esfuerzo de diseño adicional y además implica gestionar un elemento más en los almacenes, en las compras, etc.





5. EVALUACIÓN DEL DISEÑO DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA FABRICACIÓN Y EL MONTAJE

5.1. Costes y complejidad.

La habilidad de una empresa para ser competitiva en el mercado depende de los costes de producción, de la calidad y de su habilidad de sacar los productos al mercado a tiempo. Para tener un diseño de coste efectivo, todos los asuntos relacionados con los costes se ha de tener solucionados en etapas tempranas del diseño (Asiedu & Gu, 1998; Shehab & Abdalla, 2001) y por ello se ha realizado muchos esfuerzos por la vía de los sistemas KBS con el objetivo de almacenar información de diseños precedentes para reducir los esfuerzos de rediseño y para poder saber los costes del ciclo de vida de un producto . Pugh (1991) fue uno de los pioneros en destacar la importancia de informar de los costes al diseñador.

Como se ha visto en el apartado 2.4.1 mediante la Ingeniería Concurrente se evalúa el coste de ciclo de vida de un producto. En este coste se incluye el coste de fabricación y montaje.

Para Pahl y Beitz (2007, p.538), “[e]s importante identificar los factores de coste lo antes posible y con la mayor precisión en proceso de diseño”, ya que “[d]urante las etapas de producción y montaje hay relativamente pocas oportunidades para reducir costes”.

Se han realizado muchos trabajos de estimación del coste de un producto desde enfoques de modelos paramétricos, análogos y detallados (Asiedu & Gu, 1998):

- En los modelos paramétricos, que se calculan los costes mediante ecuaciones en que se relacionan costes y parámetros de un sistema. Parámetros como la complejidad de fabricación, la familiaridad del diseño, el peso o las prestaciones. Además se tienen en cuenta correcciones estadísticas. Este enfoque no recoge bien de los productos que utilizan las nuevas tecnologías.
- Modelos análogos, en que se realiza la estimación de costes realizado por analogía con productos análogos, en el que hay que tener una opinión experta para poder ajustar los costes del producto similar con el producto objeto.
- En los modelos detallados, se utilizan estimaciones de tiempo, mano de obra y material para estimar los costes directos de un producto o actividad.



El presente trabajo trata de rediseñar un elemento estructural de soporte de una máquina, rediseño que afecta a toda la máquina. Para ello se busca una metodología para crear una solución de diseño que mejore las operaciones de montaje y fabricación. Una vez se tiene una solución alternativa, es apropiado tener una noción cuantitativa de la mejora del diseño de la máquina por medio de una evaluación.

Saber el coste exacto de la alternativa sería lo ideal, y según los sistemas de gestión de datos de producto que tengan las empresas, se podría estimar con mayor precisión. No obstante, teniendo en cuenta que no se está abordando el rediseño de la arquitectura de una gama de productos, sino que el trabajo se centra en la mejora de una sola máquina, se considera apropiado poder obtener una evaluación a modo comparativo de la bondad de la mejora de los costes de montaje y fabricación, con una herramienta de aplicación en una máquina.

Además el diseño en esta etapa de decisión de la alternativa, etapa conceptual, el diseño no es detallado, por lo cual no es posible afinar los costes en detalle ya que todavía falta por definir muchos aspectos. Por ello, tener una estimación aproximada lo antes posible, puede ayudar en la mejora del concepto del diseño.

Por ello, en el presente trabajo se adopta la estrategia de realizar estimaciones para, por una parte comparar la complejidad de montaje entre soluciones de diseño, y por otra parte comparar los esfuerzos de proceso de fabricación, también entre los diseños.

Hay ejemplos de trabajos en este sentido como:

- Stauffer y Smith (2005), tras un análisis del método DFA de Boothroyd y Dewhurst (2002), proponen una herramienta de análisis DFA, adaptada para las construcciones soldadas de gran escala, pero de bajo volumen, en la que no consideran el número mínimo de piezas funcionales ni la eficiencia de montaje, para hacer su uso más práctico y servir de ayuda en la detección de los principales costes en construcciones electrosoldadas.
- Samy y Elmaraghy (2012) abordan la reducción de costes asociados a las variantes de productos de una empresa por medio de la reducción de la complejidad de fabricación de productos de montaje automatizado. Para ello proponen una metodología de asesoramiento y mapeado de la complejidad de los productos y su montaje.

5.2. Complejidad del diseño

De forma general, la complejidad está relacionada con el número y las relaciones entre los elementos que intervienen en la determinación de una pieza, componente, producto o sistema (Pugh, 1991; Riba, 2002; Samy & ElMaraghy, 2012).

Se encuentra complejidad en una pieza o en un conjunto Riba (2002, p.135):



- a) “Complejidad de piezas y componentes (fabricación). Una pieza es tanto más compleja como más intrincada es su forma y más difícil su conformación. En su evaluación intervienen el tipo de operaciones de conformación, el número de cotas distintas y su grado de precisión.
- b) Complejidad de un conjunto (de composición y montaje). Es tanto más complejo como mayor es el número de piezas y componentes, mayor su diversidad, y mayor su número de interfases⁶.

“Disminuir la complejidad tiene, en general, efectos beneficiosos desde muchos puntos de vista, para lo cual es un objetivo a perseguir en las tareas de diseño” (Riba, 2002, p. 135):

- Disminución del número de piezas a fabricar.
- Disminución del número de interfases (deterioros y desgastes en enlaces, asentamientos, superficies).
- Disminución del número de uniones y enlaces (tornillos, remaches, soldaduras, rodamientos, guías, conectores).
- Disminución del coste (menos piezas que, sin embargo, pueden ser más complejas; menos montaje).
- Más fiabilidad del conjunto (menos elementos susceptibles de funcionar mal) y mejora de la mantenibilidad^a.

En en mismo sentido, con la idea de minimizar los costes en el diseño recomienda (Pahl et al., 2007, p. 561):

- “Minimizar la complejidad, es decir, minimizar el número bajo de piezas y procesos de producción.
- Minimizar las dimensiones generales para reducir los costes de material, debido a que estos costos aumentan desproporcionadamente con el tamaño, más frecuentemente el diámetro.
- Maximizar las cantidades (grandes tamaños de lote) para distribuir los costes, ya que, por ejemplo, los costes de instalación pueden distribuirse,

⁶ Interfase es cualquier superficie real o imaginaria entre dos módulos de un sistema, a través del la cual se establece alguna relación de unión mecánica, flujo de energía, flujo de materiales o flujo de señales (Riba, 2002, p. 128)



los procesos de producción de alto rendimiento pueden ser utilizados, y los beneficios de la repetición pueden ser explotados.

- Minimizar los requisitos de precisión, es decir, especificar, cuando sea posible, grandes tolerancias y acabados superficiales rugosos”.

En general, los métodos para evaluar la complejidad parten de la consideración de que la complejidad está correlacionada con las discontinuidades que se presentan en la fabricación de las piezas y componentes (diferentes estacadas de la pieza, operaciones, superficies, chaflanes, radios de enlace, roscas) y en la composición de conjuntos (número y variedad de piezas, interfases) (Riba, 2002).

5.3. Estimación de la complejidad

Hay herramientas de estimación de la mejora del diseño orientada al montaje manual, automatizado y con soporte robótico en mesas o estaciones de montaje, como el propuesto por Boothroyd y Dewhurst basada en la evaluación de la eficiencia de montaje por una parte y en el cálculo detallado del coste, por otra parte. La estimación de la eficiencia de montaje se basa en el tiempo de montaje de un conjunto respecto el tiempo de montaje del diseño óptimo. Para el cálculo de los tiempos de montaje, utiliza la suma total de tiempos de montaje de cada pieza, obtenidos a partir de valores tabulados para cada pieza, según las operaciones de manipulación e inserción. El tiempo de montaje óptimo se obtiene como el tiempo de montaje de las piezas funcionales. Para la tabulación de los tiempos de montaje, en la metodología de Boothroyd y Dewhurst tienen en cuenta parámetros dimensionales, de simetrías, de dificultad de manipulación (una mano, dos manos, utillajes, etc.) y de inserción.

Samy y Elmaraghy (2012) realizan un cálculo de la complejidad media del montaje teniendo en cuenta la complejidad asociada a la manipulación de cada pieza y la complejidad asociada a la inserción y posteriormente la complejidad del equipo de ensamblaje.

Stauffer y Smith (2005), tras un análisis de las herramientas DFA basadas en las de Boothroyd y Dewhurst (2002), proponen una herramienta de análisis DFA, adaptada para las construcciones soldadas de gran escala, pero de bajo volumen, en la que no consideran el número mínimo de piezas funcionales ni la eficiencia de montaje, para hacer su uso más práctico y servir para para identificar donde están se concentran los principales costes en construcciones electrosoldadas, con cierto detalle.

Se expone un método sencillo y eficaz para evaluar la complejidad de un conjunto o sistema por medio del factor de complejidad, C_f , propuesto por Pugh (Pugh, 1991, pp. 134-135) el cual, partiendo de los siguientes parámetros (Riba, 2002, p. 136):

- N_p =Número de piezas o componentes del conjunto considerado



- N_t = Número de tipos distintos de piezas o componentes
- N_i = Número de interfases, enlaces o conexiones del conjunto
- f = Número de funciones que realiza el conjunto

$$C_f = \frac{K}{f} \sqrt[3]{N_p \cdot N_t \cdot N_i}$$

Ecuación 1

Dado que este método suele aplicarse a propuestas alternativas que dan solución a un mismo problema, el número de funciones es el mismo, por lo que puede suprimirse el parámetro f . El nuevo factor de complejidad simplificado es (Riba, 2002):

$$C_f = \sqrt[3]{N_p \cdot N_t \cdot N_i} \quad \text{o} \quad C_f = N_p \cdot N_t \cdot N_i$$

Ecuación 2

5.4. Estimación de la complejidad del diseño de una bancada

En el presente subapartado se presenta una propuesta para la estimación de la complejidad del diseño de una bancada, basada en las metodologías explicadas anteriormente en el apartado 5.2, pero aplicada específicamente a bancadas electrosoldadas de máquinas.

En el caso de una bancada de una máquina, de construcción electrosoldada, se considera necesario tener una estimación cuantitativa de la complejidad de un diseño, es necesario tener en cuenta la complejidad del montaje, que plasme la complejidad o simplicidad de un diseño y a la vez es necesario tener una estimación cuantitativa de la complejidad de fabricación.

En el caso del tipo de construcción basada en procesos de corte, plegado y soldado de chapas y perfiles de acero, se propone una herramienta de cálculo que tenga en cuenta las principales operaciones de montaje y fabricación como se



muestra en la Tabla 2. Dicha herramienta podría adaptarse a otros procesos de fabricación.

Para comparar la mejora del diseño en las operaciones de fabricación y montaje, se ha empleado una tabla de evaluación que se confecciona de acuerdo con los criterios de la empresa, y en la que se compara a complejidad de la gestión del montaje/ensamblaje y del proceso de fabricación y en el que cada a cada proceso se le asigna un peso (Tabla 1).

Para estimar la complejidad de montaje, en este caso C_g se toma el coeficiente inspirado en el coeficiente de complejidad de Pugh (1991), pero teniendo en cuenta únicamente en número de piezas y el número de piezas diferentes:

$$C_g = \sqrt{Nt \times N} \quad \text{Ecuación 3}$$

Por otra parte se calcula la complejidad relacionada con los procesos de fabricación, en este caso C_p , es decir de la complejidad de corte, de la complejidad del montaje en la fabricación y de la complejidad de las operaciones de acabado.

$$C_p = \text{Suma de la complejidad de los procesos} \quad \text{Ecuación 4}$$

Posteriormente, para evaluar conjuntamente la complejidad del montaje y de la fabricación, se considera un porcentaje de 30% (0,3) al montaje y un 70% (0,7) a la fabricación.

Finalmente, para realizar una comparativa entre diseños se propone la siguiente igualdad para encontrar un valor de complejidad de un diseño, C_d :

$$C_d = \sqrt{C_g^{2 \times 0,3} + C_p^{2 \times 0,7}} \quad \text{Ecuación 5}$$



5.5. Estimación de la complejidad del diseño de una bancada de construcción electrosoldada.

En la Tabla 1 se propone unos pesos o factores de evaluación, que “penalizan” o aportan complejidad a las piezas o a las operaciones de transformación.

Los valores utilizados son unos valores subjetivos establecidos en este caso por experiencia con la empresa, que comparativamente penalizan las operaciones más costosas o la manipulación más compleja.

Estos factores estiman dos conceptos de complejidad, de forma similar a Samy y Elamaghy, que obtienen un coeficiente de complejidad como combinación de complejidad de conceptos de manipulación e inserción.

Los factores pueden ser afinados por medio de toma de datos a medida que se vaya utilizando para diversos casos.

Tabla 1. Tabla de pesos asignados a los procesos de montaje de los diseños de bancadas y fabricación para la evaluación de los diseños de bancadas.

Factor de evaluación	
Complejidad (gestión)	0,30
Montaje	Peso
Piezas 1 (grandes)	2
Piezas 2 (Piezas básicas)	1
Piezas 3 (Piezas petites)	0,5
Piezas diferentes (gestió)	1
Proceso (tiempo o coste)	0,70
Conformación	Peso
Corte 1 (oxicorte, $t < 25$ mm)	15
Corte 2 (laser)	20
Corte 3	20
Plegado 1 ($l < 500$ mm; $g < 20$)	20
Plegado 2 (500 a 1500 mm)	12
Plegado 3 (> 1500 mm)	20
Montaje	Peso
Trazado 1 (clásico)	1
Trazado 2 (autoreferencia)	1
Preparación 1	1
Preparación 2 (chaflanes)	1
Soldadura 1 ($t < 5$ mm)	15
Soldadura 2 ($5 < t < 10$ mm)	10
Unión deformación 1	1
Unión deformación 2	1



Proceso térmico 1	2
Proceso térmico 2	2
Acabados	Peso
Mecanización 1 (mandrinadora)	1
Mecanización 2	1
Preparación superficie 1	1
Preparación Superficie 2	1
Recubrimiento 1 (pintura)	1
Recubrimiento 2	1

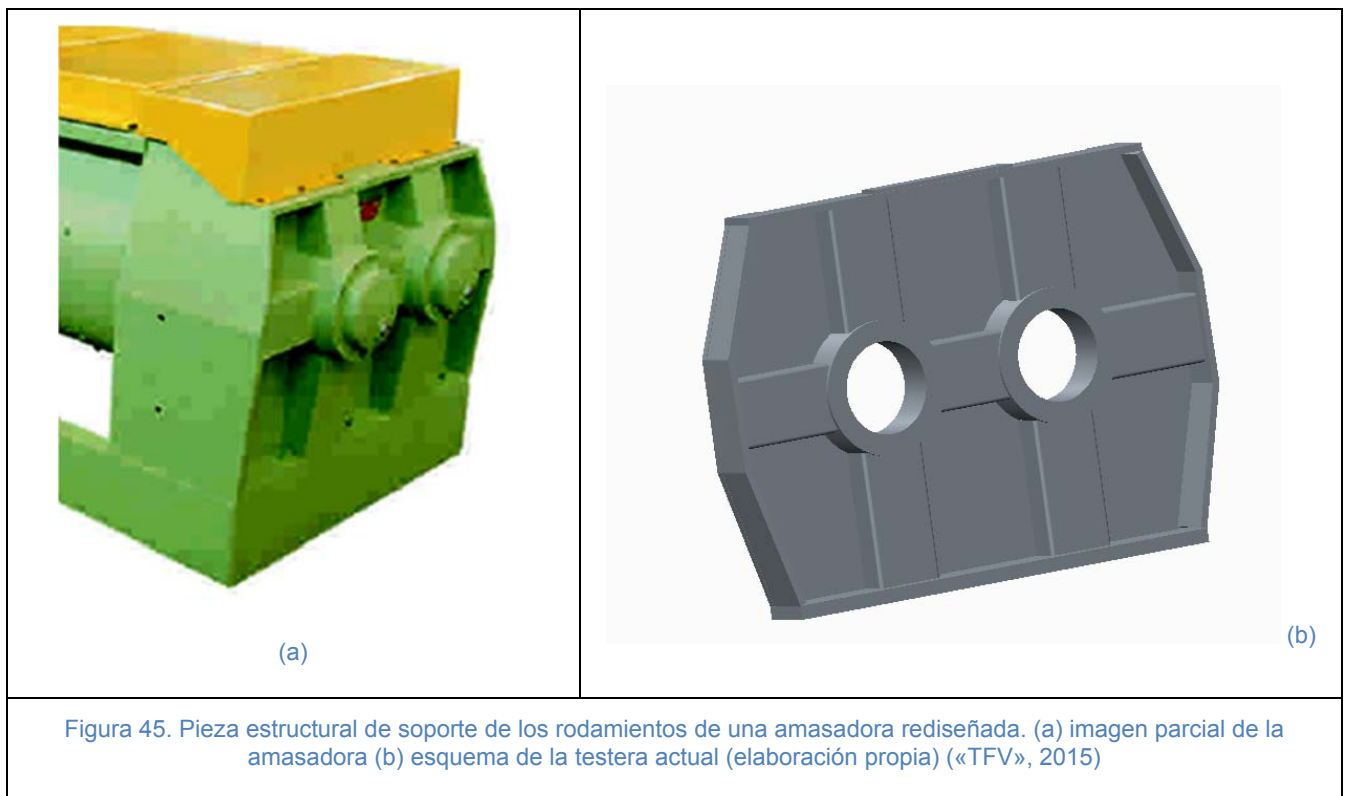
Tabla 2. Tabla de evaluación de diseños de bancades (elaboración pròpia)

Evaluación comparativa de diseños de bancadas

Factor de evaluación		Solución inicial	Cd	Alternativa 1	Cd	Alternativa 2	Cd
Complejidad (gestión), Cg		N	0,0	N	0,0	N	0,0
Montaje							
	Peso						
Piezas 1 (grandes)	2	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Piezas 2 (Piezas básicas)	1	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Piezas 3 (Piezas petites)	0,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Piezas diferentes (gestió)	1	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Complejidad fabricación, Cp							
Proceso (tiempo o coste)							
Conformación		Long Tiempo	0,0	Long Tiempo	0,0	Long Tiempo	0,0
	Peso	m horas N		m horas N		m horas N	
Corte 1 (oxicorte, t<25 mm)	15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Corte 2 (laser)	20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Corte 3	20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Plegado 1 (l<500 mm; g<20)	20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Plegado 2 (500 a 1500 mm)	12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Plegado 3 (>1500 mm)	20	0,0	0	0,0	0	0,0	0
Montaje							
	Peso						
Trazado 1 (clásico)	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Trazado 2 (autoreferencia)	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Preparación 1	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Preparación 2 (chaflanes)	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Soldadura 1 (t<5 mm)	15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Soldadura 2 (5<t<10 mm)	10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Unión deformación 1	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Unión deformación 2	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Proceso térmico 1	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Proceso térmico 2	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Acabados							
	Peso						
Mecanización 1 (mandrinadora)	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mecanización 2	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Preparación superficie 1	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Preparación Superficie 2	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Recubrimiento 1 (pintura)	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Recubrimiento 2	1	0,0	0	0,0	0	0,0	0

5.6. Ejemplo de estimación y selección de la complejidad de una testera

Como ejemplo ilustrativo de la evaluación y selección de un diseño desde el punto de vista de la simplicidad de fabricación y montaje, se presentan tres diseños de una testera de una amasadora y se evalúan (Figura 45, Figura 46 y Figura 47).



En la Figura 45(b) se muestra una testera de soporte de un extremo de los ejes de palas de una amasadora de tierras. Esta pieza muestra una evolución de simplificación de diseño respecto a la pieza real de la Figura 45 (a). Consiste en un conjunto de construcción electrosoldada a partir de chapas de acero de construcción, cortadas y soldadas.

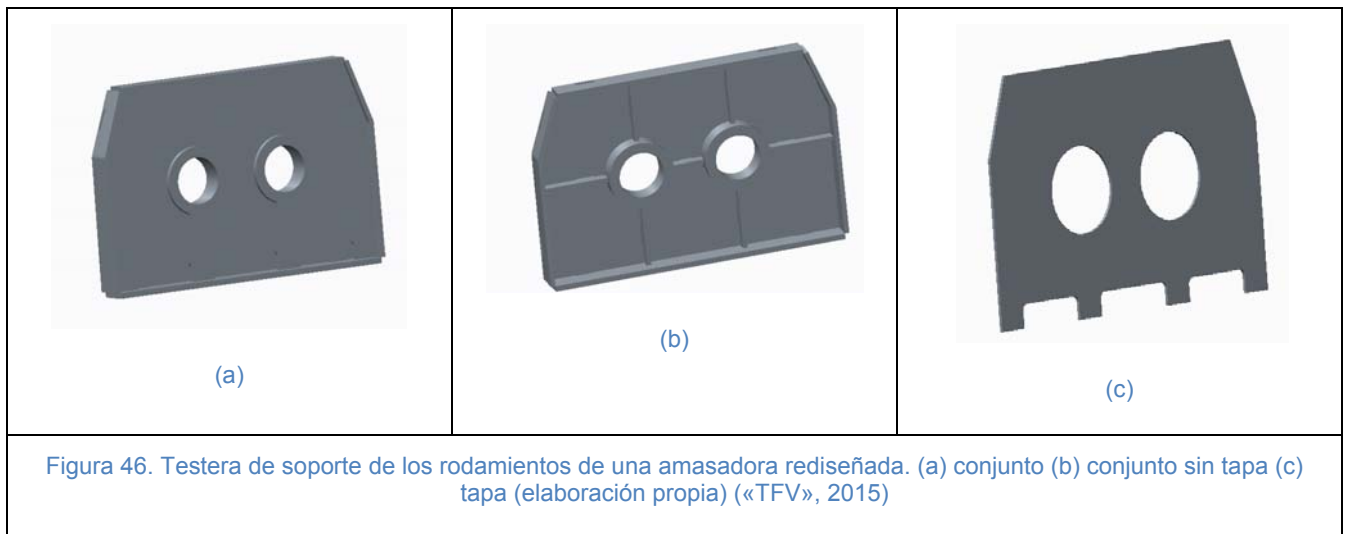
Se conocen las dimensiones de las piezas, por lo que se puede hacer una estimación de las longitudes de corte y de soldadura. Con ello, se puede tener una estimación de las longitudes de las chapas a cortar y a soldar. Si la empresa conoce el coste por metro lineal de las operaciones de corte y de soldadura se podría tener una estimación del coste total de las operaciones primarias más detallado. Por otra parte, para poder evaluar comparativamente dos diseños, se propone asignar un peso a cada proceso.

Las piezas circulares son los portarrodamientos, que se mecanizan para permitir alojar los rodamientos de los ejes de las palas. Este conjunto se construye con un total de 17 piezas y un total de piezas diferentes de 11. Las 7 piezas de refuerzo tienen 2 plegados cada una, en total 14 plegados. Se estima en 2 horas las



operaciones de trazado y 1,5 horas el tiempo de preparación. Se cuentan 17,4 metros de soldadura. También se cuenta 1 hora de operaciones de mecanización y 0,8 horas de dedicación de acabados superficiales.

Se entiende que los costes de los equipos, coste de la mano de obra (más especializada en el caso de la soldadura) son costes variables, ya que dependen de cada empresa y de cada país. En este caso, de acuerdo con la empresa, se dio los pesos a las operaciones de conformación, montaje, y acabados de la tabla Tabla 3.



La pieza de la Figura 46 corresponde a una primera alternativa de simplificación de la testera. Esta formada por 17 piezas, 11 de ellas diferentes. Se consideran 20,7 metros de corte, 0,2 horas de trazado, 17,5 metros de soldadura, 1 hora de mecanizado y 0,8 horas de operaciones de acabado superficial.



La pieza de la Figura 47 corresponde a una alternativa muy simplificada desde el punto de vista del diseño de la testera. Esta formada por 4 piezas, 3 de ellas diferentes. Se consideran 9,6 metros de corte, 0,1 horas de trazado, 8,8 metros



de soldadura, 1 hora de mecanizado y 0,8 hora de operaciones de acabado superficial.

Tabla 3. Tabla de evaluación del diseño inicial de la testera de una amasadora (Verdés, n.d.)

Evaluación comparativa de diseños de bancadas

Factor de evaluación		1 - Actual		Cd	2 - Piezas planas		Cd	3 - Piezas plegadas		Cd
		N		10,4	N		5,8	N		3,3
Complejidad (gestión), Cg		0,30		13,5	N		12,2	N		3,5
Montaje		Peso								
Piezas 1 (grandes)	2	0	0		0	0		0	0	
Piezas 2 (Piezas básicas)	1	16	16		10	10		4	4	
Piezas 3 (Piezas petites)	0,5	1	0,5		7	3,5		0	0	
Piezas diferentes (gestió)	1	11	11		11	11		3	3	
Complejidad fabricación, Cp		0,70		9,4	Long Tiempo		4,2	Long Tiempo		3,3
Conformación		Peso			m horas N			m horas N		
Corte 1 (oxicorte, t<25 mm)	15	24,2	1,6		20,7	0,0		9,6	0,0	
Corte 2 (laser)	20		0,0			1,0			0,5	
Corte 3	20		0,0			0,0			0,0	
Plegado 1 (l<500 mm; g<20)	20		14	0,7		0	0,0		0,0	
Plegado 2 (500 a 1500 mm)	12			0,0		0,0		4	0,3	
Plegado 3 (>1500 mm)	20			0,0		0,0	1,035		0,0	0,813
Montaje		Peso								
Trazado 1 (clásico)	1	2,0	2,0		0,2	0,0		0,1	0,0	
Trazado 2 (autoreferencia)	1		0,0			0,2			0,0	
Preparación 1	1	1,5	1,5			0,0			0,0	
Preparación 2 (chafanes)	1		0,0			0,0			0,0	
Soldadura 1 (t<5 mm)	15		0,0		17,5	1,2		8,8	0,6	
Soldadura 2 (5<t<10 mm)	10	17,4	1,7			0,0			0,0	
Unión deformación 1	1		0,0			0,0			0,0	
Unión deformación 2	1		0,0			0,0			0,0	
Proceso térmico 1	2		0,0			0,0			0,0	
Proceso térmico 2	2		0,0	5,2		0,0	1,4		0,0	0,7
Acabados		Peso								
Mecanización 1 (mandrinadora)	1	1	1,0		1	1,0		1	1,0	
Mecanización 2	1		0,0			0,0			0,0	
Preparación superficie 1	1		0,0			0,0			0,0	
Preparación Superficie 2	1		0,0			0,0			0,0	
Recubrimiento 1 (pintura)	1		0,0			0,0			0,0	
Recubrimiento 2	1	0,8	0,8	1,8	0,8	0,8	1,8	0,8	0,8	1,8

Resultados del ejemplo:

Según los resultados de la Tabla 3, se tiene una complejidad de montaje de 13,5 en el caso del diseño actual, 12,2 en el caso de las testeras con piezas planas y una tapa y de 3,5 en el caso de la obtenida con piezas plegadas.

Según los resultados de la Tabla 3, se tiene una complejidad de fabricación de 9,4 en el caso del diseño actual, 4,2 en el caso de las testeras con piezas planas y una tapa y de 3.3 en el caso de la obtenida con piezas plegadas.

Según los resultados de la Tabla 3, se tiene una complejidad de diseño de 10,4 en el caso del diseño actual, 5.8 en el caso de las testeras con piezas planas y una tapa y de 3.3 en el caso de la obtenida con piezas plegadas.

Según los resultados, la opción de menor complejidad es la de las chapas plegadas con un coeficiente de complejidad de diseño de 3.3.

El rediseño de la testera por medio de corte láser y plegado por control numérico ha facilitado:

- la autorreferenciación,
- el uso de chapas del mismo espesor,
- en las sustitución de cortes y uniones soldadas por doblados,
- mayor simplicidad de montaje,
- piezas más simples.

5.7. Resumen del capítulo

En el presente capítulo se ha reflexionado sobre la idoneidad de abordar la estimación de la complejidad como soporte en la toma de decisiones de diseño, y no directamente de los costes.

Conociendo la influencia directa que tiene la disminución de la complejidad del diseño en la disminución de los costes y a sabiendas de la gran influencia de las decisiones tomadas en las etapas de diseño en la inversión de producción comprometida, se considera apropiado proponer centrarse en mejorar el diseño, y de manera indirecta en el coste. No obstante, cuanto más detalladamente se conozcan los costes, con más detalle se podrán fijar los pesos utilizados en la herramienta de evaluación, que penalizan el uso de las piezas u operaciones de fabricación.

La estimación que se propone en la presente investigación, es una evaluación cuantitativa combinada tanto de la complejidad de diseño y como de la de fabricación de una bancada. Se considera necesario tenerlas presente simultáneamente para tener un resultado equilibrado, es decir, tener un diseño



muy simplificado desde el punto de vista del montaje, puede llevar a modelizar piezas complejas, de gran complejidad de fabricación, con costes finales mayores que los del diseño precedente.

Se han revisado metodologías de evaluación de diseños:

- Las herramientas de estimación de la mejora del diseño orientada al montaje manual, automatizado y con soporte robótico en mesas o estaciones de montaje, como la propuesta por Boothroyd y Dewhurst basada en la evaluación de la eficiencia de montaje por una parte y en el cálculo detallado del coste, por otra parte. La estimación de la eficiencia de montaje se basa en el tiempo de montaje de un conjunto respecto el tiempo de montaje del diseño óptimo. Para el cálculo de los tiempos de montaje, utiliza la suma total de tiempos de montaje de cada pieza, obtenidos a partir de valores tabulados para cada pieza, según las operaciones de manipulación e inserción. El tiempo de montaje óptimo se obtiene como el tiempo de montaje de las piezas funcionales. Para la tabulación de los tiempos de montaje, en la metodología de Boothroyd y Dewhurst tienen en cuenta parámetros dimensionales, de simetrías, de dificultad de manipulación (una mano, dos manos, utillajes, etc.) y de inserción.
- La metodología de Samy y Elmaraghy (2012), que se basa en un cálculo de la complejidad media del montaje teniendo en cuenta la complejidad asociada a la manipulación de cada pieza y la complejidad asociada a la inserción y posteriormente la complejidad del equipo de ensamblaje.
- La metodología de Stauffer y Smith (2005), tras un análisis de las herramientas DFA basadas en las de Boothroyd y Dewhurst (2002), proponen una herramienta de análisis DFA, adaptada para las construcciones soldadas de gran escala, pero de bajo volumen, en la que no consideran el número mínimo de piezas funcionales ni la eficiencia de montaje, para hacer su uso más práctico y servir para identificar donde están se concentran los principales costes en construcciones electrosoldadas, con cierto detalle.

Se ha propuesto una herramienta de cálculo de la complejidad que calcula la complejidad asociada al número de piezas a manipular, teniendo en cuenta por una parte el montaje y por otra y las operaciones de fabricación, es decir combinando la complejidad de dos conceptos distintos, similar a la combinación de complejidades realizada por Samy y Elmaraghy. Por las razones similares a Stauffer y Smith (2005), tener un uso práctico de la herramienta de evaluación, ágil y simple, no se considera las operaciones de orientación e inserción, así como tampoco se calcula la eficiencia según el método de Boothroyd y Dewhurst.

Para el caso particular de construcciones electrosoldadas, con operaciones típicas de corte, plegado, uniones por soldadura y operaciones de acabado de un mismo tipo, se propone unos pesos de complejidad según el número de piezas, sus dimensiones y los procesos de fabricación.



Finalmente se desarrolla un ejemplo para facilitar la comprensión de la herramienta de evaluación, que permite comparar entre varios diseños por medio de la complejidad de diseño, teniendo en cuenta el mismo tipo de técnicas de soldadura.



6. METODOLOGÍA

En el presente capítulo, se propone una metodología de rediseño del elemento estructural de equipos industriales para simplificar su diseño y reducir los costes asociados a la fabricación y el montaje (Figura 48). No es la pretensión de esta metodología crear un nuevo proceso de diseño mecánico, sino realizar una aportación metodológica de rediseño de una tipología de bancadas que facilite y dirija al diseñador de manera pautada para avanzar de forma sistemática, simple y con “sentido común” en los trabajos de rediseño, con el objetivo de conseguir un resultado efectivo.

Para ello, se facilita la captura de las funciones mecánicas de la bancada, se facilita la normalización de procesos y materiales y se facilita la evaluación de la complejidad del diseño.

El rediseño para reducir los costes asociados de un conjunto estructural de construcción electrosoldada de una máquina industrial, tiene la ventaja de aprovechar el conocimiento de las funciones y comportamiento actuales cosechados con el tiempo de uso de la máquina (Gopsill et al., 2011). Por eso, aunque hay metodologías de Ingeniería Concurrente como las propuestas por (Pahl et al., 2007; Riba, 2002; Ullman, 2008), pautadas y con ejemplos, éstas suelen ser de aplicación general para productos, piezas o máquinas. En muchas ocasiones el diseñador percibe que la aplicación de estas metodologías y herramientas están fuera de su alcance y las consideran no productivas o que ralentizan el proceso de diseño y como resultado es reacio a aceptarlas (Hsu et al., 1998).

Aprovechando el encargo por parte de TFV (Verdés, s. f.) al Centre de Disseny d'Equips Industrials («CDEI-UPC», 2015) del rediseño de la bancada electrosoldada de un desintegrador de tierras para la industria cerámica, se encuentra la utilidad fijar una metodología que pueda facilitar el rediseño enfocado a la reducción de recursos para la fabricación y el montaje.

Por ello, se propone una metodología que aporta las siguientes ventajas:

1. no exige conocimientos previos del DFMA para resultar amigable para el usuario,
2. está estructurada en pasos concretos para facilitar su seguimiento,
3. se propone una simbología de captura de funciones técnicas del conjunto estructural de la máquina, para servir de definición gráfica del punto de partida de la parte creativa del diseño,
4. se proponen etapas de aplicación de recomendaciones diseño DFM y DFA,



5. se propone una herramienta de evaluación de costes para comparar el rediseño elaborado con el diseño de partida.

La metodología que se propone, enfoca desde un principio al elemento base.

Para ello, en primer lugar se analiza la máquina y se identifica y representa las funciones mecánicas de la bancada (apartado 6.2.2). Con ello, se busca que el esfuerzo del diseñador no se disperse en considerar funciones no pertinentes, sino que se concentre en el proceso creativo de diseño, tanto en la fase conceptual como en la de materialización. Una vez se tiene identificadas las funciones mecánicas de la bancada, se trabaja en establecer una disposición de conjunto del producto (arquitectura) que facilite la simplificación de la complejidad del diseño que facilite la simplificación y la normalización de los procesos de fabricación y de los materiales.

Asimismo, se propone realizar una revisión general de las soluciones mecánicas, sobre todo las que se han de conservar o integrar en el rediseño, para mejorarlas o actualizarlas según los nuevos desarrollos.

Una vez establecida la disposición de conjunto, se propone simplificar el diseño según las recomendaciones DFA de diferentes autores (apartado 6.4), adaptadolas a la construcción electrosoldada (apartado 6.5).

Tras haber trabajado una opción, es necesario realizar una evaluación, para lo cual se provee una herramienta de valoración de la complejidad de montaje y de fabricación (apartado 6.6), que facilita comparar entre soluciones alternativas de un rediseño o con el diseño original para facilitar la elección de la mejor opción. Esta herramienta puede utilizarse en cualquier etapa de diseño, dada su simplicidad de uso, teniendo en cuenta que a medida que se avanza en el diseño, se tienen resultados más realistas. Posteriormente, una vez elegida una solución, entrando en la etapa de diseño de materialización, se procede al rediseño de la geometría, formas y detalles, de acuerdo a las recomendaciones de diferentes autores respecto a diferentes tecnologías de fabricación.

La metodología consta de las siguientes etapas:

1. Inicio del rediseño.
2. Análisis de las funciones de la máquina actual (precedente).
3. Captura y representación gráfica de las funciones técnicas de la bancada.
4. Rediseño para la fabricación y el montaje (según directrices DFA).
5. Simplificación y normalización de las tecnologías y variantes de materiales (según directrices DFM).



6. Evaluación de la complejidad de diseño de las alternativas en base a los materiales usados y a las operaciones efectuadas en cada una de ellas y selección del concepto.
7. Diseño de detalle (según directrices DFM).

En la Figura 48 se muestra un esquema del proceso de la metodología de la presente investigación. En ella se toma como punto de partida de los trabajos, el concepto o principio de solución general, ampliamente probado y de funcionamiento correcto. Se revisa y calcula las repercusiones sobre el elemento base, la bancada, del funcionamiento de la máquina según este principio. Estas son las etapas donde se toman las decisiones que más influyen en el coste final de producción del equipo. Posteriormente, se realizan indicaciones generales del diseño de detalle.

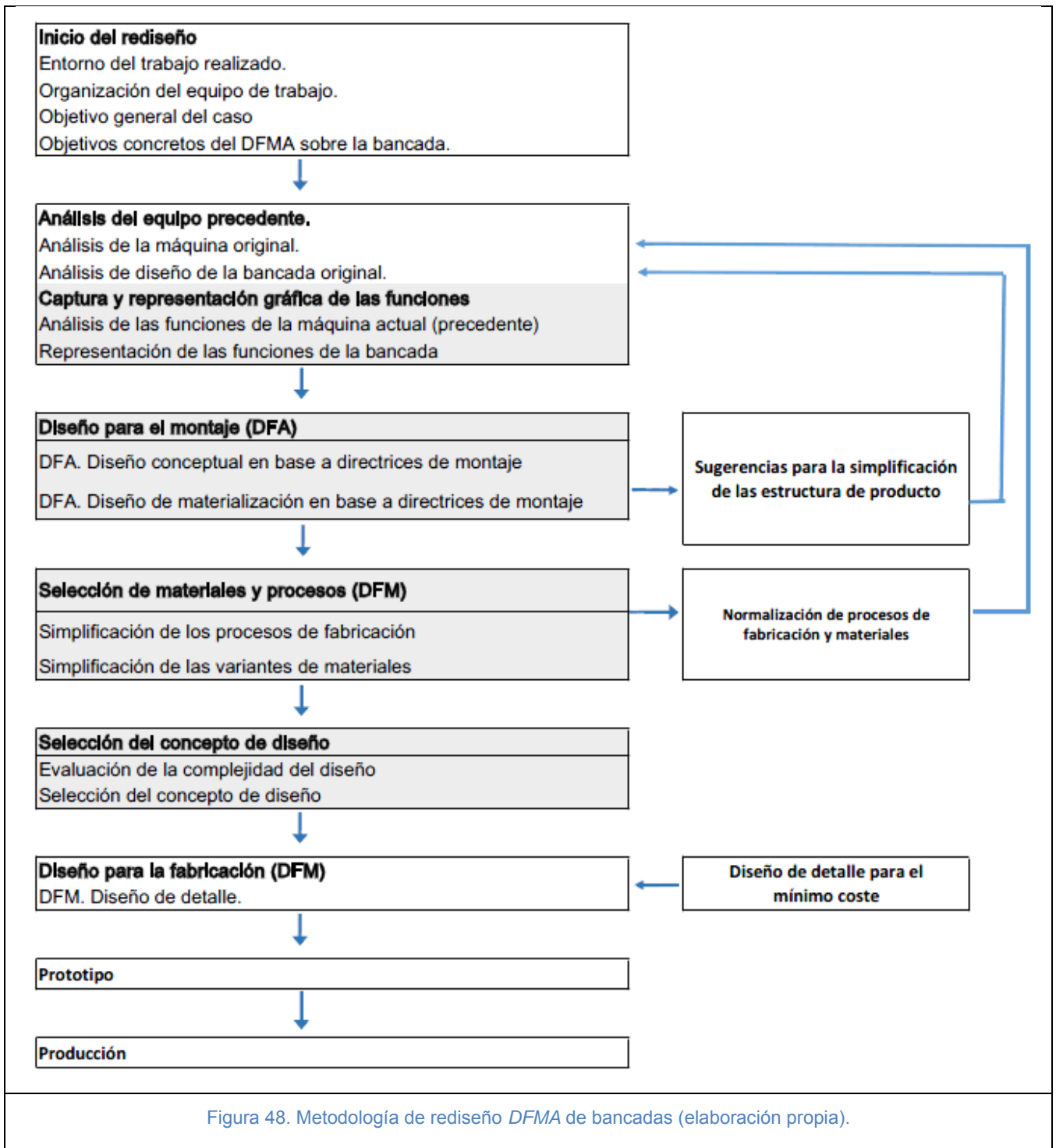


Figura 48. Metodología de rediseño DFMA de bancadas (elaboración propia).

Como se muestra en la Figura 48, la metodología que se investiga, se centra en las etapas de captura y representación de las funciones, en el diseño conceptual y de materialización con herramientas DFA, en la selección de los materiales y procesos de fabricación, y en la evaluación de la complejidad del diseño como soporte en la toma de decisiones en el diseño conceptual y en el diseño de materialización (en las casillas con fondo de color gris).



Metodologías tradicionales

A modo informativo, en relación a la metodología de Pahl y Beitz ((Pahl et al., 2007), los trabajos de rediseño de la metodología propuesta recaen sobre la etapa conceptual y su posterior materialización, en fondo azul en la Figura 49.

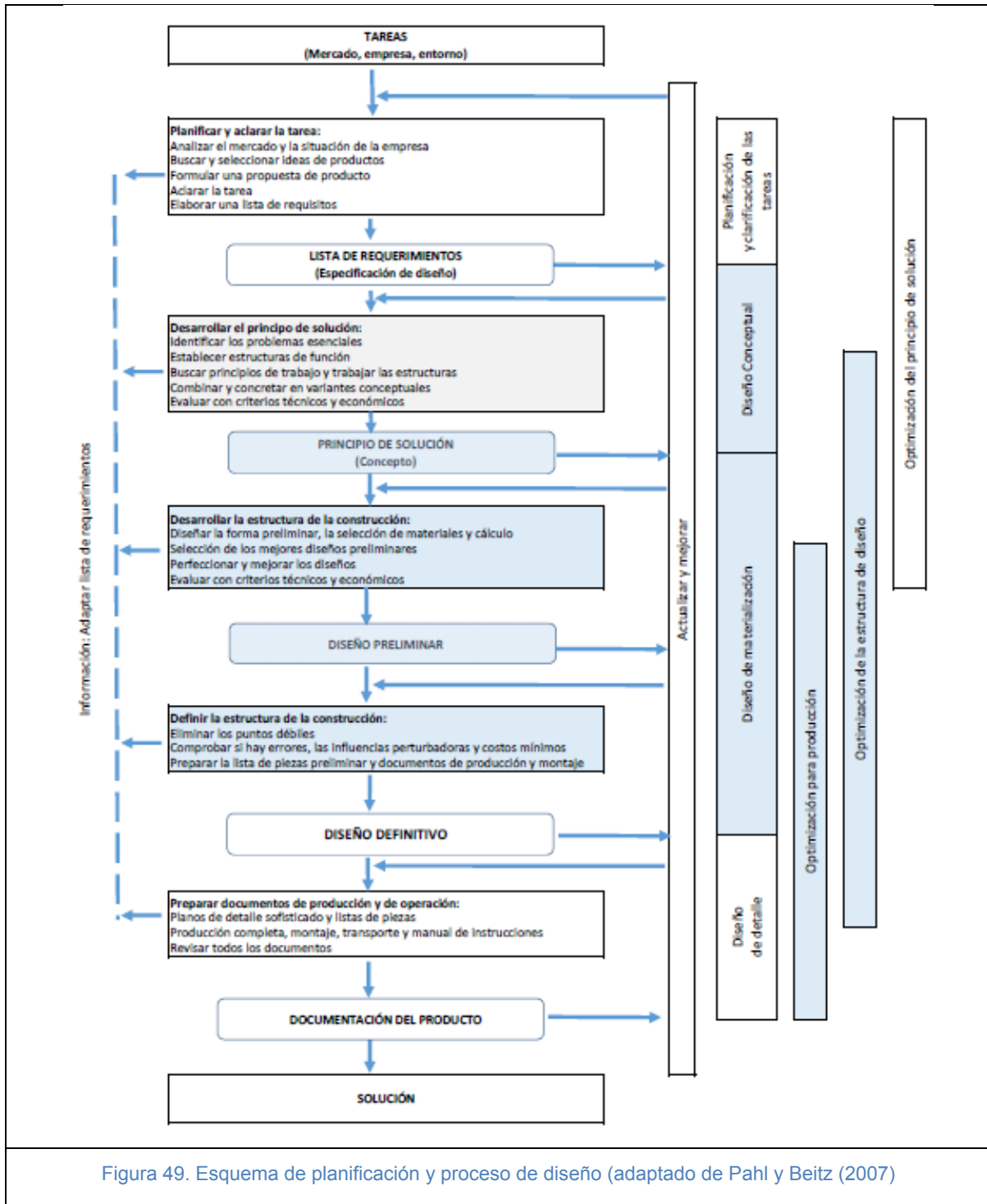


Figura 49. Esquema de planificación y proceso de diseño (adaptado de Pahl y Beitz (2007))



En la metodología de Pahl y Beitz (2007, p. 130) de la Figura 49 el proceso de diseño se desarrolla en cuatro etapas: planificación y aclaración de las tareas, diseño conceptual, diseño de materialización y diseño de detalle. La metodología de la presente investigación realiza una aportación metodológica en base a la metodología confeccionada por Pahl y Beitz.

Por otra parte, a modo informativo, en relación al proceso de diseño de Boothroyd y Dewhurst (2002), en la metodología propuesta en esta investigación, se sigue un procedimiento iterativo siguiendo el esquema de de la Figura 50 durante el cual se aplica directrices DFA y DFM y se realizan evaluaciones cuantitativas para la comprobación de la mejora de la simplicidad del diseño desde el punto de viste del montaje y de la fabricación.

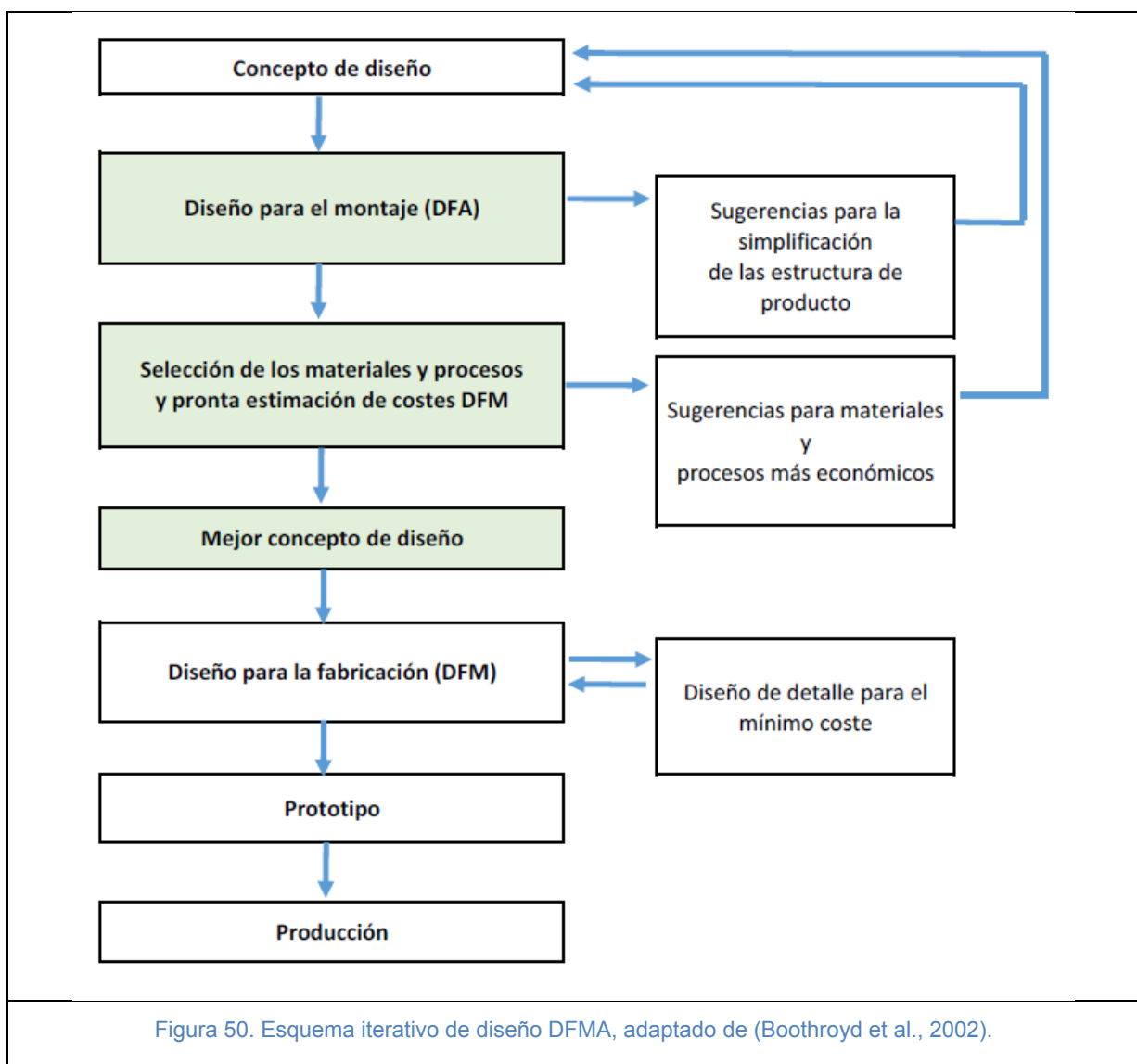


Figura 50. Esquema iterativo de diseño DFMA, adaptado de (Boothroyd et al., 2002).

En la Figura 50 se muestra el esquema que se sigue de forma iterativa en el diseño DFMA (Boothroyd et al., 2002). En fondo de color verde se destaca el ámbito de actividad principal de la metodología de la presente investigación.



6.1. Inicio del rediseño y acuerdo de los requerimientos

En el momento de comenzar los trabajos, es necesario conocer el entorno, la empresa, el equipo de trabajos de oficina y de taller, los recursos e información con que se cuenta, la opinión de expertos, explicitar los objetivos del trabajo y planificar las reuniones de trabajo.

El punto de partida del rediseño, son por una parte las especificaciones de la información en forma por ejemplo de "Lista de requerimientos" (Pahl et al., 2007, p. 131; Riba, 2002, p. 78) que da el cliente y por otra parte el análisis de una máquina de cliente, ya existente. Hay que tener en cuenta que se quiere mejorar una máquina que tiene un buen funcionamiento, es acogida con éxito en el mercado y se considera que es una máquina de calidad. Por ello, no se cuestiona el principio de solución y se toma como punto de partida, sin entrar en temas estratégicos de la empresa.

Aunque el principio de solución y arquitectura general de la máquina este fijada de partida, los trabajos de adaptación de la bancada y modificaciones dimensionales deben ser hechos en base a los requerimientos. Estos, por motivos prácticos suelen ser consultados en listas de requerimientos para su uso por parte de diferentes áreas o departamento de la empresa (Pahl et al., 2007, pp. 145-158).

Hay requerimientos obvios que no se incluyen, o requerimientos que en fases iniciales de diseño no se pueden precisar, se pueden mencionar funciones o ideas de solución para ayudar a un mejor entendimiento de los requerimientos o mejorarlas. Es importante guardar y tener disponibles los requerimientos en soporte digital para consulta durante el proceso de diseño empresa (Pahl et al., 2007, pp. 157-158).

Es necesario recoger información sobre los requerimientos, cuales son requisitos y cuales deseos (Pahl et al., 2007, p. 154; Riba, 2002, pp. 85-89), los condicionantes y su importancia.



6.2. Análisis de las funciones. Concepto de diseño

6.2.1. Análisis de las funciones de la máquina original

En la etapa de diseño conceptual se busca el principio de solución.

A partir de una abstracción de los problemas esenciales, se establece una estructura funcional, a partir de la combinación de principios de funcionamiento idóneos (Pahl et al., 2007, p. 131). Para su evaluación, es necesario transformar la estructura funcional en una representación más clara, que puede ser en bloques, representaciones esquemáticas, diagramas de circuitos o de flujo, en bocetos, o esquemas a escala.

Para el caso del rediseño de una máquina desde el enfoque de la fabricación y el montaje, se toma como punto de partida su principio de solución.

Para comprenderlo en primer lugar se analiza la máquina original. Se analiza el principio de solución de la máquina para conocer el funcionamiento general de la máquina y como repercute en su elemento base, la bancada y conocer su estructura funcional. Es necesario formular a la empresa muchas preguntas para conocer los requerimientos, y detalles constructivos, detalles de carga, o detalles de las funciones de usuario y para extraer las funciones esenciales, los modos de funcionamiento, dimensiones, materiales usados o procesos de fabricación de la máquina. También se analiza toda la información esencial de que se disponga.

Cabe comentar que, en lo que se refiere a la bancada, es necesario generar un nuevo concepto de diseño de la bancada que sea compatible con el principio de solución de la máquina.

En el capítulo 3 se ha referenciado sistemas de identificación de las funciones de una máquina (Pahl et al., 2007, pp. 159-225; Riba, 2002; Ullman, 2008, pp. 25-47) de las que se procesa su información y se descompone en subfunciones, para conseguir crear un principio de solución para un nuevo diseño, en la etapa conceptual.

En un rediseño, se pueden obtener las funciones por medio de ingeniería inversa, mediante el análisis de la máquina (Ullman, 2008), para comprenderlas en su totalidad.

No obstante, en lo relativo a las bancadas, lo que las condiciona, tiene que ver con unas funciones mecánicas, como son las de:

- soportar cargas,
- de anclaje de la bancada al suelo,
- de fijación de módulos o componentes sobre la propia bancada,



- de permitir la regulación de sistemas mecánicos o piezas,
- de absorber vibraciones o,
- de servir de base o referenciación de otros componentes.

En la actualidad los avances del software informático de CAD 3D mecánico, permiten utilizar estrategias de diseño *Top Down Design*, TDD, facilitado por el uso de herramientas de esqueletos que ayudan a coordinar los subconjuntos modelizados ensamblado los conjuntos en CAD 3D, pudiendo servir para anclar la simbología de las funciones de la bancada en el nivel más elevado del conjunto.

6.2.2. Análisis de diseño de la bancada original

Al realizar un análisis de una bancada que se quiere rediseñar, hay que tener claros que el rediseño DFMA de la bancada, ha de contemplar:

- Mantener las funciones de la máquina.
- Mantener la calidad de la máquina.
- Simplificar el diseño, identificando las piezas redundantes, minimizando el número de piezas, dotando a las piezas de multifunciones.
- Mejorar la fabricación, disminuyendo las operaciones de fabricación y haciendo uso de tecnologías de fabricación más eficientes para el caso en concreto.
- Mejorar las operaciones de montaje, disminuyendo el número de operaciones, facilitándolas y disminuyendo el tiempo dedicado en realizar el montaje de la máquina.
- Recortar al mismo tiempo los costes de fabricación y montaje.
- Realizar un uso eficiente de los materiales y recursos energéticos

6.3. Captura y representación de las funciones de la bancada original

En ese punto, el autor propone la captura de las funciones mecánicas de las bancadas, utilizando la simbología del apartado 3.3 que el autor generó y aplicó en el caso de estudio del apartado 7. Esta simbología en formato informático 3D facilita su modelización y representación con software CAD 3D. Una vez representado, se puede potenciar su aplicación con el uso de esqueletos de las modernas herramientas CAD 3D para facilitar su difusión durante las etapas de diseño de la bancada.



6.4. DFA. Rediseño conceptual y de materialización en base a directrices de montaje

El inicio del rediseño de la bancada de una máquina, una vez se conocen las funciones de la bancada y se ha analizado la solución constructiva, es una etapa de carácter creativo.

Son necesarias sesiones de trabajo concurrentes, en las que, sobre las funciones mecánicas esenciales de la bancada y con el conocimiento de los pormenores de la ésta y de la máquina, se pueden generar ideas en base a procedimientos de generación de ideas y en base a directrices básicas de diseño para el montaje (DFA).

Posteriormente el diseño irá avanzando, se irán diseñando diversos aspectos de la bancada hasta tener una configuración que permita tomar decisiones en relación a los procesos de fabricación y a los materiales.

Aunque diversos autores han investigado recomendaciones DFA (Bogue, 2012; Edwards, 2002; Pahl et al., 2007; Pugh, 1991; Riba, 2002; Ullman, 2008), y todas, aplicadas adecuadamente, son de válidas, en el caso de estudio del apartado 7 de la presente investigación, se siguen las recomendaciones DFA de Riba (2002, pp. 156-164):

- Estructurar en módulos.
- Disminuir la complejidad de montaje.
- Establecer un elemento de base.
- Limitar las direcciones de montaje.
- Facilitar la composición.
- Simplificar las uniones.

6.5. Simplificación y normalización de procesos de fabricación y variantes de materiales

Como se vio en el apartado 4, elegir correctamente los procesos de fabricación de una pieza o componente tiene una gran repercusión en su funcionalidad y su coste, objetivos principales del DFMA. Las decisiones tomadas en la fase de diseño sobre fabricación afectan a un gran número de aspectos posteriores que tienen una gran incidencia en los costes del producto (tipo de proceso de fabricación necesario, maquinaria, herramientas e instrumentos de medida, manipulación, transporte interior, almacenaje, etc), así como un gran peso a la



hora de escoger entre fabricación propia, subcontratación o compra de productos semielaborados.

6.5.1. Simplificación y normalización de los procesos de fabricación (DFM)

Después de una cierta elaboración conceptual de acuerdo con las directrices DFA, es necesario analizar los procesos de fabricación de todos los componentes de la máquina, para tomar una decisión sobre la combinación de procesos que pueden optimizar los procesos de fabricación y montaje.

Es recomendable contar con expertos que conozcan procesos de fabricación fuera de los que son “familiares” en la empresa para estar abiertos a considerar nuevos procesos y nuevas combinaciones de procesos (Boothroyd et al., 2002).

En el caso de la construcción electrosolda, la combinación de los procesos de corte por láser plegado y mecanizado, permite mucha flexibilidad geométrica para prever detalles que faciliten la referenciación de piezas, ahorren cortes y uniones soldadas y que como resultado, disminuyan la carga de mecanizado. La tecnología de corte por láser además permite aprovechar materiales de mismo espesor agrupados en las mismas chapas a cortar (“nesting”).

6.5.2. Simplificación y normalización de las variantes de los materiales (DFM)

Una vez se han normalizado los procesos de fabricación y en base a ellos, es necesario optimizar el uso de los materiales.

Es necesario analizar todos los materiales semielaborados que se utilizan para todas las piezas, ya sean fabricadas en la propia empresa o subcontratadas a empresas externas y unificar los tipos, las referencias, esto es, unificar las calidades, los materiales, los espesores, los acabados. Se deben seleccionar el menor número de referencias diferentes y entonces se ha de restringir el uso en el diseño a los materiales normalizados en la empresa.

6.6. Evaluación. Determinación del mejor concepto de diseño

Es esencial saber si en un rediseño DFMA si va por el camino correcto lo antes posible. Al avanzar los trabajos de rediseño, se intuye por la complejidad del nuevo diseño si se está haciendo más simple. Con el objetivo de tener datos cuantitativos y poder comparar entre un diseño alternativo y el diseño original, se propone hacer uso de la herramienta de cálculo de la complejidad explicada en el apartado 5.



Por comparación de los resultados y seguimiento de los detalles de los diseños, se estará en disposición de tomar una decisión para elegir entre alternativas de diseño, desde el punto de vista de la complejidad.

Interesa que los valores de complejidad sean lo menor posible. No hay un valor máximo, ya que depende de cada diseño y se compara diseños con la misma función.

6.7. Diseño de detalle

En la etapa de diseño de detalle, para cada proceso de fabricación hay directrices de diseño para obtener piezas de calidad y optimizar el tiempo, los utillajes y los materiales de fabricación. Estas directrices se encuentran en la literatura, en manuales de los fabricantes de materiales y bienes de equipo de producción o la experiencia de los propios profesionales de una empresa (Bogue, 2012; LeBacq et al., 2002; Niebles, 2007; Pahl et al., 2007; Riba, 2002; Tasalloti et al., 2015; Ullman, 2008).

El diseño de detalle requiere un trabajo exhaustivo para adaptar el diseño de materialización a las geometrías, dimensiones, tolerancias y en general acabar el diseño para fabricarlo al mínimo coste.

6.8. Resumen del capítulo

En el presente capítulo, se expone una metodología de rediseño para la fabricación y el montaje del conjunto estructural electrosoldado de una máquina.

La metodología consiste en unas pautas de un proceso iterativo de diseño basado especialmente en la etapa conceptual y de materialización por su gran influencia en el coste de producción.

Ademas de la aplicación de recomendaciones DFMA, se propone utilizar una simbología de soporte a la captura y representación de las funciones mecánicas de una bancada.

Asimismo se hace énfasis en la etapa de diseño de la disposición del conjunto, ya que repercute en la posterior simplificación y normalización de los procesos y variantes de los materiales a utilizar.

También se propone una herramienta de evaluación cuantitativa de la complejidad asociada al montaje y a la fabricación, de utilidad para controlar que se están tomando las decisiones correctas con un resultado final de reducción de costes asociados a la fabricación y el montaje.



7. CASO DE ESTUDIO: DESINTEGRADOR

En el presente capítulo el investigador presenta el caso de estudio. Se expone y ordena de forma metodológica y en el orden cronológico el trabajo de rediseño de una bancada de un desintegrador de tierras del sector de la cerámica, de la empresa TFV, en un contexto de arranque de una planta piloto que contó con la adquisición de tecnologías innovadoras, como el corte por láser, el plegado por control numérico y una optimización del almacenaje, tal como se ha comentado en la introducción.

Se expone un análisis de la máquina para estudiar las posibilidades de simplificar su diseño que se realizó para reducir los costes asociados a su fabricación y montaje, tras el cual se detectaron una gran cantidad de formatos de chapas y perfiles de acero y una elevada dedicación en la mecanización, trazado y soldadura en la construcción de la bancada. Por estas razones, se consideró recomendable acometer un rediseño DFMA.

El equipo de trabajo estaba compuesto por un equipo de diseño universitario («CDEI-UPC», 2015) con experiencia en el rediseño DFMA y un equipo de diseño de la empresa.

Se estableció una relación de transferencia mútua de conocimiento. Por parte de la empresa, de conocimiento del equipo industrial y por parte del centro universitario, de conocimiento de diseño de máquinas y metodología DFMA.

Se planificaron las sesiones de trabajo y se analizó la máquina, su comportamiento, su funcionamiento y el de los sistemas mecánicos. Se realizaron cálculos de comprobación, se estudió la estructura de diseño y se revisó la construcción de la bancada con el objetivo de comprender las funciones mecánicas que debe cumplir la bancada y las razones que habían guiado el diseño previo. Se representaron los espacios requeridos por el flujo de material a procesar, los espacios ocupados por sistemas mecánicos (de función comprobada, correcta y fiable), los cuales se conservaron. Con la identificación de las funciones también comenzó a cuestionarse alguna solución constructiva y comenzó a aparecer ideas de mejora.

Una vez se tuvo el esquema de funciones definido, se abordó la creación de un rediseño comenzando por la estructura de diseño o arquitectura. En el desintegrador se mantuvo la estructura modular general, aunque se observó que los conjuntos de piezas emulaban un diseño orientado a la fundición, pero construido por electrosoldadura. Aunque el resultado era completamente funcional, robusto y de calidad, el hecho de emular detalles y número de piezas para recoger la geometría típica de piezas de fundición, implicaba una dedicación de esfuerzos excesivos. Por ello aunque la estructura de diseño del conjunto de la bancada general se siguió basando en dos conjuntos laterales unidos por perfiles “transversales”, se consideró primordial rediseñar las piezas. Al comenzar a aplicar directrices DFA, se agruparon los conjuntos de piezas en unas pocas,



para facilitar la autoreferenciación, el montaje y la fabricación. Se sustituyeron piezas soldadas y anteriormente cortadas, por piezas dobladas. Asimismo se sustituyó el oxicorte por el láser que permite cortes con geometrías complejas, precisas y con buen acabado y permite agilizar las operaciones del taller. Se mantuvo el trabajo con chapas y perfiles de acero.

Tras acordar los procesos de fabricación y los materiales, se analizaron los espesores de las chapas y perfiles utilizados y se acordó disminuir los espesores y disminuir el número de espesores diferentes.

Posteriormente, se procedió con el diseño de materialización con el soporte de las directrices DFA y DFM sobre la bancada.

Con estas bases de partida, se elaboraron diferentes conceptos de diseño, con el soporte de directrices de diseño comentadas en el apartado 6. Se evaluaron los conceptos con el soporte de una herramienta para el cálculo de la complejidad de diseño que contempla la complejidad de gestión de montaje y la complejidad de fabricación y se compararon las mejoras en el proceso de fabricación y montaje respecto del diseño original. En primer lugar se evaluaron la bancada original y posteriormente el rediseño DFMA (en este caso se presenta la evaluación con el diseño de materialización). Los trabajos del grupo universitario finalizaron en esta etapa.

A partir de aquí, la propia empresa realiza el diseño de detalle, aplicando técnicas, trabajando con directrices DFM, aprovechando las propiedades de la tecnología láser, que permite geometrías de referenciación para facilitar la composición, o marcaje con láser para facilitar el posicionamiento de piezas.

Finalmente la empresa informó de la construcción de tres máquinas con la bancada rediseñada.



7.1. Inicio del rediseño y acuerdo de los requerimientos

7.1.1. Ámbito del trabajo realizado

El trabajo del centro universitario se centró en la etapa de diseño conceptual y de materialización, acordando con la empresa, encomendar a los diseñadores de ésta el diseño de detalle.

Los trabajos tomaron como punto de partida la solución conceptual de la máquina original y se analizó su estructura funcional. Por ello fue menester formular a la empresa muchas preguntas para conocer estos detalles constructivos, detalles de cargas, detalles de las funciones de usuario y comenzar a conocer y a comprender la máquina, los modos de funcionamiento, sus dimensiones, los materiales utilizados, o los procesos de fabricación de la máquina.

7.1.2. Organización del equipo de trabajo

El equipo que realizó los trabajos de diseño estuvo compuesto por un equipo novel de ingenieros de proyectos de innovación de la empresa y el equipo universitario de investigación de la UPC, que además de realizar el papel de consultor realizó el diseño de materialización de la bancada. A las sesiones de trabajo asistían representantes del departamento de diseño de fabricación (responsables del diseño de detalle). Asimismo se realizaron frecuentes visitas al taller y se realizaron inspecciones de piezas, detalles constructivos y consultas sobre los procesos de fabricación, materiales, u opiniones de los trabajadores. El personal del taller estaba compuesto por operarios cualificados.

Los recursos informáticos con que se contó eran software de diseño CAD 3D Proengineer y software Ofimático de Microsoft. Asimismo se dispuso de una versión de CAE Ansys en el centro universitario.

7.1.1. Objetivo general del caso

El objetivo principal de la empresa era incrementar la funcionalidad y los servicios disminuyendo el coste de fabricación. El proyecto, que se encomendó al centro universitario se centró en reducir el coste de montaje y fabricación del equipo industrial.

Además, se quiso identificar mejoras generales y formar en el conocimiento de la máquina a un departamento de ingeniería. También había un deseo de conferir al personal de diseño de una mentalidad de *time to market* y tener flexibilidad de fabricación de máquina a máquina.



7.1.2. Objetivos concretos del DFMA sobre la bancada

Como se ha comentado en la introducción, la aplicación del DFMA sobre la bancada, los objetivos o requerimientos de partida eran:

- Mantener las funciones de la máquina, aunque en este caso al analizar las funciones de la máquina, fue posible detectar mejoras en el diseño que implicaban cambios en las prestaciones de la máquina. No obstante este trabajo se centró en el ámbito de las actuaciones del DFMA.
- Mantener la calidad de la máquina.
- Simplificar el diseño, identificando las piezas redundantes, minimizando el número de piezas, dotando a las piezas de multifunciones.
- Mejorar la fabricación, disminuyendo las operaciones de fabricación y haciendo uso de tecnologías de fabricación más eficientes para el caso en concreto.
- Mejorar las operaciones de montaje, disminuyendo el número de operaciones, facilitándolas y disminuyendo el tiempo dedicado en realizar el montaje de la máquina.
- Recortar al mismo tiempo los costes de fabricación y montaje.

7.2. Análisis de las funciones. Concepto de diseño

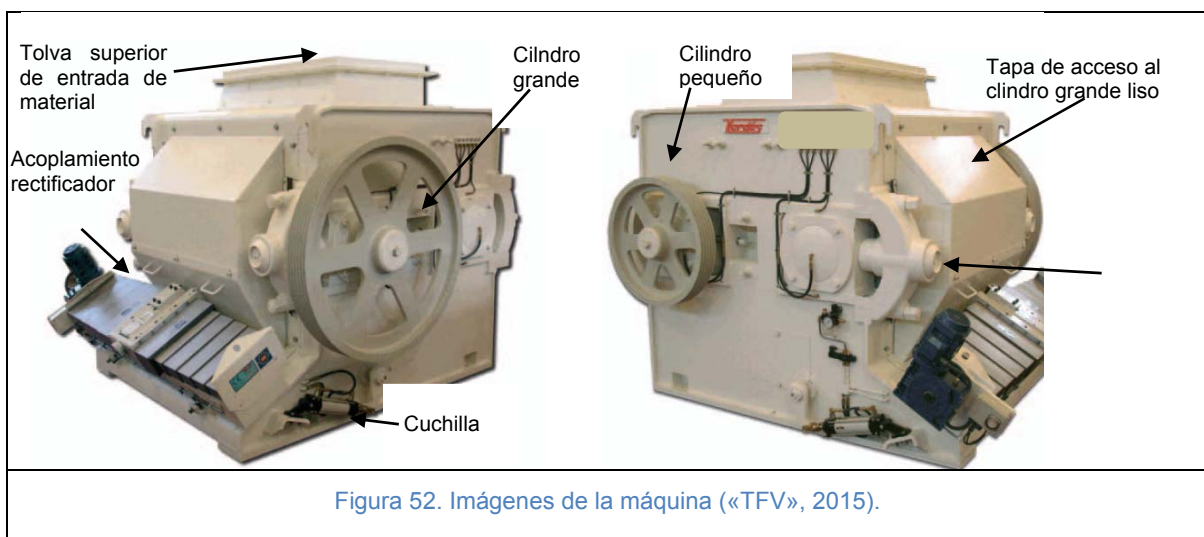
7.2.1. Descripción de la máquina original

A continuación se realiza una breve descripción de la máquina para poder seguir las explicaciones del trabajo.

Los desintegradores son equipos apropiados para la trituración secundaria y eventualmente primaria de materiales secos y semi-húmedos hasta una dureza de 4 Mohs como los terrones de arcilla dura. La trituración con los desintegradores se realiza por cizallamiento mediante la acción de dos rodillos contrarrotativos de diferentes tamaños, uno de ellos dotado con cuchillas.



La máquina se encuentra situada en una cadena de proceso en la que recibe piedras de un tamaño provenientes de una máquina de proceso anterior y las desmenuza en piedras más pequeñas (Figura 57).



La configuración de la máquina se ve en las imágenes reales de la Figura 60. En la parte superior se encuentra la tolva de entrada de material (tierras). En el cuerpo



de la máquina hay situados dos cilindros (rodillos metálicos accionados por medio de poleas en los respectivos extremos de los ejes) de grandes dimensiones, resistencia y peso. Están ubicados enfrentados a muy corta distancia para romper las piedras que pasan entre ellos. En caso de pasar un objeto de grandes dimensiones y de gran resistencia, hay un sistema basado en muelles que permite el distanciamiento los ejes de los cilindros para no obstaculizar el paso del objeto y no destruir los elementos de la máquina.

7.2.2. Análisis de las funciones de la máquina original

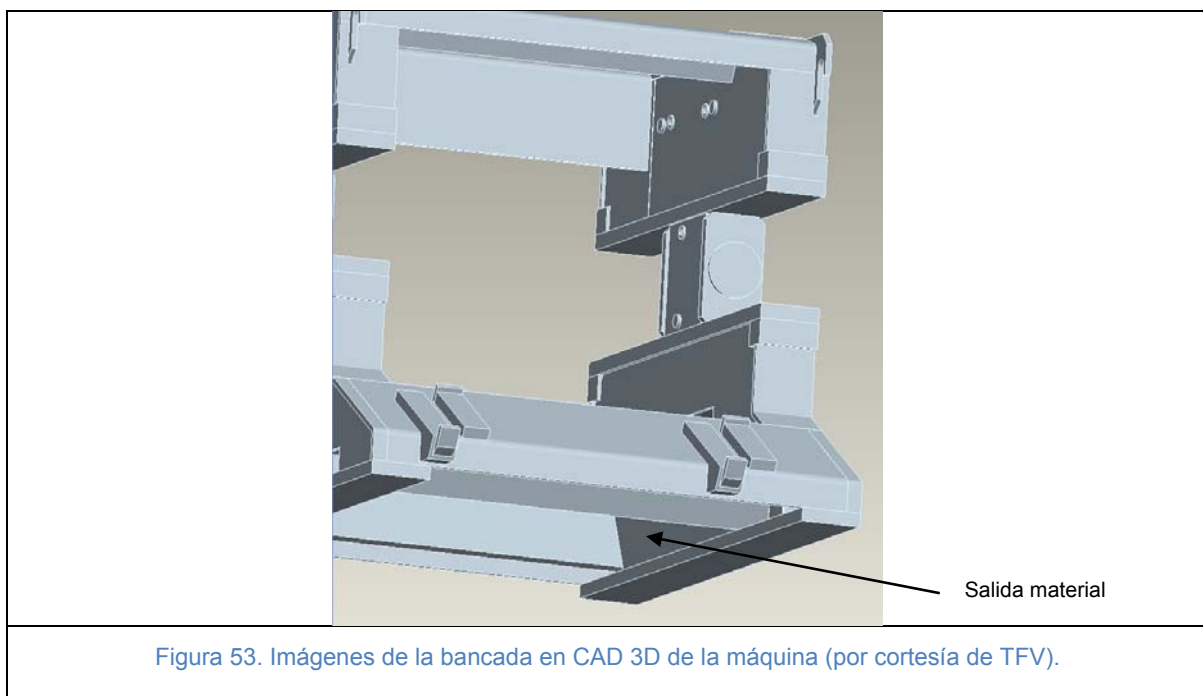
El funcionamiento de la máquina condiciiona a la bancada está condicionada con los siguientes requerimientos:

- La entrada del material a procesar es por la parte superior.
- Las paredes laterales de la tolva han de ser regulables, ya que se van desgastando por abrasión.
- Ha de ser suficientemente resistente y rígida para que la máquina sea elevada por su parte superior para su transporte.
- Ha de permitir el acceso a un sistema de rascado por un lado inferior por razones de mantenimiento.
- Se ha de poder adaptar una rectificadora.
- Ha de permitir el acceso desde la rectificadora al cilindro liso por razones de mantenimiento.
- Ha de permitir el acceso al cilindro con cuchillas por tema de mantenimiento.
- Ha de guiar los portarrodamientos de los cilindros.
- Las partes de la bancada han de ser autorreferenciabiles.
- Los portarrodamientos de cada cilindro han de poder deslizarse rectilíneamente con una carrera ya definida, sin poder acercarse hacia el cilindro opuesto y con cierto margen de carrera en sentido contrario.
- El sistema de regulación automática-mecánica de retroceso de los cilindros, es por medio de muelles *Belleville*, cuya función y comportamiento ha sido revisado y comprobado.
- La separación en el laminador es de 2-3 mm. Ello determina la distancia entre los ejes de los rodamientos de los cilindros. Tienen cizalalla para homogeneizar el grano



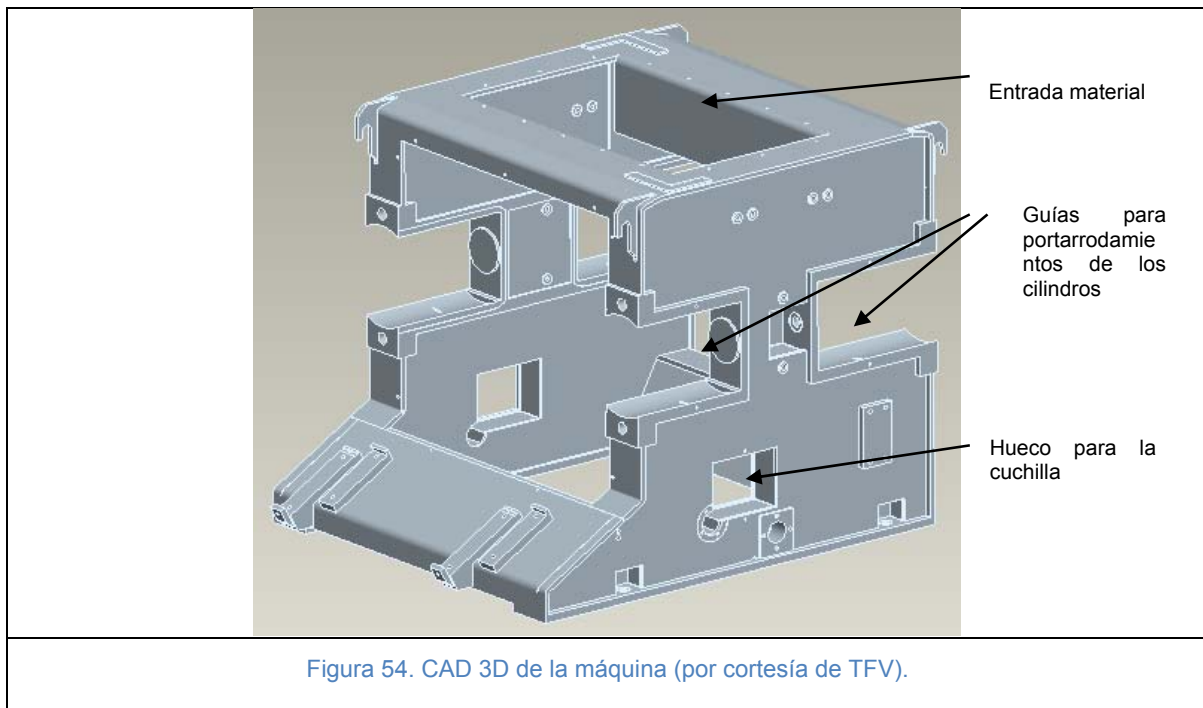
- Hay requerimientos importantes de los esfuerzos, de los reductores.
- Requerimientos de estanqueidad de la bancada
- Hay dos cilindros, uno rápido con 8 cuchillas, de 30 kW (a 585 rpm, motor a 1.400 rpm) y otro más lento de 11 kW (80 rpm), que se desgasta más por el centro.
- El conjunto de separación (amortiguador, *Belleville*⁷) aguantan la tensión de separación, la bancada no realiza esta función).

7.2.3. Descripción de la bancada original



En la Figura 53 de la bancada original, obtenida por medio de software CAD3D, se indica que el material producido por la máquina sale por la parte inferior, por lo que hay un volumen que no se puede obstaculizar con partes de la máquina.

⁷ Muelle *Belleville*: muelle basado en arandelas Belleville DIN6796, con una función de dar presión permanente a una unión entre un tornillo y una tuerca con el objeto de impedir la pérdida de la precarga en dicha unión.



En la Figura 54 se ven algunos detalles de la bancada original. Por la parte superior se ve un espacio para la entrada de material, donde se aloja una tolva. Las partes laterales presentan en sus respectivas zonas centrales unos estrechamientos para la colocación de las guías portarrodamientos. Estos seguirán una trayectoria por encima de las guías, permitiendo cierta separación entre los ejes de los cilindros en caso de objetos que no puedan ser desmenuzados, o en caso de regulaciones periódicas, por desgaste, que requieren un acercamiento entre dichos ejes. En la parte inferior hay un hueco para permitir el paso de un sistema de raspado de la superficie del cilindro liso, para su limpieza.

La construcción de la bancada está hecha a base de planchas y perfiles soldados, previamente trazados y cortados. Una vez construida toda la bancada se realiza un mandrinado de todo el conjunto para asegurar las tolerancias de las guías, zonas de fijación de la rectificadora o fijación de rodamientos.

7.2.4. Análisis de diseño de la bancada original

Al analizar el diseño de la bancada, se revisó su proceso de construcción y montaje, y de las piezas que la componen. Desde un punto de vista de la complejidad del diseño, las características de la bancada del diseño previo (Figura 55), que se detectaron son las siguientes:

- Elevado número de piezas.
- Elevado número de piezas diferentes.
- Inexistencia de elementos de autorreferenciación.



- Los gruesos de las planchas son excesivos.

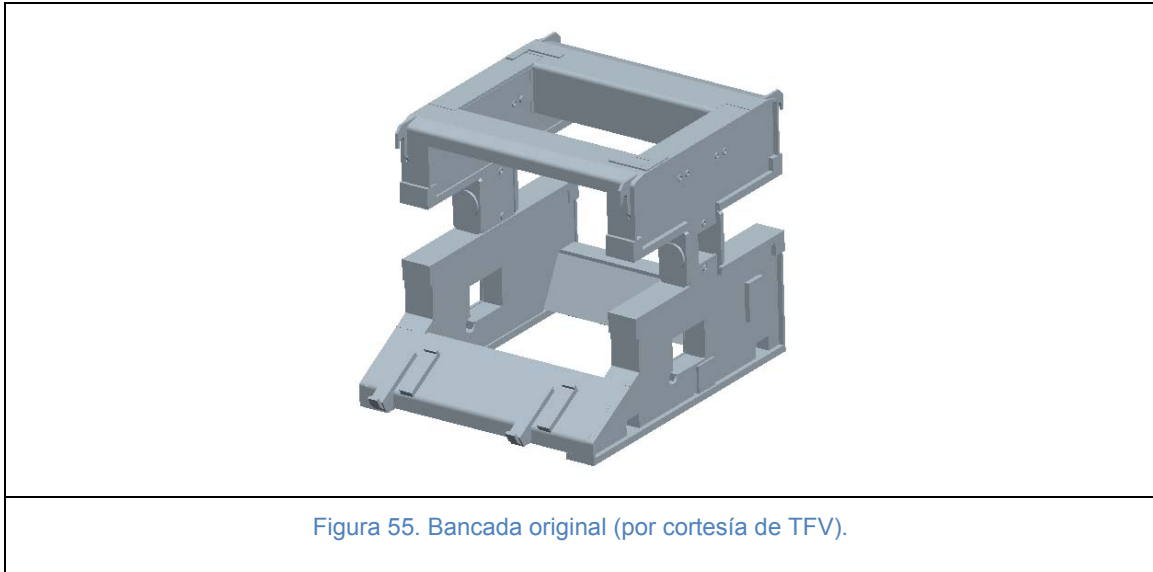


Figura 55. Bancada original (por cortesía de TFV).

Las chapas se cortan a las medidas necesarias por oxicorte y después se procede al montaje y soldadura de las mismas como se ve en la Figura 56

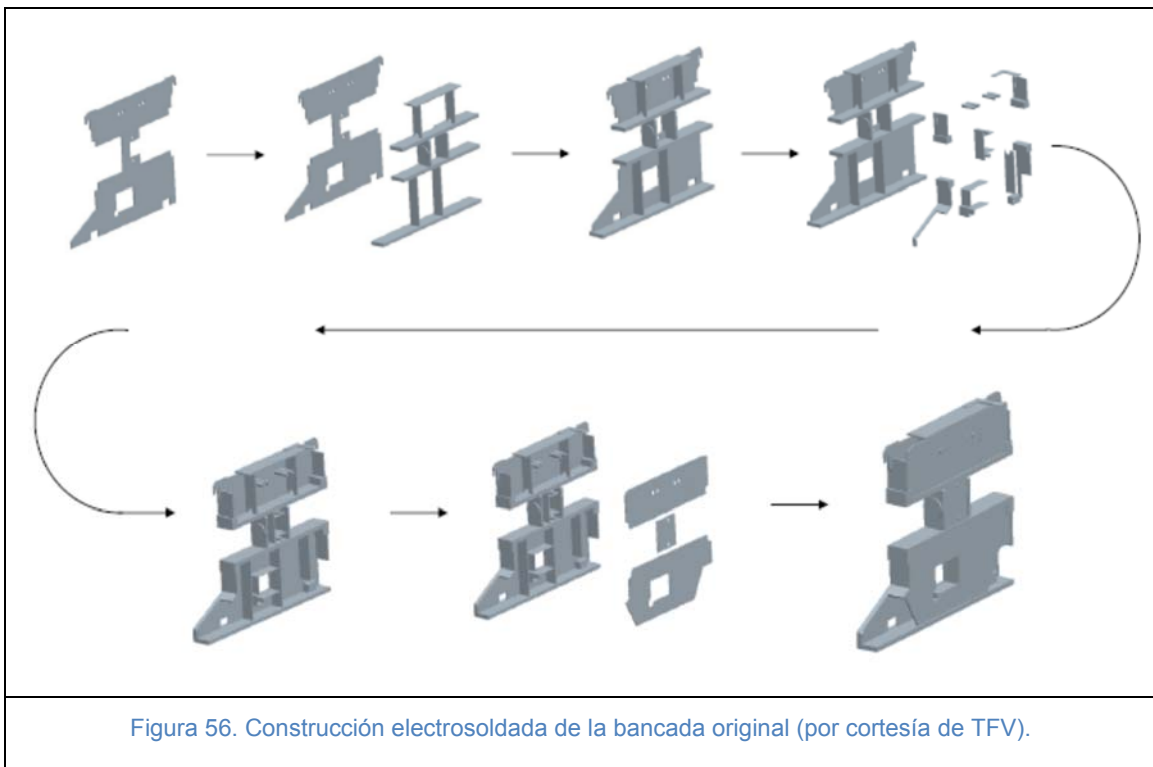


Figura 56. Construcción electrosoldada de la bancada original (por cortesía de TFV).

En general en las Figura 56 y Figura 57, para dejar todos los elementos correctamente apoyados, con paralelismo, perpendicularidad, alineación de superficies, piezas correctamente apoyadas, se ve una gran dificultad en realizar la construcción de la bancada de la figura, ya que hay un elevado número de



piezas, referenciaciones, soldaduras y ajustes intermedios que requieren mucha dedicación de profesionales cualificados.

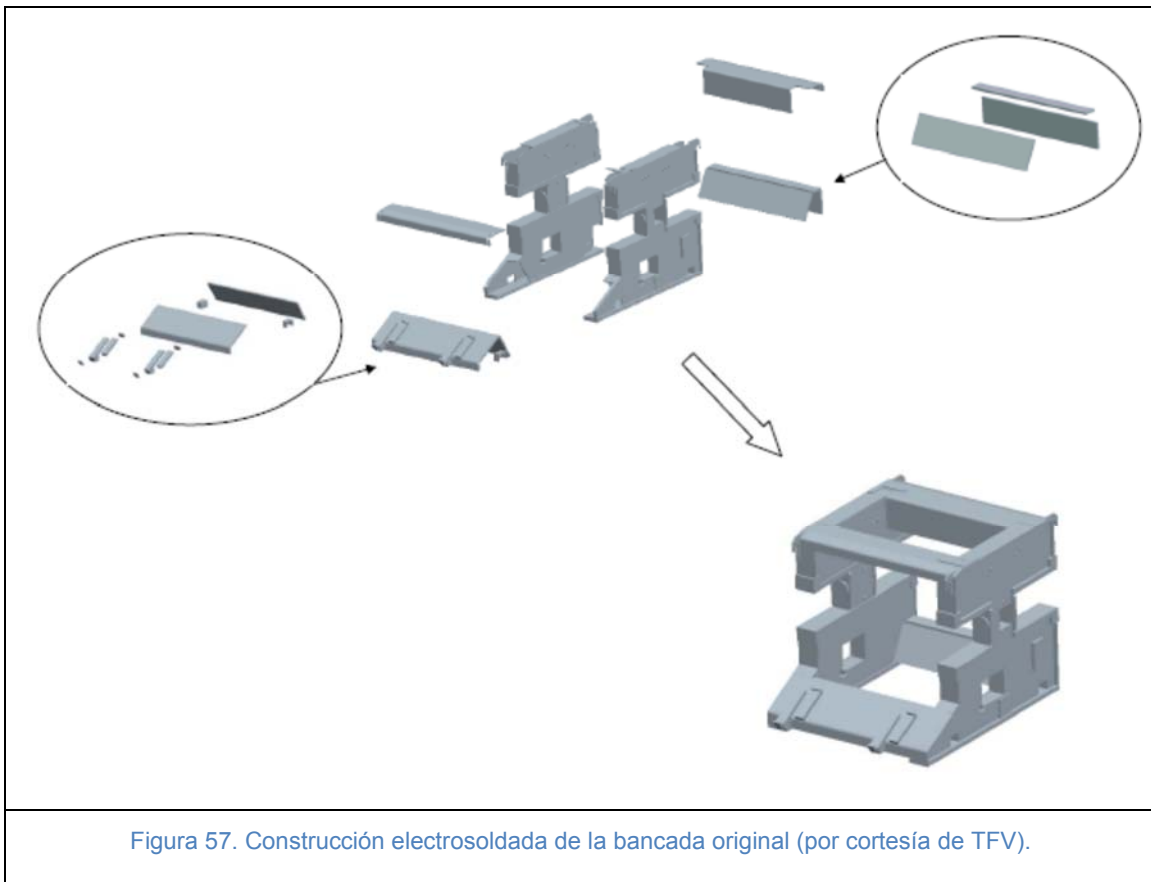


Figura 57. Construcción electrosoldada de la bancada original (por cortesía de Tfv).

El personal de taller confirmó la gran carga de trabajo que suponía trazar todas las piezas, cortarlas por oxicorte y prepararlas para su unión por medio de soldadura.

7.3. Captura y representación de las funciones de la bancada

En el caso de la bancada, se hizo uso de algunos de los elementos de representación de funciones de soporte del diseño de materialización. A continuación se muestra una representación de las funciones principales de la bancada en un esquema de una sesión de trabajo posterior al análisis de la máquina. Posteriormente se pasó a CAD 3D y se realizó el diseño de materialización.

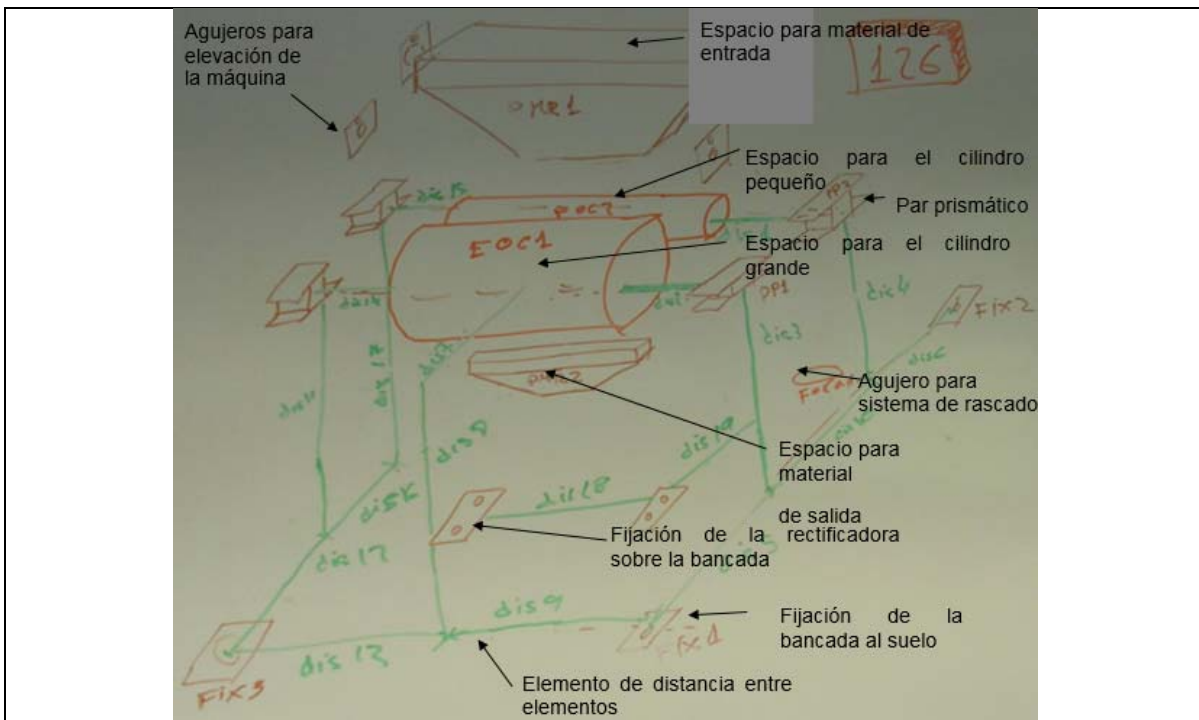


Figura 58. Esquema de las funciones de la bancada (elaboración propia)

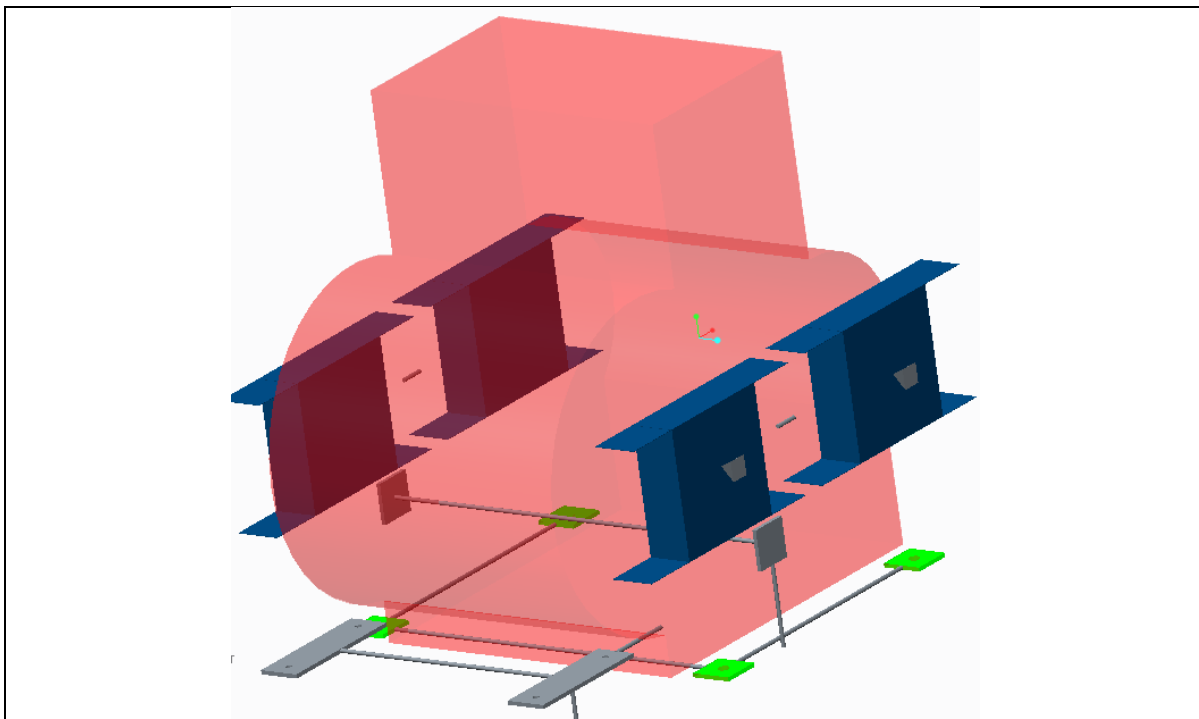


Figura 59. Esquema 3D de las funciones de la bancada (elaboración propia)



En los esquemas de la bancada de la Figura 58 y Figura 59 se representan las funciones de soporte del diseño de materialización en formato 3D

Como se aprecia en el esquema:

- En la parte superior se tiene un elemento que indica la entrada de material; este elemento condicional a la bancada a respetar este volumen para no interferir en el proceso de almacenamiento del material a procesar.
- El material pasa entre dos cilindros, uno grande y otro más pequeño. La clave del proceso está en el paso de las piedras entre los dos cilindros.
- Los cilindros se soportan en rodamientos a sus extremos, en donde se han situado 4 elementos de pares prismáticos que representan el guiado de estos encima de la bancada en sentido longitudinal. De hecho también pueden realizar una pequeña oscilación que ayuda al autoalineamiento de los ejes de los rodillos.
- Hay unas zonas definidas para la adaptación de una rectificadora, que ha de estar en una posición exacta y precisa para poder trabajar sobre la superficie del cilindro grande cuando sea necesario realizar operaciones de mantenimiento.
- Hay cuatro puntos de fijación de la bancada con el suelo.
- También hay cuatro puntos de sujeción de la bancada en su parte superior para ser elevada para su transporte (no representados en el esquema 3D).
- Hay un agujero en la parte inferior que es necesario para pasar el sistema de raspado, basado en una cuchilla.
- Finalmente en la parte inferior hay un volumen para el desalojo de la materia procesada.

7.4. DFA. Diseño conceptual y de materialización en base a directrices de montaje

Para el diseño conceptual y de materialización hubo múltiples posibilidades. Dependiendo de la experiencia y habilidad de los diseñadores, se puede tardar más o menos en generar una solución y ésta puede ser más o menos acertada. Los elementos funcionales de soporte generados, ayudan a tener presente ciertas condiciones de una manera global y por todas las partes involucradas en el diseño.

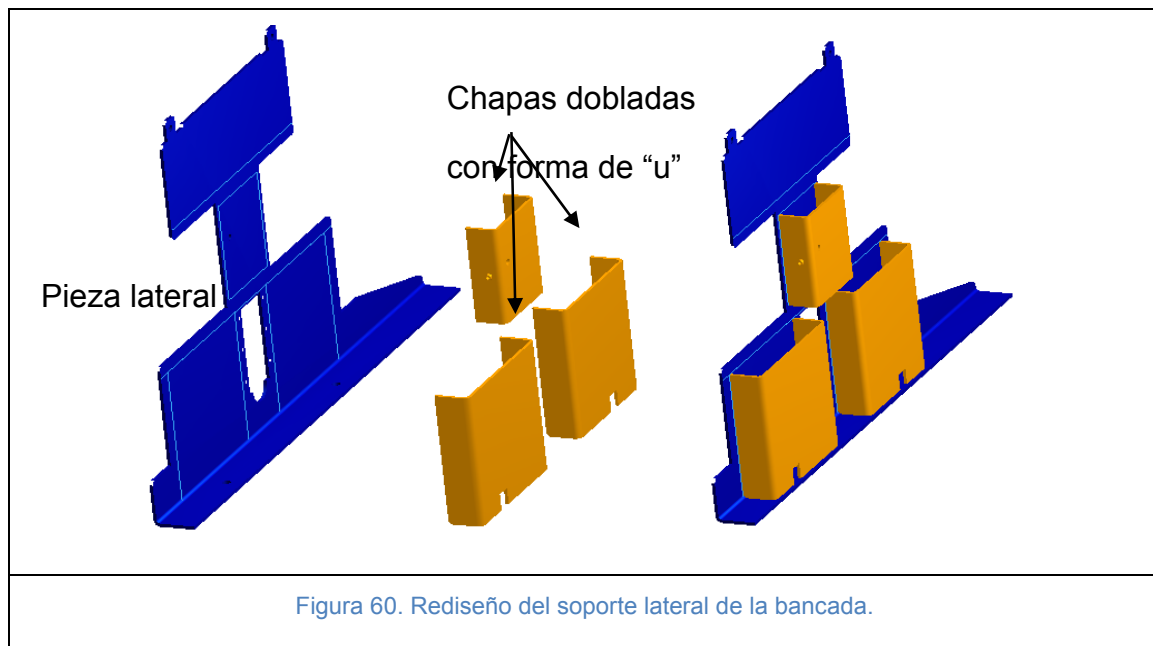
El diseño conceptual y de materialización realizado conjuntamente por el grupo investigador universitario y el equipo de la empresa es el que se explica en el presente capítulo.



El concepto de diseño se realizó en base a las directrices del apartado 6.4.

Estructuración en módulos.

La estructura de diseño de la bancada se inspiró en las dos cajas de construcción electrosoldada (Figura 57), pero rediseñando el soporte lateral (Figura 60), aunque variando el concepto caja por una estructura modular.



En la Figura 60, se muestra un conjunto de soporte lateral, construido con chapas con forma de “U” son elementos estructurales y de referenciación para las guías. Se colocan sobre el pliegue de la chapa lateral que es el elemento base de este conjunto), referenciado en su parte superior la posición de montaje de las guías inferiores. Sobre dicha guía se montan a cada lado sendas piezas con forma de “U”, que a su vez referencia la posición de las guías superiores. La unión entre estos elementos es por cordones de soldadura.

Los soporte laterales se unen entre si por perfiles que le aportan robustez (en la Figura 61 y en la Figura 62 se muestra la base del conjunto lateral compuesta por una chapa doblada y cortada y tres piezas dobladas en forma de “U”. De hecho se conserva el concepto modular general del diseño previo, para facilitar montar el resto de módulos de partida sobre la bancada, como son los cilindros con sus portarodamientos, poleas, sistema de muelles para el distanciamiento de los cilindros desintegradores la adaptación del rectificador.

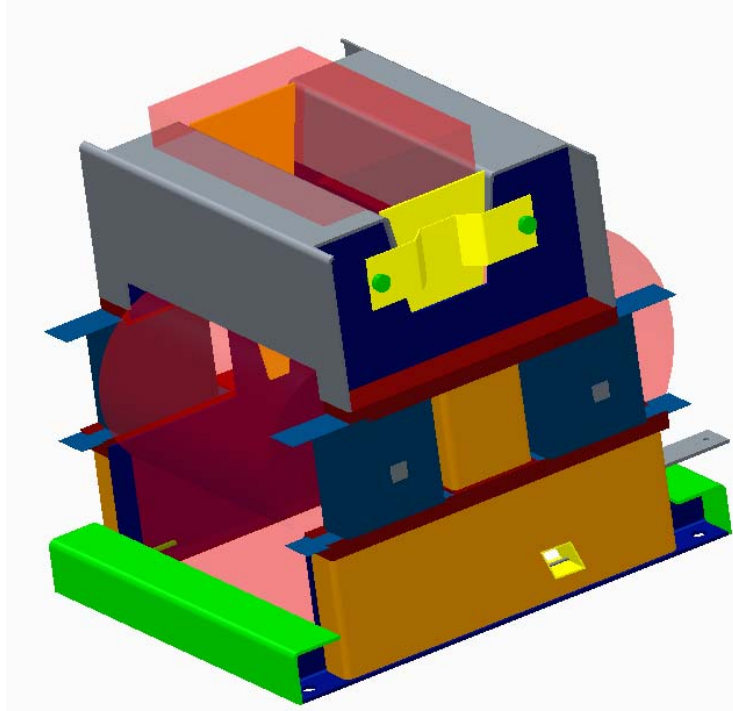


Figura 61. Esquema 3D del rediseño conceptual de la bancada, a partir de las funciones (elaboración propia).
"U" lateral inferior de una pieza

En la Figura 61 se muestra una única pieza con foma de "U" en la base.

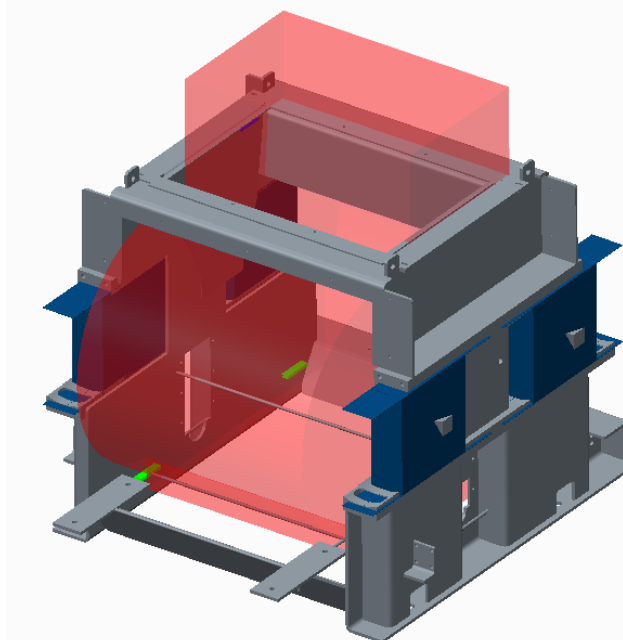


Figura 62. Esquema 3D del rediseño conceptual de la bancada, a partir de las funciones (elaboración propia).
"U" lateral inferior de dos piezas.



En la Figura 62 se muestra la base del conjunto lateral compuesta por dos piezas en forma de “U” para permitir la integración y mantenimiento del conjunto rascador.

Disminución de la complejidad.

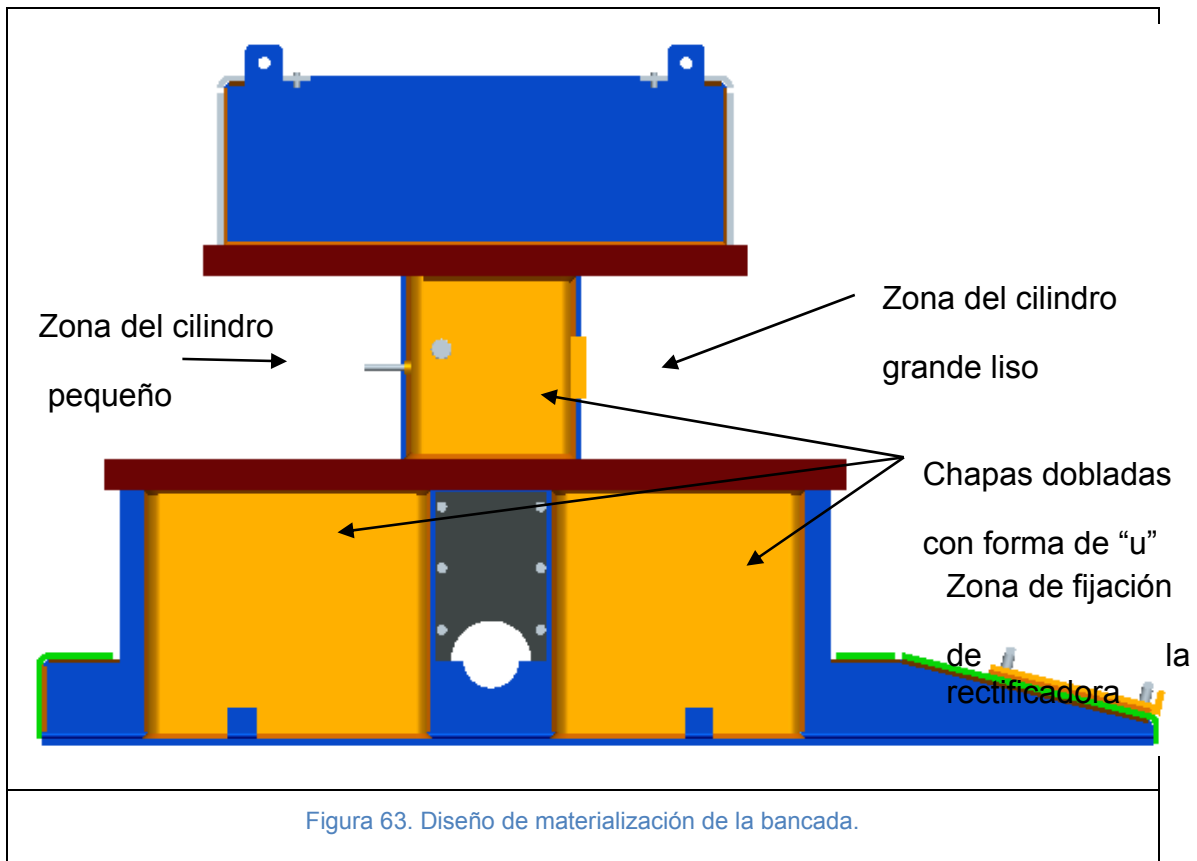
Para rebajar la complejidad en el rediseño, se rebajó el número de piezas totales, el número de piezas distintas y el número de interfases, enlace o conexiones.

Se conservó el proceso general de construcción electrosoldada, pero una vez comprendió que el diseño emulaba un diseño de piezas fundidas, se decidió trabajar con pocas piezas, grandes y que sustituyeran al gran número de piezas pequeñas del diseño previo.

Establecimiento de un elemento de base.

Para el diseño de la bancada se hizo uso las siguientes directrices en relación al establecimiento de un elemento base:

- Se dio las mínimas dimensiones compatibles con la funcionalidad (las dimensiones excesivas dificultan la rigidez y la resistencia). Se observó que las piezas del diseño original estaban sobredimensionadas. No habían sido optimizadas. Se estudió y comprobó, con el soporte de cálculos de resistencia con software CAE, que se podía disminuir de los espesores de las chapas y perfiles.
- Con el soporte del esquema de las funciones mecánicas de la máquina, se detectaron las líneas que unen los puntos más solicitados (rodamientos, soportes de guías, fuerzas exteriores para obtener mayor rigidez y resistencia; con el soporte de software CAE, se detectó que la parte de la bancada que aguantaba las principales deformaciones debidas al peso de los cilindros era la parte inferior, así como las guías de los dados porta rodamiento debían reforzarse adecuadamente. La parte superior sólo debía soportar el peso en caso de transporte, pero en el momento de funcionamiento de la máquina no necesita asegurar tolerancias ni una rigidez determinada.
- Se diseñaron piezas con formas simples, restringiendo las geometrías de las principales piezas a paredes planas y dobladas, con menor uso de mecanización y soldadura.
- Se buscaron formas cerradas, que son más rígidas que las abiertas (importante en elementos sometidos a torsión y a flexión). Por ejemplo dos piezas en formade U, cerrando un volumen.
- En lo posible, se estableció simetrías geométricas, como en el caso de las paredes laterales o las guías de los portarrodamientos.



Como se aprecia en la Figura 63, se tienen pocas piezas, de un tamaño grande conformadas por medio de corte por láser y posterior plegado por control numérico. La pieza de color azul (también en la Figura 60), es el elemento base, de referencia para las piezas plegadas, la guía inferior, de nuevo otra pieza plegada y sobre ella la guía superior.

Limitación de las direcciones de montaje.

Se diseñó la bancada para que las partes soldadas se monten en un solo sentido. Además se trabajó para que todas las piezas que se montan sobre ella a excepción del sistema de raspado se montasen también en un solo sentido.

A continuación en la se muestra una secuencia esquemática del montaje de las piezas (Figura 64).

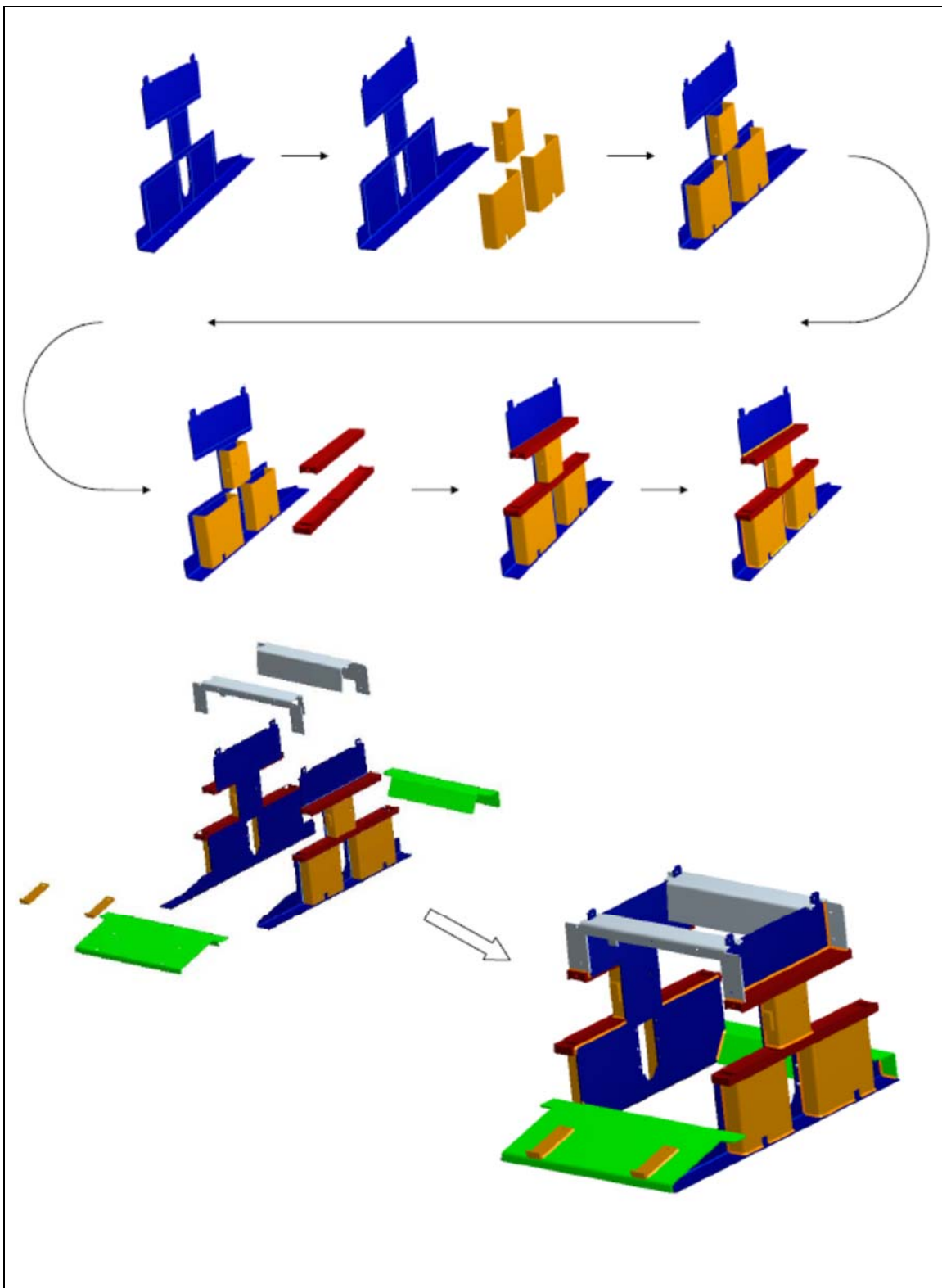


Figura 64. Fase de montaje de la bancada rediseñada *DFMA*



Facilitación de la composición.

Al reducir los espesores y dimensiones de las piezas, implícitamente se facilitó su manipulación. Por otra parte para facilitar el montaje de los portarrodamientos en las guías, teniendo en cuenta las dimensiones y pesos de los conjuntos cilindros-y portarrodamientos, se acortó la guía superior respecto a la inferior.

Se buscó trabajar en lo posible con piezas estructurales simétricas (por ejemplo” son tres parejas simétricas en forma de “U”). Los travesaños superiores y las chapas cortadas laterales, se diseñaron prácticamente simétrico.

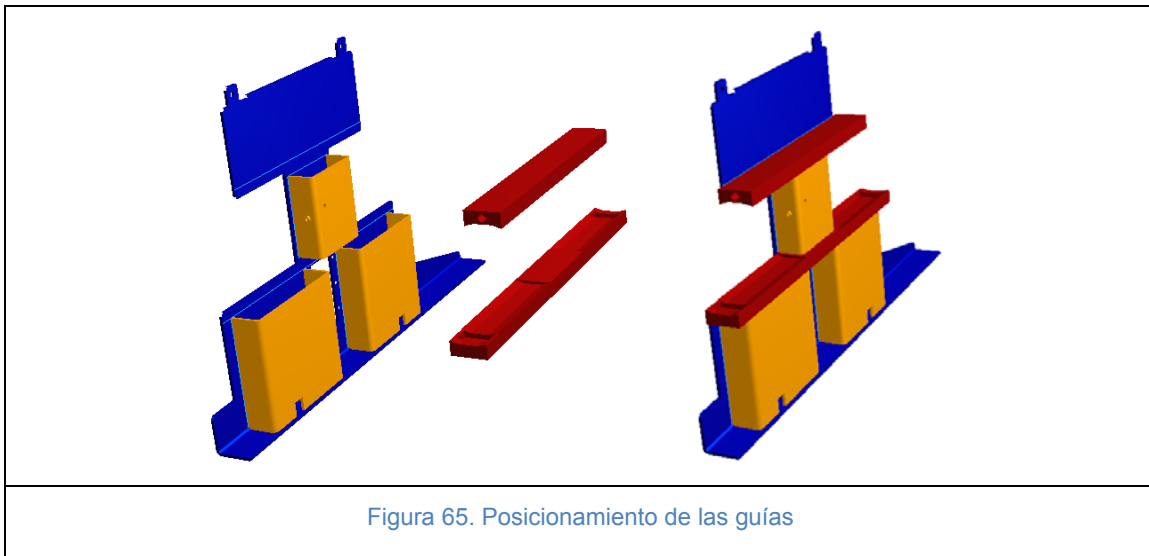


Figura 65. Posicionamiento de las guías

La posición de la guías es fundamental para el correcto funcionamiento de la máquina (Figura 65). Se hace la observación de que con este diseño, la precisión en la posición en sentido lateral de las piezas con forma de “U” inferiores no afecta a la autorreferenciación de las guías.

Simplificación de las uniones.

En este caso la mayoría de las uniones entre piezas de la bancada es por medio de soldadura y se han reducido longitudes a soldar, según estimaciones del investigador, de 66 m a 15 m.



7.5. Simplificación y normalización de los procesos de fabricación y variantes de materiales (DFM)

7.5.1. Simplificación y normalización de los procesos de fabricación (DFM)

En la primera toma de contacto con la máquina y la forma de trabajar de la empresa, se analizó el diseño de la máquina, se estudió las prioridades de diseño, la capacidad de fabricación y las tecnologías de fabricación utilizadas) y se observó que:

- en un momento de la historia de la empresa, en el traspaso de la fabricación por fundición de su maquinaria a fabricación por electrosoldadura, no se realizó un rediseño para optimizar el material empleado o reducirlo haciendo la maquinaria más ligera. Se considera que se realizó una transposición mimética de la forma de la bancada diseñada originalmente para ser fabricada por fundición, pero pasando a construirse por medio de la unión electrosoldada de chapas planas y otros elementos metálicos.
- las estaciones de soldadura y mandrinadora tenían una elevada carga de trabajo. Además, especialmente en la de soldadura, se depende mucho de la experiencia y el buen hacer del personal cualificado del taller de la empresa.
- había dificultad en la investigación de información sobre los estudios realizados en el pasado en lo que respecta a las fuerzas aplicadas, esfuerzos, reacciones y en general sobre el funcionamiento de la máquina,
- la mano de obra era el cuello de botella, ya que la construcción electrosoldada era artesanal. Se necesitaba alrededor de 16 h de mecanización y el 30% de material se hacía viruta.
- por estrategia de la empresa no externalizaban operaciones de fabricación, ya que los plazos que tenían que cumplir eran cortos, y tendrían menos flexibilidad, menos coste de transporte, menos stocks en curso, y además deseaban rentabilizar sus activos.
- querían innovar en tecnologías de procesos y adaptar sus productos a ellas.

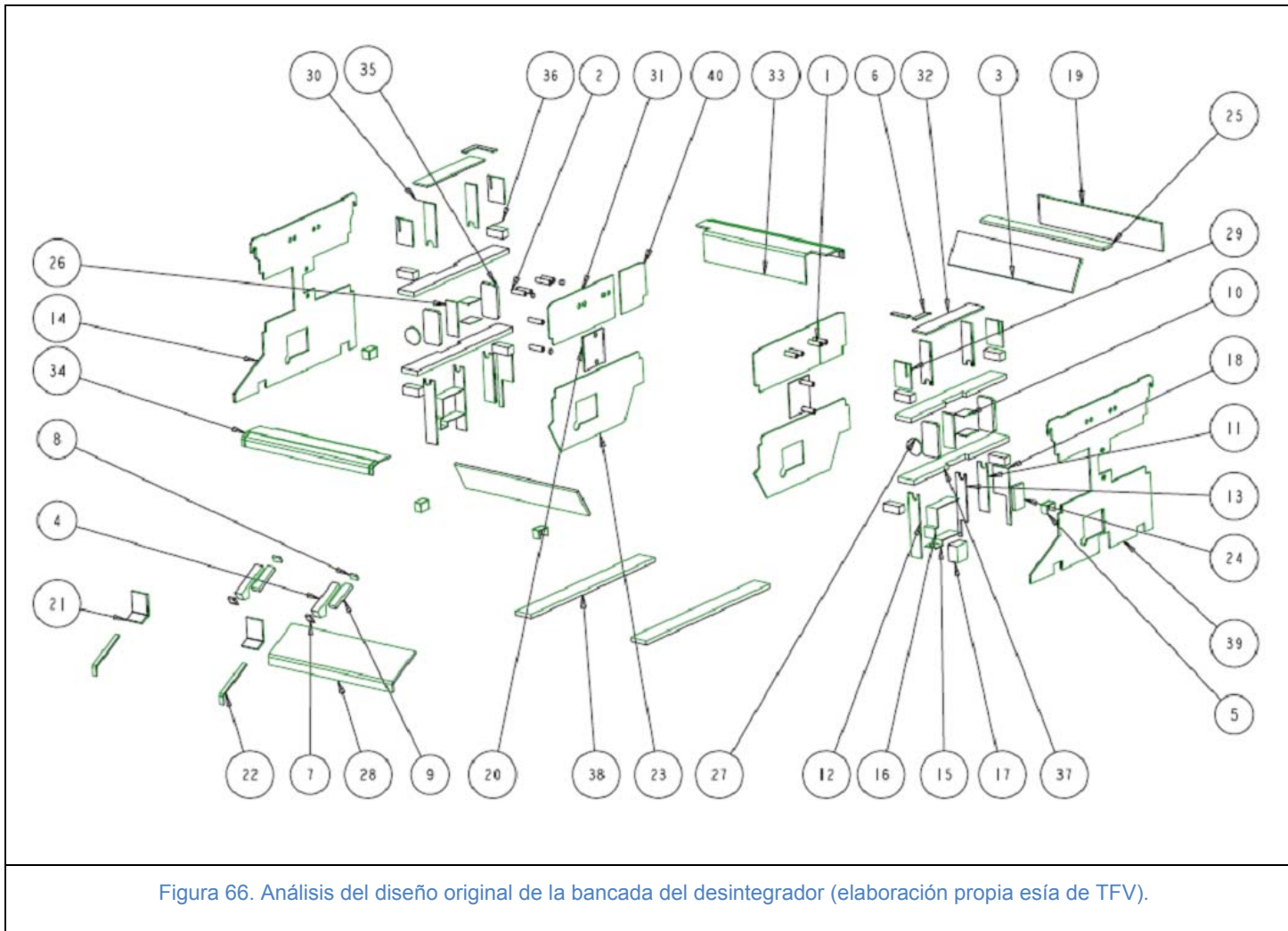
Por ello, y según los primeros conceptos generados en el apartado 7.4 y las funciones de la bancada establecidas en el apartado 7.2.4, se acordaron las siguientes directrices DFM para mejorar el proceso de fabricación de la bancada de la máquina. Concretamente las líneas de actuación que se adoptaron para realizar el rediseño fueron (de acuerdo con el apartado 6.5):



- Optimizar del material empleado para la construcción y fabricación de las máquinas: Para ello se utilizará perfiles metálicos esbeltos en chapa metálica. Ello además lleva a un menor uso de recursos y un menor impacto ambiental.
- Implantar las tecnologías de corte por láser y plegado de control numérico, para el procesamiento de la chapa metálica; el corte por láser permite trabajar hasta chapas de acero y perfiles hasta 20 mm de espesor, permitiendo trabajar con geometrías de corte complejas de buena calidad, y precisión, lo cual da muchas posibilidades al diseño para crear referencias, reducir las tareas de oxicorte y mecanizados posteriores. Por otra parte, trabajar en lo posible con piezas plegadas, por cada doblado, se ahorra dos cortes y una soldadura. Además en esos momentos, la empresa ya tenía previsto adquirir ya que la empresa adquirirá estas tecnologías de corte por láser y plegado por control numérico.
- Establecer, en lo posible, elementos de autorreferenciación como encajes, marcajes con láser, chaflanes, etc. que disminuye el uso de utillajes.
- Utilizar tolerancias laxas ya que facilita la obtención de las piezas y además éstas son más baratas.
- Disminuir la carga de soldadura mediante la utilización de plegados en las piezas en lugar de uniones soldadas; es posible disminuir muchos metros de soldadura por medio de operaciones de doblado y de esta forma optimizar el proceso de fabricación.
- Reducir la carga de trabajo en mandrinadora, en la medida de lo posible.
- Disminuir la complejidad tanto en la fabricación como en el montaje de la bancada, utilizando el menor número de piezas, el menor número de piezas diferentes, a fin de estandarizar.

7.5.2. Simplificación y normalización de las variantes de los materiales (DFM)

Una vez establecidas unas directrices en relación a los procesos de fabricación y materiales, en el apartado 7.5, se realiza una revisión del material con que se diseñaba la bancada. Se comenzó con el contaje del número de piezas y número de piezas diferentes de la Figura 66 y Tabla 4:



En la Figura 66, se muestra una vista de conjunto explosionado de la bancada del diseño original. En la figura se muestran las piezas numeradas, que se listan en la Tabla 4, para facilitar el conteo del número de piezas y número de piezas diferentes. También se listan los espesores de las piezas.

Tabla 4. Bancada original. Número de piezas totales y número de piezas diferentes

Datos de la solución original	-	-	-	1	2
	Masa subtotal (Kg)	Masa (Kg)	Espesor (mm)	Número de peza	Veces que se repite la pieza
pieza 1	7,2	1,2	40	1	6
pieza 2	7,2	1,2	40	2	6
pieza 3	176	88	25	3	2
pieza 4	22	11	35	4	2
pieza 5	2,8	0,7	3	5	4
pieza 6	3,12	0,78	10	6	4
pieza 7	1,46	0,73	20	7	2
pieza 8	1,3	0,65	20	8	2
pieza 9	12,3	6,15	35	9	2
pieza 10	1,64	0,41	3	10	4
pieza 11	13,4	6,7	16	11	2
pieza 12	26,7	8,9	16	12	3
pieza 13	7,2	7,2	16	13	1
pieza 14	182,8	182,8	16	14	1
pieza 15	1,5	0,75	2	15	2
pieza 16	2,4	1,2	2	16	2
pieza 17	18,8	18,8	100	17	1
pieza 18	15,2	7,6	16	18	2
pieza 19	76	76	25	19	1
pieza 20	14,6	7,3	10	20	2
pieza 21	14	7	16	21	2
pieza 22	5,4	2,7	16	22	2
pieza 23	102	51	10	23	2
pieza 24	7,04	7,04	30	24	1
pieza 25	36,8	36,8	25	25	1
pieza 26	9,8	4,9	16	26	2
pieza 27	5,2	2,6	16	27	2



pieza 28	137,2	137,2	25	28	1
pieza 29	21,32	5,33	16	29	4
pieza 30	23,52	5,88	16	30	4
pieza 31	59,2	29,6	10	31	2
pieza 32	36,4	18,2	16	32	2
pieza 33	115,8	115,8	16	33	1
pieza 34	84,2	84,2	16	34	1
pieza 35	55,6	13,9	30	35	4
pieza 36	72,8	9,1	75	36	8
pieza 37	339,2	84,8	45	37	4
pieza 38	205	102,5	40	38	2
pieza 39	179,8	179,8	16	39	1
pieza 40	22,6	11,3	10	40	2
PESO TOTAL (TN)	2,1265			40	99

Como se ve en la Tabla 4, la bancada original está compuesta por 99 piezas, 40 diferentes. En total tienen un peso estimado de 2.126 kg. Se observa que hay piezas muy grandes como la 14, 23, 31, 39 o la 40. Especialmente la 14 y la 39, que son piezas cortadas por oxiacorte, con su trazado previo, requieren muchos metros de corte y posteriormente soldadura. Por otra parte hay muchas piezas pequeñas y similares que no facilitan su identificación y requieren trabajos de corte, de acabado, para después ser encajadas de forma secuencial para construir las cajas metálicas que conformarán los soportes laterales de la bancada. También se aprecian muchas piezas distintas.

Para reducir los materiales y las gestiones asociadas a las compras, se determinó acotar los materiales que se van a usar para la construcción de la bancada. El material en sí es el mismo acero de máquinas, pero se decidió partir de chapas de espesores concretos y un tipo de perfil (únicamente para las guías) para la construcción de la bancada electrosoldada. Concretamente, tras diversas sesiones de trabajo con representantes de la oficina de diseño de materialización, de diseño de fabricación, del taller, de compras y dirección se acordó lo siguiente:

- La utilización de chapa de acero de máquinas de 10 mm para las zonas de la bancada sometida a grandes tensiones y chapa de 5mm para zonas prácticamente sin carga. debido a los esfuerzos que ha de soportar la bancada (según se ha comentado en el apartado 6.5.2).
- Para las guías se determinó utilizar un perfil de 50 mm de espesor.
- De nuevo se reiteró en buscar el menor número de piezas y de piezas diferentes con la finalidad de disminuir la complejidad tanto en la fabricación como en el montaje de la bancada.



Para facilitar al diseñador a ser consciente de la importancia de ceñirse a un grupo de materiales en concreto, se contrasta los grupos de espesores que se utilizaba en la bancada original y el grupo de espesores que se utilizó para el rediseño.

Agrupando los datos de los espesores de chapa usados en el diseño original de la Tabla 4, se cuenta 11 espesores diferentes de las chapas o perfiles (2, 3, 10, 16, 25, 30, 35, 40, 45, 75 y 100mm), tal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis espesores materiales de compra de la bancada.

Elemento (Diseño original)	Espesor en mm
Guías	45
Chapas de unión transversal superiores	16
Chapas de unión transversal inferiores	25
Chapas laterales inferiores	10
Chapas laterales exteriores	16
Demás elementos	2
	3
	30
	35
	40
	75
	100



A continuación se muestra Tabla de análisis de los espesores de las chapas y perfiles. De acuerdo con las directrices de diseño establecidas en el apartado 7.5.2, para la bancada rediseñada, se restringe los espesores a tres medidas:

Tabla 6. Análisis espesores materiales de compra de la bandada rediseñada DFMA.

Elemento (Rediseño DFMA)	Espesor en mm
Guías	50
Tapas superiores	10
Tapas móviles superiores (en amarillo en las figuras)	5
Chapas de unión transversal (en verde en las figuras)	10
“Túnel” de paso de la cuchilla (en amarillo en las figuras)	5
Demás elementos	10

En total se cuentan 2 espesores diferentes (5, 10 mm) y un perfil más grueso (50 mm) únicamente para las guías de los porta rodamientos ya que reciben grandes cargas tanto verticales (peso de los cilindros), como tracciones (debido a las fuerzas de tracción transmitidas por las piezas “puente” al paso de las piedras entre los cilindros. En resumen, se busca una reducción de 11 a 3 espesores.



7.6. Evaluación. Determinación del mejor concepto de diseño

En el presente apartado, se realiza un análisis del conjunto estructural rediseñado y se realiza una comparativa utilizando la herramienta de evaluación según comentado en el apartado 6.6

7.6.1. Análisis de bancada rediseñada

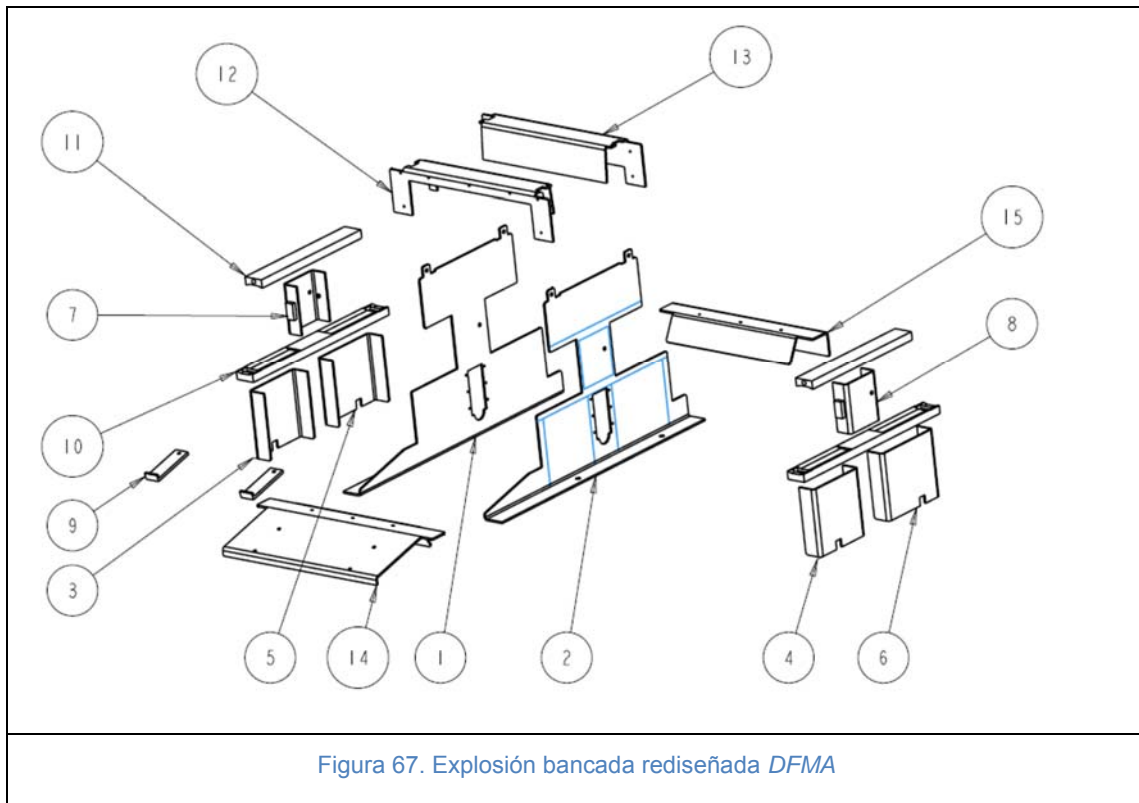


Figura 67. Explosión bancada rediseñada DFMA

El número de piezas se redujo considerablemente respecto a la bancada original (Figura 67).

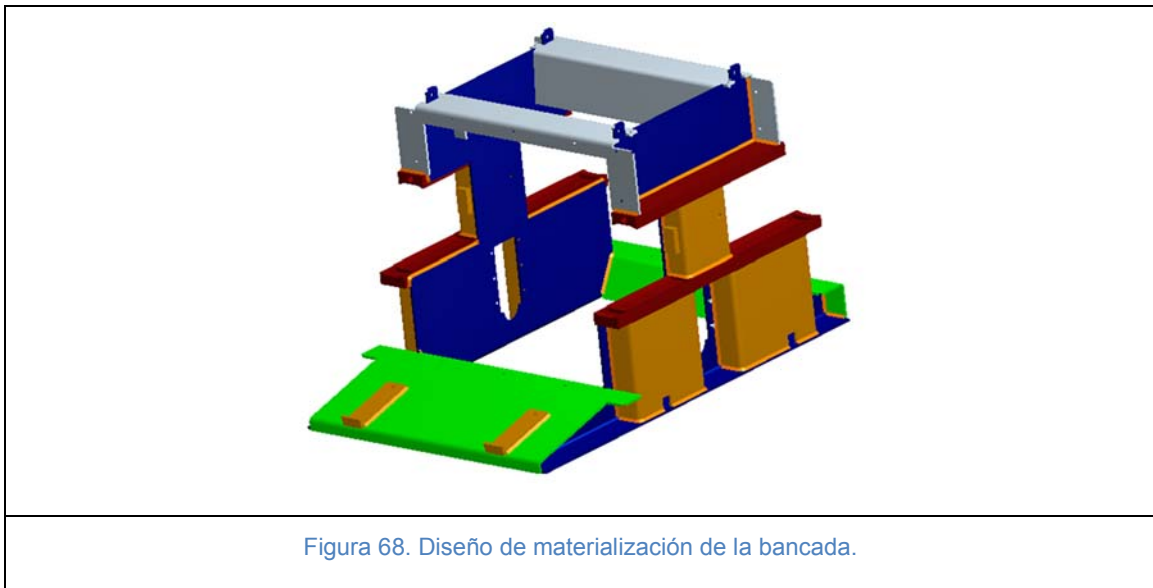
Tabla 7. Bancada original. Número de piezas totales y número de piezas diferentes

Datos de la máquina rediseñada	-	-	-	1	2
	Masa subtotal (Kg)	Masa (Kg)	Espesor (mm)	Número de peza	Veces que se repite
Planxa_base_dreta	85,8	86	10	1	1



Planxa_base_esquerra	85,8	86	10	2	1
Xapa_encaixonada_1_dreta	18,1	18	10	3	1
Xapa_encaixonada_1_esquerra	18,1	18	10	4	1
Xapa_encaixonada_2_dreta	19,9	20	10	5	1
Xapa_encaixonada_2_esquerra	19,9	20	10	6	1
Xapa_encaixonada_petita_dreta	10,8	11	10	7	1
Xapa_encaixonada_petita_esquerra	10,8	11	10	8	1
Fixació_rectificador	6,6	3,3	16	9	2
Guia_inferior	97,6	49	50	10	2
Guia_superior	74	37	50	11	2
Tapa_cilindro_lent (gris)	26,6	27	10	12	1
Tapa_cilindro_ràpid (gris)	43,3	43	10	13	1
Xapa_unió_lent (verd)	64,2	64	10	14	1
Xapa_unió_ràpid (verd)	35,8	36	10	15	1
Masa total (TN)	0,61			15	18

En la solución conceptual propuesta rediseñada se tienen 15 piezas en total, 18 diferentes, con un peso de 610 kg.

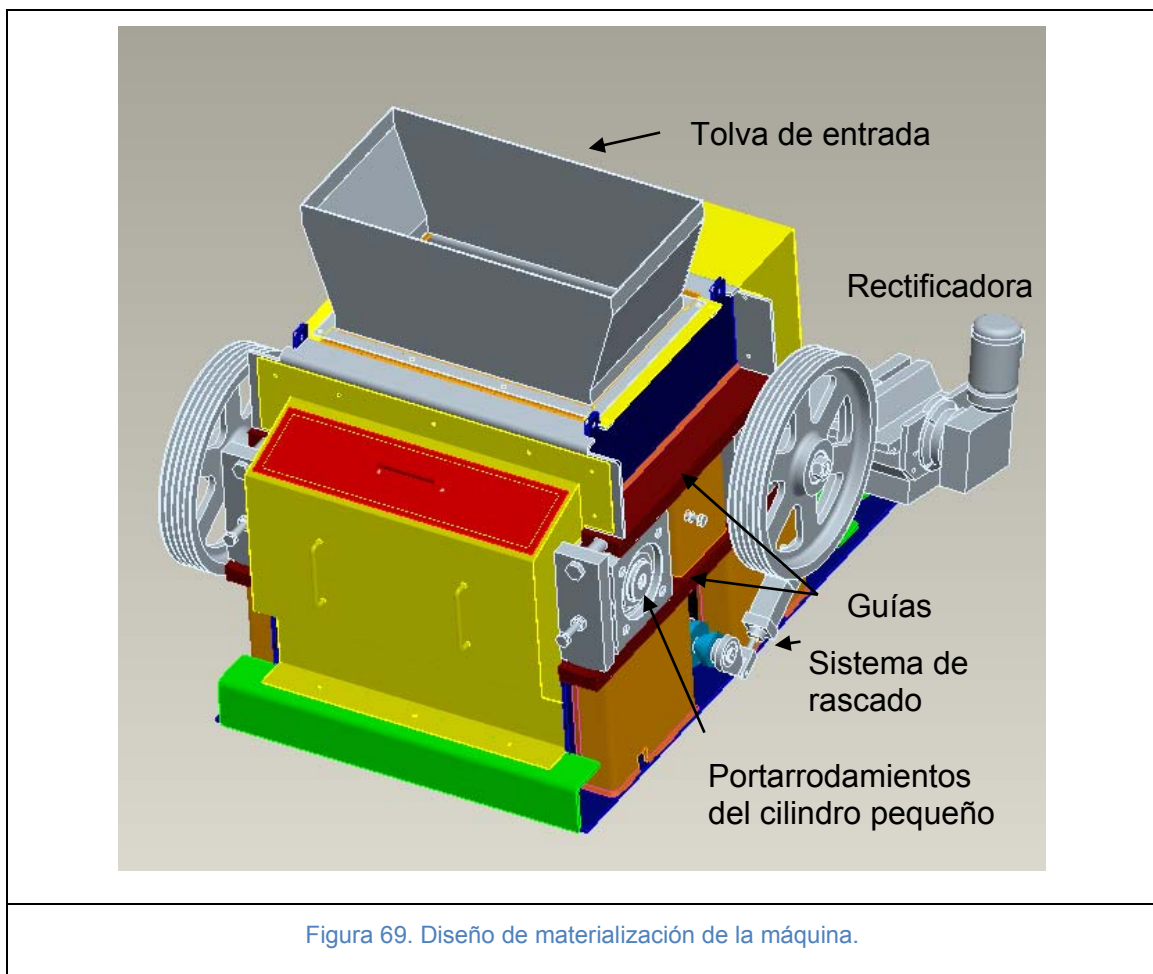


En la Figura 68 se muestra el diseño de materialización de la bancada. En color azul se tienen dos chapas laterales cortadas a láser, de 10 mm de espesor y con un plegado en la zona de apoyo en el suelo. Este doblado sirve de referencia a las piezas de color beige con forma de “U”.



7.6.2. Evaluación

La evaluación de la complejidad del diseño se puede realizar en cualquier momento durante los trabajos de rediseño. A medida que se desarrolla una solución alternativa, se puede evaluar con mayor precisión. Una vez se ha realizado el diseño de materialización, se puede realizar una evaluación para comparar las mejoras en el proceso de fabricación y montaje respecto del diseño original. En primer lugar se evalúa la bancada original y posteriormente el rediseño DFMA (Figura 69). En el caso de estudio se toma la herramienta propuesta en el apartado 6.6, y en la tabla Tabla 8 se muestran los resultados



En la Figura 69 se ve el diseño de materialización de la máquina con la tolva de entrada de material situada en la parte superior, poleas para accionar los cilindros, el sistema de rascado que atraviesa la máquina, y los portarrodamientos que están guiados entre las guías inferiores y las superiores..

Tabla 8. Tabla de evaluación de diseño desde el punto de vista de la fabricación y el montaje.

Evaluación comparativa de diseños de bancadas

Factor de evaluación		Solución inicial	39,0	Alternativa 1	12,7
Complejidad (gestión)	0,30	N	60,3	N	22,6
Montaje	Peso				
Piezas 1 (grandes)	2	12	24	16	32
Piezas 2 (Piezas básicas)	1	47	47	2	2
Piezas 3 (Piezas petites)	0,5	40	20	0	0
Piezas diferentes (gestió)	1	40	40	15	15
Proceso (tiempo o coste)	0,70	Long Tiempo	32,3	Long Tiempo	9,9
Conformación	Peso	m horas	N	m horas	N
Corte 1 (oxicorte, t<25 mm)	15	138	9,2	45	0,0
Corte 2 (laser)	20		0,0		2,3
Corte 3	20		0,0		0,0
Plegado 1 (l<500 mm; g<20)	20		0,0	15	0,8
Plegado 2 (500 a 1500 mm)	12	6	0,5	5	0,4
Plegado 3 (>1500 mm)	20		0,0		0,0
Montaje	Peso		9,7		3,4
Trazado 1 (clásico)	1		0,0		0,0
Trazado 2 (autoreferencia)	1		0,0		0,0
Preparación 1	1		0,0		0,0
Preparación 2 (chaflanes)	1		0,0		0,0
Soldadura 1 (t<5 mm)	15	66	0,0	15	0,0
Soldadura 2 (5<t<10 mm)	10		6,6		1,5
Unión deformación 1	1		0,0		0,0
Unión deformación 2	1		0,0		0,0
Proceso térmico 1	2		0,0		0,0
Proceso térmico 2	2		0,0		0,0
Acabados	Peso		6,6		1,5
Mecanización 1 (mandrinadora)	1	16	16,0	5	5,0
Mecanización 2	1		0,0		0,0
Preparación superficie 1	1		0,0		0,0
Preparación Superficie 2	1		0,0		0,0
Recubrimiento 1 (pintura)	1		0,0		0,0
Recubrimiento 2	1		0,0		0,0
			16		5

Como se ve en los resultados de la Tabla 8, la alternativa 1, que corresponde al rediseño de la bancada, presenta una menor complejidad de diseño (12.7) que la solución inicial (39) lo cual implica que es un diseño más simple. Además, presenta una complejidad de montaje también menor (22.6 contra 60.3) debido al menor número de piezas que montar (18 piezas contra 99 del diseño original). Asimismo, la complejidad de fabricación es también menor (9.9 contra 32.3 del diseño original). Esto se debe a la gran carga laboral relacionada con las operaciones de oxicorte, soldadura y operaciones de mecanización. En la propuesta de rediseño estos conceptos se han reducido en gran parte por la propia disminución del número de piezas, del uso de elementos base de referenciación, que recogen la complejidad geométrica conseguida diseñando para procesos de corte por láser y plegado por control numérico.

Esta herramienta de evaluación de la complejidad del diseño permite una pronta evaluación de la mejora del diseño, de una forma simple. En este caso, al haber tantas piezas pequeñas en el diseño original, la complejidad del diseño en sí es ya alta. No obstante, una vez ensambladas las dos cajas de soporte respectivamente, la complejidad de montaje de la unión entre ellas por medio de los perfiles no queda recogido, medido o evaluado. Esto es, la complejidad de montaje modular no queda expresado en este caso. En casos en que se considere que la estructura modular puede implicar una complejidad relevante, sería interesante estudiar este hecho.

En este caso y, teniendo en cuenta que pueden tenerse más elementos en cuenta, como las operaciones de pintado u otras que quedarán más precisadas tras el diseño de detalle, se considera que esta herramienta ayuda a evaluar cuantitativamente la disminución de la complejidad en la propuesta de rediseño. A falta de que sea aceptado por motivos tales como mejoras por temas de vibraciones (ya estudiado en el caso presente) o de acogida en el mercado, al haber disminuido aproximadamente 1.600 kg de material, los resultados arrojan una clara mejora en lo que respecta a la construcción de la bancada. Además, el montaje de otros elementos, como los dados portarrodamientos, se ha facilitado, por lo que si se ampliara la evaluación a la máquina en general (una vez finalizado el diseño de detalle, se tendrían constancia de una mejora global aún mayor.

7.7. Diseño de detalle (DFM)

El diseño de detalle requiere un trabajo exhaustivo para adaptar el diseño de materialización a las geometrías, dimensiones, tolerancias y en general acabar el diseño para fabricarlo con el mínimo coste, como se comenta en el apartado 6.

En esta etapa se busca optimizar los trabajos de fabricación y esta labor en el caso de estudio, lo realizó el equipo de diseño de la propia empresa.

En esta etapa es muy importante continuar con la metodología de diseño concurrente, ya que es fundamental contar con la experiencia de los profesionales de taller que participan en la fabricación, tienen experiencia sobre detalles que les facilitan el montaje y la fabricación. Por otra parte, hay directrices DFM de autores



y empresas que ayudan en el proceso de depurar el diseño de detalla para conseguir optimizar el coste asociado (ver apartado 6.7).

En el caso de estudio en la empresa en esta última etapa, coincidió con un cambio organizativo por lo que el equipo del CDEI-UPC no pudo analizar físicamente los resultados, aunque la empresa informó de la construcción de tres máquinas con la bancada rediseñada, con un gran ahorro en los tiempos, espacios de almacenaje y costes de su construcción.

7.8. Resultados del caso de estudio

Con las evaluaciones realizadas se ha comprobado una mejora en lo que respecta a las operaciones de fabricación y eficiencia de montaje en el diseño de materialización de la bancada por medio del DFMA respecto del diseño original. En concreto:

- Se ha reducido el número de espesores de chapas de 11 a 3.
- El montaje ser de todos los elementos de la bancada rediseñada se realiza en una sola dirección y sentido (exceptuando el túnel de la cuchilla).
- Se ha disminuido la complejidad, lo cual significa que se ha reducido el número de piezas totales, el número de piezas diferentes y las interfaces.
- Se ha estructurado el sistema en módulos.
- Se ha disminuido el número de piezas de 99 a 18 y de piezas diferentes de 40 a 15.
- Se han reducido las referencias de la compra.
- Se ha establecido un elemento de base, encima del cual se montan y referencian el resto de elementos (bancada).
- Han disminuido las direcciones de montaje.
- Se ha facilitado la composición.
- Se ha facilitado la referenciación.
- Se han simplificado las uniones.
- Se han cambiado en gran parte la tecnología de fabricación de oxicorte y soldadura por corte láser y plegado por control numérico.



A continuación se muestra una tabla resumen de algunos de los beneficios cuantificados de la bancada rediseñada (Tabla 9):

Tabla 9. Tabla resumen de las evaluaciones

	Bancada Original	Rediseño de Bancada
Peso (Toneladas)	2,126	0,617
Coefficiente de complejidad	39	12.7
Número de chapas de esperore diferentes	11	3
Direcciones de montaje	3	1
Número de piezas	99	18
Número de piezas diferentes	40	15
Soldadura (m)	66	15

7.9. Resumen del capítulo

En el presente trabajo se ha mostrado una experiencia hecha en el área del rediseño de bancadas de bienes de equipo.

Se ha adaptado y personalizado las recomendaciones generales de la metodología DFMA del capítulo 6 al proceso de diseño, aportando elementos que faciliten a las empresas fabricantes de bienes de equipo, el seguimiento de la metodología desde sus fases iniciales.

Se ha destacado la importancia de actualizar y establecer de forma clara y accesible para los diseñadores de pequeñas y medianas empresas, las funciones mecánicas de las bancadas, por medio de una representación gráfica, en formato CAD3D que condicionan el diseño de la bancada, sus dimensiones generales, la explicitación de zonas donde deben haber los pares prismáticos, o elementos del diseño previo, los puntos donde deben haber fijaciones o la restricción de zonas de flujo de material que no puede ser abordado, de fijaciones de apoyo en el suelo o de diversos componentes.

Esta información puede ser posteriormente utilizada durante el uso de los programas de CAD 3D mecánicos. En casos en que se utilizan las metodologías TDD, Creo, NX, Catia, con el soporte de la generación de esqueletos de referencia, puede utilizarse esta simbología para aportar el entendimiento



funcional de la máquina que se está diseñando, con el fin de no desviar los avances de diseño.

Se ha realizado un análisis de los procesos de fabricación y de los materiales y se han normalizado.

Al avanzar el diseño se ha podido ir evaluando por medio de una herramienta de evaluación de la complejidad del diseño de fácil aplicación. Esta evaluación ha servido para confirmar la mejor opción de diseño de materialización.



8. CONCLUSIONES, CONTRIBUCIONES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1. Conclusiones

La presente investigación ha investigado sobre herramientas y metodologías DFMA que facilitasen el rediseño de bancadas de construcción electrosoldada de equipos industriales.

En base a un caso de rediseño de una bancada de un desintegrador de tierras, ha sido posible identificar elementos metodológicos importantes para facilitar las tareas de rediseño al personal de una empresa líder en el sector de la cerámica.

Se ha comenzado con un análisis exhaustivo y completo de la máquina original, por medio de sesiones de trabajo con personal de diseño, del taller de fabricación de la propia empresa, del departamento comercial y de dirección. De este análisis, se ha conocido las funciones de la máquina y concretamente de la bancada.

Una vez centrados los trabajos en rediseñar la bancada, se han identificado una serie de mejoras y se han fijado unas directrices rígidas de diseño a aplicar en la materialización del nuevo diseño.

Para facilitar el diseño de materialización, se han generado unos elementos de soporte gráfico que recogen las funciones que condicionan la bancada. Estos elementos promueven el análisis exhaustivo de las funciones de la bancada y pueden ser visualizados en cualquier momento durante el diseño en CAD 3D, facilitando a los diseñadores el acceso inmediato a los condicionantes (dimensiones y tolerancias, zonas de anclaje de elementos intermedios, zonas de anclaje con el suelo, zonas de flujo de material procesado, pares prismáticos o de rotación o espacios ocupados por otros componentes).

Asimismo se ha hecho uso de herramientas de evaluación de las mejoras de las operaciones de fabricación y de montaje.

En resumen las principales conclusiones de esta tesis son:

- Desarrollo de una simbología de representación de funciones para facilitar la labor creativa de los diseñadores en las etapas de diseño.
- Desarrollo de una metodología para rediseñar bancadas de equipos industriales de construcción electrosoldada.
- Aportación de métodos de normalizar y simplificar los procesos de fabricación y los materiales.
- Evaluación temprana de la eficiencia de montaje y fabricación de una alternativa de diseño de una bancada electrosoldada.



8.2. Principales contribuciones

Durante el tiempo de la colaboración universidad – empresa, se ha construido una bancada que sorprendió por la facilidad de montaje y por su fiabilidad de funcionamiento. Aunque los principios de funcionamiento son los mismos, el resultado fue una máquina mucho más ligera, más barata de fabricar de trasladar y de gestionar.

Asimismo se ha contribuido con una empresa en:

- Orientar los pasos a seguir en la fase inicial de diseño de una bancada por construcción electrosoldada por DFMA.
- Capturar las funciones de la máquina para ponerlas a disposición del ingeniero de diseño.
- Facilitar la normalización de los materiales y tecnologías de fabricación utilizados en la construcción del conjunto estructural de la tipología de esa investigación simplificar su diseño y reducir las operaciones de montaje y fabricación.
- Determinar un método de evaluación de la complejidad de una solución rediseñada respecto a la original o entre varias alternativas.

8.3. Trabajos futuros

Este es un primer intento por parte del investigador de caracterizar la metodología utilizada durante el diseño de la bancada de la máquina desintegradora de tierras según los principios de la metodología DFMA. Debido a la escasa bibliografía referente a la aplicación del DFMA en el rediseño de este tipo de máquinas se ha personalizado una metodología concreta para este caso. Una vez aplicada la metodología, se considera que puede ser generalizable al rediseño de otros componentes de tipo bancada.

En el futuro, se propone completar la herramienta de cálculo de la complejidad adecuándolo a casos de empresas concretas, con datos más ajustados de acuerdo con sus bases de datos, incluso utilizando los costes reales asociados. También se considera útil para tener en cuenta la complejidad asociada a la gestión y montaje de módulos, es decir contabilizar la complejidad asociada al diseño de la disposición del conjunto, incorporando la dificultad de montaje de los diversos módulos.

Asimismo se considera adecuado afinar los factores de evaluación de ponderación que permitan evaluar diferentes soluciones desde el punto de vista de la fabricación y el montaje aplicables a bancadas electrosoldadas



Por último, se buscará la difusión de los conceptos de la metodología en congresos y revistas en el ámbito de diseño de máquinas e innovación tecnológica.





9. BIBLIOGRAFIA

- Wikipedia. (s. f.). Recuperado 2 de noviembre de 2015, a partir de <https://es.wikipedia.org/wiki/TTM>
- Aguilar, A., Roman-Flores, A., & Huegel, J. C. (2013). Design, refinement, implementation and prototype testing of a reconfigurable lathe-mill. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(2), 364-371. doi:10.1016/j.jmsy.2013.01.003
- Albiñana, J. C., & Vila, C. (2012). A framework for concurrent material and process selection during conceptual product design stages. *Materials & Design*, 41, 433-446. doi:10.1016/j.matdes.2012.05.016
- Amaya, C. L. (1999). Ingeniería Simultánea Un enfoque para reducir los tiempos de entrega , mejorar la calidad y disminuir los costos, 80-91.
- Andreasen, M. M., Kvist, M., Pedersen, R., & Fiil-Nielsen, O. (2006). What happened to DFMA-17 years DFX-symposia. En *17.Symposium „DESIGN FOR X“*. NEUKIRCHEN: IFS Publ Ltd. Recuperado a partir de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0020313238&partnerID=tZOtx3y1>
- Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design*. *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier. doi:10.1016/B978-1-85617-663-7.00026-6
- Asiedu, Y., & Gu, P. (1998). Product life cycle cost analysis: State of the art review. *International Journal of Production Research*. Recuperado a partir de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0032046060&partnerID=tZOtx3y1>
- Automatica e Instrumentación. (2004). Recuperado 23 de octubre de 2015, a partir de http://www.girbau.es/arxius/dossiers_prensa/Automatica_e_Instrumentacion_dic_04.pdf
- Bergerson, A. (2010). DFMA CHALLENGES AND SUCCESS AT BELL HELICOPTER, 1-8.
- Bernard, A. (2008). *Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management*. Recuperado a partir de http://florent.laroche.free.fr/recherche/publis-SPI/978-3-540-78430-2_Book_PrintPDF_d%C3%A9finitif_EXTRACT_FL.pdf
- Bogue, R. (2012). Design for manufacture and assembly: background, capabilities and applications. *Assembly Automation*, 32(2), 112-118.



doi:10.1108/01445151211212262

- Boothroyd Dewhurst, Inc. (2015). Recuperado 19 de septiembre de 2015, a partir de <http://www.dfma.com/>
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. (2002). *Product design for manufacturing and assembly*. (I. Marcel Dekker, Ed.) (Second.). New York.
- CDEI-UPC. (2015). Recuperado 15 de octubre de 2015, a partir de <http://www.cdei.upc.edu/es/>
- Chu, D., Chu, X., Lv, G., Su, Y., & Chen, D. (2014). Multi-skeleton 0 odel for 7 op-down ' esign of & omplex 0 odular 3 roducts, 1-5. Recuperado a partir de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7058782>
- Cortés Sáenz, D. (2012). Sistema experto de selección de procesos no convencionales para corte de chapa metálica. Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado a partir de <http://www.tdx.cat/handle/10803/81559>
- De Fazio, T. L., Edsall, A. C., Gustavson, R. E., Hernandez, J., Hutchins, P. M., Leung, H. W., ... Whitney, D. E. (1993). Prototype of feature-based design for assembly. *Journal of Mechanical Design, Transactions Of the ASME*, 115(4), 723-734. Recuperado a partir de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0027850932&partnerID=tZOtx3y1>
- Dencovski, K., & Wagner, T. (2008). Customer-oriented innovation of engineering tools - a holistic methodology to close the gap to customer productivity. En *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA* (pp. 687-692). doi:10.1109/ETFA.2008.4638470
- Derbi. (s. f.). Recuperado 3 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.derbi.com/>
- Desintegrador. (2007). Recuperado 19 de septiembre de 2015, a partir de http://www.verdes.com/productes-fitxa_web-16-esp-desintegradores.htm
- Edwards, K. . (2002). Towards more strategic product design for manufacture and assembly: priorities for concurrent engineering. *Materials & Design*, 23(7), 651-656. doi:10.1016/S0261-3069(02)00050-X
- Enrique, L., & La, A. (2008). El universo del consumo, 75-82. Recuperado a partir de http://www.metalactual.com/revista/30/automatizacion_plm.pdf
- Estrada, G., & Lloveras, J. (2011). Application of Moka Methodology To Capture Knowledge in Design for Poka-. *Engineering*, (August), 1-10.



- Ferrer, I., Rios, J., Ciurana, J., & Garcia-Romeu, M. L. (2010). Methodology for capturing and formalizing DFM Knowledge. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(5), 420-429. doi:10.1016/j.rcim.2009.12.003
- Gagnon, B., Leduc, R., & Savard, L. (2012). From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability. *Journal of Engineering Design*, 23(1), 49-74. doi:10.1080/09544828.2010.516246
- Galvalume. (s. f.). Recuperado 23 de octubre de 2015, a partir de <http://www.galvalume.com/>
- Gao, J., Baxter, D., Case, K., Harding, J., Young, R., Cochrane, S., & Dani, S. (2007). An engineering design knowledge reuse methodology using process modelling. *Research in Engineering Design*, 18(1), 37-48. doi:10.1007/s00163-007-0028-8
- Garetti, M., Rosa, P., & Terzi, S. (2012). Life Cycle Simulation for the design of Product–Service Systems. *Computers in Industry*, 63(4), 361-369. doi:10.1016/j.compind.2012.02.007
- Giudice, F., Ballisteri, F., & Risitano, G. (2009). A Concurrent Design Method Based on DFMA–FEA Integrated Approach. *Concurrent Engineering*, 17(3), 183-202. doi:10.1177/1063293X09343337
- Gopsill, J. A., McAlpine, H. C., & Hicks, B. J. (2011). Learning from the lifecycle: The capabilities and limitations of current product lifecycle practice and systems. En *ICED 11 - 18th International Conference on Engineering Design - Impacting Society Through Engineering Design* (Vol. 6, pp. 141-152). Recuperado a partir de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84858839002&partnerID=tZOtx3y1>
- Harik, R. F., & Sahmrani, N. (2010). DFMA+, A Quantitative DFMA Methodology. *Computer-Aided Design and Applications*, 7(5), 701-709. doi:10.3722/cadaps.2010.701-709
- Hirtz, J., Stone, R., McAdams, D., Szykman, S., & Wood, K. (2002). A functional basis for engineering design: Reconciling and evolving previous efforts %J Research in Engineering Design. *Research in Engineering Design*, 13(2), 65-82. doi:10.1007/s00163-001-0008-3
- Hou, Y. M., Hei, G. J., Wang, X. Y., Cao, Y. F., & Zhao, Z. (2014). Graph Based Property Representation for the Function Decomposition. *Applied Mechanics and Materials*, 490-491, 528-532. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.528



- Hsu, W., Fuh, J., & Zhang, Y. (1998). Synthesis of design concepts from a design for assembly perspective. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 11(1-2), 1-13. doi:10.1016/S0951-5240(98)80003-7
- Industria, M. (2013). Informe competitividad industrial española. Recuperado a partir de <https://www.pwc.es/es/publicaciones/gestion-empresarial/assets/informe-competitividad-industria-esp.pdf>
- Kalyun, M., & Wodajo, T. (2012). Application of a Design Method for Manufacture and Assembly, 17 - 19.
- Kleiner, M., Geiger, M., & Klaus, A. (2003). Manufacturing of lightweight components by metal forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(2), 521-542. Recuperado a partir de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0347720954&partnerID=tZOtx3y1>
- Knight, W. a. (2005). Integrated design for manufacture, service and environment, 17-30.
- Kuo, T.-C., Huang, S. H., & Zhang, H.-C. (2001). Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 41(3), 241-260. doi:10.1016/S0360-8352(01)00045-6
- LeBacq, C., Brechet, Y., Shercliff, H. ., Jeggy, T., & Salvo, L. (2002). Selection of joining methods in mechanical design. *Materials & Design*, 23(4), 405-416. doi:10.1016/S0261-3069(01)00093-0
- Li, W. D., Ong, S. K., Fuh, J. Y. H., Wong, Y. S., Lu, Y. Q., & Nee, a. Y. C. (2004). Feature-based design in a distributed and collaborative environment. *Computer-Aided Design*, 36(9), 775-797. doi:10.1016/j.cad.2003.09.005
- Llorente Galera, F. (2009). Innovación Tecnológica, Sistemas Y Técnicas Utilizadas En La I+D Por Los Proveedores Directos En Cataluña De Los Fabricantes De Automóviles. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 15(2), 43-62. doi:10.1016/S1135-2523(12)60088-4
- Ma, Y. S., Tang, S. H., Au, C. K., & Chen, J. Y. (2009). Collaborative feature-based design via operations with a fine-grain product database. *Computers in Industry*, 60(6), 381-391. doi:10.1016/j.compind.2009.02.013
- Mun, D., Hwang, J., & Han, S. (2009). Protection of intellectual property based on a skeleton model in product design collaboration. *Computer-Aided Design*, 41(9), 641-648. doi:10.1016/j.cad.2009.04.007
- Munguía, & J. (2009). *RMADS:Development of a concurrent rapid manufacturing*



advice system.

- Niebles, E. (2007). Model of design and knowledge in technologies of weld for the welded product development. *Scientia Et Technica, XIII*, 473-478.
- Norton, R. L. (1998). *Machine design. An integrated approach*. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- NX Knowledge Fusion for Designers. (s. f.). Recuperado 2 de noviembre de 2015, a partir de http://www.plm.automation.siemens.com/nl_nl/support/trainingen/overzicht/nx/nx-knowledge-fusion-designers.shtml
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. (2007). *Engineering Design. Engineering Design: A Systematic Approach*. London: Springer London. doi:10.1007/978-1-84628-319-2
- Plasfi. (s. f.). Recuperado 3 de noviembre de 2015, a partir de <http://plasfi.com/>
- PTC. (2011). Suggested Technique for Using Skeleton Models to Achieve Top-Down Assembly Design.
- Pugh, S. (1991). *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. (Addison-Wesley, Ed.). Prentice Hall.
- Rachuri, S., Han, Y.-H., Fofou, S., Feng, S. C., Roy, U., Wang, F., ... Lyons, K. W. (2006). A Model for Capturing Product Assembly Information. *Journal of Computing and Information Science in Engineering, 6*(1), 11. doi:10.1115/1.2164451
- RAE. (s. f.). Recuperado 2 de noviembre de 2015, a partir de <http://dle.rae.es/?w=diccionario>
- Riba, C. (2002). *Diseño concurrente*. (E. UPC, Ed.). Barcelona.
- Riba, C. (2008). *Selección de materiales en el diseño de máquinas*. (E. UPC, Ed.). Barcelona: Edicions UPC.
- Riba, C., & Molina, A. (2006). Ingeniería concurrente :una metodología integradora. *Polítext, 175*, 314.
- Samy, S. N., & ElMaraghy, H. A. (2012). Complexity mapping of the product and assembly system. *Assembly Automation, 32*(2), 135-151. doi:10.1108/01445151211212299
- Shehab, E. M., & Abdalla, H. S. (2001). An Integrated Prototype System For Cost-Effective Design. *Concurrent Engineering, 9*(4), 243-256. doi:10.1177/1063293X0100900402



- SSAB. (s. f.). Recuperado 23 de octubre de 2015, a partir de <http://www.ssab.com/es/>
- Stauffer, L., & Smith, W. (2005). TECHNIQUES TO LARGE SCALE WELDMENTS PRODUCED IN SMALL VOLUMES, 1-13.
- Stauffer, L.;Smith, W. (2005). Applying design for manufacture and assembly techniques to large scale weldments produced in small volumes. En *Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design* (Vol. DS 35). Recuperado a partir de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84862613515&partnerID=tZOtx3y1>
- Summers, J. D., Vargas-Hernández, N., Zhao, Z., Shah, J. J., & Lacroix, Z. (2001). Comparative study of representation structures for modeling function and behavior of mechanical devices. En *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference* (Vol. 1, pp. 165-178). Recuperado a partir de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-1342281466&partnerID=tZOtx3y1>
- Tasalloti, H., Eskelinen, H., Kah, P., & Martikainen, J. (2015). An integrated DFMA-PDM Model for the design and analysis of challenging similar and dissimilar welds. *JMADE*. doi:10.1016/j.matdes.2015.10.012
- TFV. (2015). Recuperado 16 de octubre de 2015, a partir de <http://www.verdes.com/>
- Tiwari, V., Jain, P. K., & Tandon, P. (2013). Design Process Automation Support through Knowledge Base Engineering. *World Congress on Engineering, II*, 1-6.
- Todić, V., Lukić, D., Milošević, M., Jovičić, G., & Vukman, J. (2012). MANUFACTURABILITY OF PRODUCT DESIGN REGARDING SUITABILITY FOR MANUFACTURING AND ASSEMBLY (DfMA). *Journal of Production Engineering*, 16(1), 47-50.
- Top-down y bottom-up - Wikipedia, la enciclopedia libre. (s. f.). Recuperado 2 de noviembre de 2015, a partir de https://es.wikipedia.org/wiki/Top-down_y_bottom-up
- Ullman, D. G. (2008). *The mechanical design process* (Fourth Edi.). New York: McGraw-Hill.
- Verdés, T. F. (s. f.). desintegradores.pdf. Recuperado 19 de septiembre de 2015, a partir de http://www.verdes.com/productes-fitxa_web-16-esp-



desintegradores.htm

Zakaria, M. N. Bin. (2009). Design for Assembly and Application Using Hitachi Assemblability Evaluation Method. *Evaluation*, (November).