



Universitat de Lleida

Esterilización de productos enlatados mediante inducción electromagnética. Simulación por elementos finitos

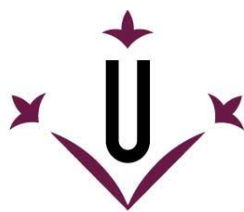
Raúl Ansó Blanco

<http://hdl.handle.net/10803/687491>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



Universitat de Lleida



TESIS DOCTORAL

ESTERILIZACIÓN DE PRODUCTOS ENLATADOS MEDIANTE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA. SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

RAÚL ANSÓ BLANCO
2022

Memòria presentada per optar al grau de Doctor per la Universitat de
Lleida

Programa de Doctorat en Ciència i Tecnologia d'Aliments

Director/a
Albert Ibarz Ribas
Rafael López Vázquez

Tutor/a
Albert Ibarz Ribas

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mis directores de tesis, los Doctores Rafael López Vázquez y Albert Ibarz Ribas, por todo lo que me habéis enseñado durante estos años dedicándome vuestro valioso tiempo y por estar siempre ahí para lo que he necesitado. Todo un ejemplo a seguir tanto personalmente como profesionalmente.

A la Consejería de Desarrollo Económico e Innovación del Gobierno de La Rioja y a la Agencia de Desarrollo Económico de La Rioja (ADER) por la financiación de esta tesis.

A todos mis compañeros del Ctic Cita, gracias por apoyarme y darme la oportunidad de incorporarme al centro para realizar la tesis doctoral. En especial a Rafa por confiar en mí y estar ahí al pie del cañón para sacar todo adelante; a Laura por esos momentos de planta piloto, en los que o vivíamos o moríamos los dos, pero ahí estabas haciendo como que te reías y todo estaba controlado jajaja; y a Mónica, por todos los buenos momentos vividos, por todo lo que me has tenido que aguantar en el despacho (yo a ti también, porque si algo eres, es gruñona...ña ña ñaaa...), y por ser un ejemplo de cómo sacar adelante una tesis cuando nos encontramos con numerosos y diversos problemillas. Mil gracias, esta tesis también os pertenece!!

A mis padres, Begoña y José Emilio, sois un ejemplo para mí, muchas gracias por todos los consejos y por todo el cariño que me habéis dado. Como no, a mis abuelos Jose Luis y Pili y a mi vecina Pili, nunca han tenido dudas de mí y como toda la vida, durante estos 4 años, han sabido que todo iba a salir bien.

Y por último a Amaya, muchas gracias por tu paciencia y tu apoyo. En los momentos más difíciles, has sabido hacerme desconectar y sacarme una sonrisa, y eso que no ha sido nada fácil. Ya lo sabes todo, muchas gracias.

Muchísimas gracias a todos, estoy orgulloso de haber compartido esta experiencia con cada uno de vosotros.

RESUMEN/RESUM/SUMMARY

RESUMEN

En la actualidad, la esterilización de los envases metálicos, rígidos y cilíndricos usados en conservas se obtiene mediante la aplicación de calor a los mismos. En el caso de los alimentos envasados no es posible el tratamiento HTST. La inducción electromagnética (IE) provoca el calentamiento del material ferroso de la lata. De esta manera, la energía se aplica en el lugar exacto donde se requiere realmente, reduciendo los tiempos de esterilización.

El principal objetivo del estudio es validar el calentamiento por inducción electromagnética para esterilizar alimentos enlatados y realizar una simulación del tratamiento térmico.

Cita junto a IKERLAN y Grupo RIBEREBRO ha desarrollado un autoclave para latas basado en el calentamiento por inducción electromagnética. A lo largo del estudio se ha trabajado con 3 simulantes alimentarios (agua, silicona y aceite) y 3 alimentos (cardo, champiñón y alubia blanca). Una vez estudiado el comportamiento de dichos productos, se ha desarrollado un modelo de simulación con elementos finitos mediante Comsol Multiphysics.

Los estudios realizados con los simulantes alimentarios muestran como la IE es una tecnología apta para la esterilización de alimentos acuosos, con líquido de gobierno en base a agua o de baja viscosidad. En cuanto al tratamiento de cardo, champiñón y alubia blanca, se ha reducido el tiempo de tratamiento un 75-90%, obteniendo un producto final de mejor calidad fisicoquímica y sensorial. El calentamiento por inducción electromagnética y la transmisión de calor interna en el producto se ha simulado con Comsol Multiphysics.

Gracias al equipo desarrollado en Ctic Cita, se ha conseguido mejorar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de productos, trasladando el concepto HTST a productos envasados y obteniendo un producto de calidad organoléptica superior a los existentes en el mercado.

Palabras clave: esterilización, simulantes, alimentos, conservas, inducción electromagnética, simulación, elementos finitos.

RESUM

En l'actualitat, l'esterilització dels envasos metàl·lics, rígids i cilíndrics usats en conserves s'obté mitjançant l'aplicació de calor a aquests. En el cas dels aliments envasats no és possible el tractament HTST. La inducció electromagnètica (IE) provoca l'escalfament del material ferrós de la llauna. D'aquesta manera, l'energia s'aplica en el lloc exacte on es requereix realment, reduint els temps d'esterilització.

El principal objectiu de l'estudi és validar l'escalfament per inducció electromagnètica per a esterilitzar aliments enllaunats i realitzar una simulació del tractament tèrmic.

Citic Cita al costat de IKERLAN i del Grup RIBEREBRO ha desenvolupat un autoclau per a llaunes basat en l'escalfament per inducció electromagnètica. Al llarg de l'estudi s'ha treballat amb 3 simulants alimentaris (aigua, silicona i oli) i 3 aliments (card, xampinyó i mongeta blanca). Una vegada estudiat el comportament d'aquests productes, s'ha realitzat un model de simulació amb elements finits mitjançant Comsol Multiphysics.

Els estudis realitzats amb els simulants alimentaris mostren com la IE és una tecnologia apta per a l'esterilització d'aliments aquosos, amb líquid de govern sobre la base d'aigua o de baixa viscositat. Quant al tractament de card, xampinyó i mongeta blanca, s'ha reduït el temps de tractament un 75-90%, obtenint un producte final de millor qualitat físic-química i sensorial. L'escalfament per inducció electromagnètica i la transmissió de calor interna en el producte s'ha aconseguit simular amb Comsol Multiphysics.

Gràcies a l'equip desenvolupat en Citic Cita, s'ha aconseguit millorar les propietats físic-químiques i sensorials de productes, aconseguint traslladar el

concepte HTST a productes envasats i obtenint un producte de qualitat organolèptica superior als existents en el mercat.

Paraules clau: esterilització, simulants, aliments, conserves, inducció magnètica, simulació, elements finits.

SUMMARY

Nowadays, the sterilization of metal, rigid and cylindrical containers used in canning is achieved by heating them. However, HTST treatment is not possible when talking about packaged foods. Electromagnetic induction (EI) causes heating of the ferrous material of the can; thus, the energy is applied at the exact place where it is required, reducing sterilization times.

The main objective of the study is to validate electromagnetic induction heating for sterilizing canned food and to perform a simulation of the heat treatment.

Ctic Cita together with IKERLAN and Grupo RIBEREBRO has developed an autoclave for cans based on electromagnetic induction (EI) heating. Throughout the study, 3 food simulants (water, silicone, and oil) and 3 foods (cardoon, mushroom, and white bean) have been used. Once the behaviour of these products had been studied, a finite element simulation model was carried out using Comsol Multiphysics.

The studies carried out with food simulants show how EI is a suitable technology for the sterilization of aqueous foods, with water-based or low-viscosity governing liquid. As for the treatment of cardoon, mushroom and white bean, the treatment time has been reduced by 75-90%, obtaining a final product of improved physicochemical and sensory quality. Electromagnetic induction heating and internal heat transfer in the product have been simulated with Comol Multiphysics,

Thanks to the equipment developed at Ctic Cita, it has been possible to improve the physicochemical and sensory properties of the products,

transferring the HTST concept to packaged products and obtaining superior organoleptic quality to those existing on the market.

Keywords: sterilization, simulants, food, canned food, electromagnetic induction, simulation, finite elements.

ÍNDICES

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	25
2	OBJETIVOS	28
3	ANTECEDENTES	30
3.1	Tratamiento térmico de alimentos	31
3.1.1	Cocción, pasteurización y esterilización	31
3.1.2	Transmisión de calor. Radiación, convección y conducción.	35
3.1.3	Transmisión de calor en alimentos	38
3.1.4	Estudio del tratamiento térmico mediante simulantes alimentarios.....	44
3.2	Calentamiento por inducción electromagnética.	46
3.2.1	Simulación del tratamiento térmico de esterilización por inducción electromagnética mediante Comsol Multiphysics	49
4	PLAN DE TRABAJO.....	51
5	MATERIAL Y MÉTODOS.....	53
5.1	Equipos comunes.....	54
5.2	Materiales	60
5.3	Estudio del tratamiento de esterilización por inducción electromagnética mediante simulantes alimentarios	61
5.4	Esterilización de cardo enlatado	63
5.4.1	Análisis microbiológico	65
5.4.2	Caracterización fisicoquímica	66

5.4.3	Análisis sensorial.....	67
5.5	Esterilización de champiñón enlatado	69
5.5.1	Análisis microbiológico	71
5.5.2	Caracterización fisicoquímica	72
5.5.3	Análisis sensorial.....	72
5.6	Esterilización de alubia blanca enlatada.....	73
5.6.1	Análisis microbiológico	75
5.6.2	Caracterización fisicoquímica	76
5.6.3	Análisis sensorial.....	78
5.7	Simulación del tratamiento térmico de esterilización por inducción electromagnética.....	78
5.7.1	Modelo físico.....	79
5.7.2	Modelo matemático	82
5.7.3	Geometría	86
5.7.4	Propiedades de los materiales.....	88
5.7.5	Mallado.....	90
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	94
6.1	Simulantes alimentarios.....	95
6.1.1	Agua.	95
6.1.2	Aceite de oliva.....	105
6.1.3	Silicona 1000mPa·s.....	109

6.2	Esterilización de cardo enlatado	114
6.2.1	Curvas de temperatura del tratamiento de esterilización.....	115
6.2.2	Análisis microbiológico. Test de estabilidad de conservas..	119
6.2.3	Caracterización fisicoquímica.	120
6.2.4	Análisis sensorial.....	129
6.3	Esterilización de champiñón enlatado	132
6.3.1	Curvas de temperatura del tratamiento de esterilización.....	132
6.3.2	Análisis microbiológico. Test de estabilidad de conservas..	136
6.3.3	Caracterización fisicoquímica.	137
6.3.4	Análisis sensorial.....	147
6.4	Esterilización de alubia blanca enlatada.....	150
6.4.1	Curvas de temperatura del tratamiento de esterilización.....	150
6.4.2	Análisis microbiológico. Test de estabilidad de conservas..	154
6.4.3	Caracterización fisicoquímica.	155
6.4.4	Análisis sensorial.....	166
6.5	Simulación del tratamiento térmico de esterilización por inducción electromagnética.....	170
7	CONCLUSIONES	182
8	BIBLIOGRAFÍA	186
	ANEXO 1. HOJAS DE CATA	195

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismos de transmisión de calor: a) conducción b) convección c) radiación (Fuente: Pérez Reyes & Sosa Morales, 2013).	36
Figura 2. Penetración de calor de alimentos calentados por convección.	40
Figura 3. Penetración de calor de alimentos calentados por conducción.	41
Figura 4. Penetración de calor de alimentos calentados por convección	42
Figura 5. Lavadora de vegetales.	54
Figura 6. Hidratador de champiñones.	55
Figura 7. Marmita.	55
Figura 8. Cerradora de latas manual.	56
Figura 9. Autoclave convencional de vapor o agua sobrecalentada.	56
Figura 10. Dibujo autoclave prototipo de inducción electromagnética.	57
Figura 11. Autoclave prototipo de inducción electromagnética.	58
Figura 12. Sondas Ellab (doble y simple).	58
Figura 13. Texturómetro TA.TXPlus.	59
Figura 14. Coordenadas L*, a* y b*.	60
Figura 15. Colorímetro CR-400.	60
Figura 16. Diseño experimental de los tratamientos a realizar con simulantes.	62
Figura 17. Diagrama de flujo del cardo en conserva.	63
Figura 18. Imágenes del proceso de elaboración del cardo en conserva.	64
Figura 19. Diagrama de flujo del champiñón en conserva.	69

Figura 20. Imágenes del procesado de champiñón en conserva.	70
Figura 21. Diagrama de flujo de la alubia blanca en conserva.	73
Figura 22. Imágenes del procesado de alubia blanca en conserva.	74
Figura 23. Análisis de textura de alubia blanca en conserva. Test kramer de 5 cuchillas.....	77
Figura 24. Dominios de la geometría del modelo de simulación en 2D.	80
Figura 25. Geometría de la lata.	86
Figura 26. Plano de simetría de la lata.	87
Figura 27. Geometría de trabajo tras la división simétrica.	87
Figura 28. Vista detallada de las capas externa de la lata y el dominio virtual.	88
Figura 29. Variación del calor específico del agua en función de la temperatura.	89
Figura 30. Variación de la densidad del agua en función de la temperatura.	90
Figura 31. Variación de la conductividad del agua en función de la temperatura.....	90
Figura 32. Mallados de diferente grosor: extremadamente gruesa, extra gruesa, muy gruesa, gruesa, normal y fina (de izquierda a derecha y de arriba abajo).	91
Figura 33. Curva de calentamiento de agua a potencia baja y velocidad de rotación baja.	95
Figura 34. Curva de calentamiento de agua a potencia baja y velocidad de rotación media.	97
Figura 35. Curva de calentamiento de agua a potencia baja y velocidad de rotación alta.	97

Figura 36. Curva de calentamiento de agua a potencia media y velocidad de rotación baja.	98
Figura 37. Curva de calentamiento de agua a potencia media y velocidad de rotación media.	99
Figura 38. Curva de calentamiento de agua a potencia media y velocidad de rotación alta.	99
Figura 39. Curva de calentamiento de agua a potencia alta y velocidad de rotación baja.	100
Figura 40. Curva de calentamiento de agua a potencia alta y velocidad de rotación media.	100
Figura 41. Curva de calentamiento de agua a potencia alta y velocidad de rotación alta.	101
Figura 42. Pendientes de calentamiento y ecuaciones de los 9 tratamientos de agua.	102
Figura 43. Pendientes de calentamiento de los 9 tratamientos de agua.	103
Figura 44. Pendientes de calentamiento y ecuaciones de los 9 tratamientos de aceite de oliva.	106
Figura 45. Pendientes de calentamiento de los 9 tratamientos de aceite de oliva.	108
Figura 46. Pendientes de calentamiento y ecuaciones de los 9 tratamientos de silicona 1000mPa*s.	110
Figura 47. Pendientes de calentamiento del proceso de esterilización del simulante Silicona 1000mPa*s.	112
Figura 48. Curva de temperatura del proceso convencional de esterilización de cardo enlatado.	116
Figura 49. Curva de temperatura del proceso de esterilización de cardo enlatado mediante inducción electromagnética.	117

Figura 50. Tratamientos térmicos del proceso de esterilización convencional y por IE de cardo.	118
Figura 51. Pendientes de calentamiento de los procesos de esterilización de cardo.	119
Figura 52. Evolución de la textura del cardo esterilizado durante 9 meses de almacenamiento.	122
Figura 53. Evolución de la luminosidad del cardo durante 9 meses de almacenamiento.	124
Figura 54. Evolución de la coordenada a* (verde-rojo) del cardo durante 9 meses de almacenamiento.	125
Figura 55. Evolución de la coordenada b* (amarillo-azul) del cardo durante 9 meses de almacenamiento.	126
Figura 56. Angulo HUE de las muestras de cardo.	127
Figura 57. Evolución del ángulo HUE de las muestras esterilizadas de cardo durante 9 meses.	128
Figura 58. Evolución del tono o CHROMA de las muestras esterilizadas de cardo.	129
Figura 59. Puntuación media de los atributos del cardo valorado por los catadores.	130
Figura 60. Resultados del análisis comparativo entre las muestras de cardo.	131
Figura 61. Curva de temperatura del tratamiento del proceso de esterilización convencional del champiñón enlatado.	133
Figura 62. Curva de temperatura del tratamiento del proceso de esterilización por inducción electromagnética del champiñón.	134
Figura 63. Tratamientos térmicos del proceso de esterilización convencional y por IE de champiñón.	135

Figura 64. Pendientes de calentamiento de las muestras de champiñón esterilizadas con agua sobrecalentada e inducción electromagnética.	136
Figura 65. Estado del velo del champiñón esterilizado.....	139
Figura 66. Evolución de las mermas de las muestras de champiñón durante 9 meses de almacenamiento.	140
Figura 67. Fuerza máxima necesaria (g) para romper la capa externa del champiñón esterilizado.....	141
Figura 68. Evolución de la luminosidad del champiñón esterilizado.	142
Figura 69. Evolución de la coordenada a^* del champiñón esterilizado.	143
Figura 70. Evolución coordenada b^* de las muestras de champiñón esterilizadas.	144
Figura 71. Disposición de las coordenadas a^* y b^* de las muestras de champiñón esterilizadas.	145
Figura 72. Evolución del Angulo HUE o tono de las muestras de champiñón esterilizadas.	146
Figura 73. Evolución del CHROMA o intensidad de color de las muestras de champiñón esterilizadas.	147
Figura 74. Puntuación media de los atributos del champiñón valorados por los catadores.....	148
Figura 75. Resultados del análisis comparativo entre las muestras de champiñón.	149
Figura 76. Curva de temperatura del tratamiento de esterilización convencional por lluvia de agua sobrecalentada de alubia blanca enlatada.	151
Figura 77. Curva de temperatura del tratamiento de esterilización por inducción electromagnética de alubia blanca enlatada.	152

Figura 78. Curvas de tratamiento de esterilización convencional y por IE de alubia blanca enlatada.	153
Figura 79. Pendientes de calentamiento de los procesos de esterilización de alubia blanca enlatada.	154
Figura 80. Líquido de gobierno de las muestras de alubia blanca tratadas por el método convencional (izquierda) y por inducción electromagnética (derecha).	157
Figura 81. Fuerza máxima necesaria (kg) para “masticar” las muestras de alubia blanca esterilizadas. Distinta letra en la misma columna indica diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%.....	158
Figura 82. Evolución de la luminosidad de las muestras de alubia blanca durante el almacenamiento.	159
Figura 83. Evolución de la coordenada a* de las muestras de alubia blanca durante los 9 meses de almacenamiento.	160
Figura 84. Evolución de la coordenada b* de las muestras de alubia blanca durante los 9 meses de almacenamiento.	161
Figura 85. Disposición de las coordenadas a* y b* de las muestras de alubia blanca.	162
Figura 86. Evolución del tono o ángulo HUE de las muestras de alubia blanca durante el almacenamiento.	163
Figura 87. Evolución de la intensidad de color o CHROMA de las muestras de alubia blanca durante el almacenamiento.	164
Figura 88. Evolución del Índice de Blanqueamiento de las muestras de alubia blanca esterilizadas.	165
Figura 89. Valores medios obtenidos en los análisis de antinutrientes de las muestras esterilizadas de alubia blanca.	166

Figura 90. Puntuación media de los atributos de la alubia blanca valorados por los catadores.	167
Figura 91. Resultados del análisis comparativo entre las muestras de alubia blanca.	168
Figura 92. Simulación del calentamiento por inducción electromagnética de una lata de agua.	172
Figura 93. Simulación de la evolución de temperatura del calentamiento de agua por inducción electromagnética al inicio y tras 100, 200 y 300s.....	173
Figura 94. Esquema de las corrientes producidas en el interior de la lata, provocadas por la rotación de la lata y por la diferencia de temperaturas (densidades).....	174
Figura 95. Ajuste de la conductividad térmica efectiva del cardo.	176
Figura 96. Simulación del calentamiento de una lata de cardo mediante inducción electromagnética.	178
Figura 97. Simulación de la velocidad del líquido de gobierno de la lata de cardo.	179

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de procesado por inducción electromagnética de las latas (potencia de calentamiento y velocidad de rotación).	62
Tabla 2. Condiciones iniciales de los dominios del modelo.	84
Tabla 3. Condiciones de borde de los distintos dominios del modelo (*Mills, 1992).....	85
Tabla 4. Propiedades de los materiales del modelo.	89
Tabla 5. Parámetros de modelado del mallado en función del grosor.	92
Tabla 6. Resumen de los tratamientos de esterilización de agua, combinando potencias de calentamiento baja, media y alta con velocidades de rotación baja, media y alta.	96
Tabla 7. Resumen de los tratamientos de esterilización de aceite de oliva, combinando potencias de calentamiento baja, media y alta con velocidades de rotación baja, media y alta.....	107
Tabla 8. Resumen de los tratamientos de esterilización de la Silicona 1000mPa*s, combinando potencias de calentamiento baja, media y alta con velocidades de rotación baja, media y alta.	111
Tabla 9. Condiciones industriales de esterilización de cardo enlatado.	115
Tabla 10. Seguimiento visual de las muestras de cardo enlatado durante 9 meses de almacenamiento.	121
Tabla 11. Valores medios de los atributos valorados del cardo. Diferente letra en la misma fila indica diferencias significativas al 95% de confianza.	130
Tabla 12. Condiciones industriales de esterilización de champiñón enlatado.	132
Tabla 13. Seguimiento visual de las muestras de champiñón enlatado durante 9 meses de almacenamiento.	138

Tabla 14. Valores medios de los atributos valorados del champiñón. Diferente letra en la misma fila indica diferencias significativas al 95% de confianza.	149
Tabla 15. Condiciones del proceso de esterilización industrial de alubia blanca enlatada.....	150
Tabla 16. Seguimiento visual de las muestras de alubia blanca esterilizadas durante 9 meses de almacenamiento.	156
Tabla 17. Valores medios de los atributos valorados de la alubia blanca. Diferente letra en la misma fila indica diferencias significativas al 95% de confianza.	168

1 INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad se conoce la importancia de conservar los alimentos. Los primeros métodos de conservación de alimentos surgieron de la necesidad de tener productos fuera de las temporadas de cada uno. En épocas de calor, existía una gran variedad de productos frescos a consumir, pero en las épocas de frío, escaseaban. De esta necesidad nacen los métodos de ahumado, salado, secado y congelación (cuando las condiciones ambientales lo permitían). En cambio, en los países con climas cálidos, el problema no era la falta de productos frescos durante las épocas frías, sino el deterioro del producto fresco por las altas temperaturas. En este caso, se desarrollaron métodos para favorecer el crecimiento de bacterias o microorganismos que protegieran al alimento del deterioro. Este proceso es el conocido actualmente como fermentación. Todos estos procesos, se desarrollaban a pequeña escala, de cara a intentar conservar los productos de cada casa o pueblo durante más tiempo.

La conservación a gran escala comenzó en Egipto, con el objetivo de conservar granos de trigo secos en silos para abastecer las necesidades de todo el año, y en Roma en la época de Pompeyo, donde los romanos conservaban frutas en miel, inhibiendo el crecimiento microbiano por las altas concentraciones de azúcar, y donde comenzaron con la fabricación de vino, zumo de uva fermentado y embotellado.

Uno de los momentos más importantes en la historia de la conservación de los alimentos es el descubrimiento de la esterilización. Fue a principios del siglo XIX cuando Nicolás Appert desarrolló el método de esterilización para todo tipo de alimentos. Hasta entonces, solo se había aplicado a nivel doméstico para conservar frutas. Probablemente, Nicolás Appert basó su investigación en las recetas domésticas de la conservación de frutas, y consiguió adaptarla a alimentos como carne, sopa, leche, etc. En 1810, Appert hizo público su descubrimiento a través de un libro titulado "*L'Art de Conserver pendant*

plusieurs années, toutes les substances animales et végétales”, generando un gran avance en la industria alimentaria. Desde este momento, se han realizado numerosas mejoras en el proceso, pero todas ellas en base a la investigación de Appert. Este descubrimiento fue fundamental para abastecer de alimentos seguros a las tropas del ejército que se iban fuera del país durante mucho tiempo.

En 1876, Louis Pasteur demostró el fundamento empírico del método de Appert, argumentando la destrucción microbiana de los alimentos durante el tratamiento térmico de esterilización, evitando así el deterioro de los alimentos. Tras varios experimentos, descubrió que algunos microorganismos causantes del deterioro de productos como el vino, se destruían con un tratamiento térmico más leve que la esterilización. Es ahí cuando nace el término “pasteurización”.

2 OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es estudiar y validar el calentamiento por inducción electromagnética para esterilizar productos enlatados y realizar una simulación del tratamiento térmico.

En concreto, los objetivos del trabajo son:

- Estudiar a través de simulantes alimentarios cuáles son los alimentos óptimos para el calentamiento por inducción electromagnética.
- Definir las condiciones óptimas de tratamiento para diferentes productos alimentarios (cardo, champiñón y alubia blanca), con el fin de conseguir una intensidad de esterilización igual a la obtenida con el tratamiento convencional.
- Analizar los productos tratados y estudiar las diferencias microbiológicas, fisicoquímicas y sensoriales obtenidas.
- Simular mediante elementos finitos el tratamiento de esterilización por inducción electromagnética.

3 ANTECEDENTES

3.1 Tratamiento térmico de alimentos

El concepto tratamiento térmico engloba todo tipo de procesos que aporten calor a un alimento. Al aplicar calor a un alimento se producen cambios tanto en la carga microbiana como en los compuestos que forman parte del alimento (proteínas, vitaminas, hidratos de carbono, etc.), modificando las propiedades fisicoquímicas propias del producto.

3.1.1 Cocción, pasteurización y esterilización

El término tratamiento térmico es muy amplio y abarca numerosos procesos y tratamientos. A términos generales y aplicado a alimentos, se puede distinguir entre cocción, pasteurización y esterilización.

La cocción es el tratamiento térmico encargado de modificar las características organolépticas del alimento, haciéndolo más apetecible y comestible. En los productos de origen vegetal, la cocción provoca cambios de color, consistencia y aroma. En cuanto a los cambios fisicoquímicos, hay numerosos compuestos que se ven afectados. Por un lado, las proteínas pueden verse afectadas de varias formas. Entre 30 y 50°C, las enzimas se activan, y a partir de esta temperatura, comienza la desnaturalización. Por otro lado, los carbohidratos también pueden verse afectados por el tratamiento, ya que modifican su estructura, cambiando su viscosidad y funcionalidad. Además, uno de los compuestos de mayor interés por sus propiedades son las vitaminas, las cuales son termolábiles, y a partir de 60-70°C comienzan a volatilizarse.

El principal objetivo de la pasteurización y esterilización de alimentos es la destrucción de microorganismos. Todos los microorganismos son sensibles al calor. Dependiendo del intervalo de temperaturas en el que los

microorganismos sean capaces de vivir y crecer, se pueden clasificar en tres grandes grupos (Casp & Abril, 2003):

- Psicrótrofos y psicrófilos. Los psicrótrofos son capaces de adaptarse y desarrollarse a 0°C, pero su intervalo óptimo de crecimiento es entre 25 y 35°C. Los psicrófilos son capaces de desarrollarse a 0°C y su intervalo óptimo de crecimiento es entre 15 y 20°C. Entre los microorganismos pertenecientes a este grupo, podemos destacar *Pseudomonas* y *Lactobaciullus*.
- Mesófilos. Es el grupo más típico al que pertenecen la mayor parte de bacterias (por ejemplo, *Salmonella* y *Staphylococcus aureus*). Son capaces de multiplicarse entre 20 y 45°C y su temperatura óptima de crecimiento es de 37°C.
- Termófilos. Son microorganismos capaces de desarrollarse a temperaturas altas, comprendidas entre 45 y 65°C, con una temperatura óptima de 55°C. Entre los microorganismos más importantes a tener en cuenta en este grupo, se encuentran las familias *Bacillus* y *Clostridium* y algún moho como *Aspergillus* y *Thamnidium*.

Una vez conocidas las características de desarrollo de los distintos microorganismos, es importante conocer y darle un valor a la intensidad del tratamiento térmico. En este caso, hay que centrarse en dar un valor numérico a la intensidad de tratamiento de la cocción, pasteurización y esterilización. Cada tratamiento térmico debe ajustarse a cada alimento con el objetivo de conseguir los resultados deseables minimizando los indeseables, teniendo en cuenta el grado de cocción y de pasteurización/esterilización. Para ello, dependiendo del objetivo del tratamiento térmico, se habla del parámetro F_0 (eq.1) cuando el objetivo sea la esterilización, P_0 (eq.2) cuando sea la

pasteurización y C_0 (eq.3) cuando sea la cocción, teniendo en cuenta 2 variables: tiempo y temperatura.

$$eq. 1: \quad F_0 = t * 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} \quad eq. 2: \quad P_0 = t * 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}}$$

$$eq. 3: \quad C_0 = t * 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}}$$

donde t = tiempo de tratamiento

T = temperatura de tratamiento

T_{ref} = Temperatura del microorganismo de referencia/atributo

z = termorresistencia del microorganismo de referencia/atributo

Cuando se trata de un tratamiento térmico, es importante conocer la evolución de la temperatura en el centro térmico del alimento o del envase (punto de menor calentamiento) a lo largo del tratamiento. Así pues, por ejemplo, para calcular la F_0 de un tratamiento, tomando como parámetros de referencia $T=121,1^\circ\text{C}$ y $z=10^\circ\text{C}$ (parámetros para *Clostridium botulinum*) se utilizará la siguiente fórmula (eq.4):

$$eq.4: \quad F_0 = \int_0^t 10^{\frac{T-121,1}{10}} dt$$

Lo mismo ocurre con los parámetros P_0 y C_0 , utilizando como referencia los valores adecuados para cada producto.

A la hora de diseñar el tratamiento térmico para un proceso y alimento determinado, hay que tener en cuenta el parámetro C_0 y P_0/F_0 (dependiendo de la intensidad de tratamiento que se desee) para establecer el proceso que cumpla los dos objetivos, intentando que el tratamiento no sea ni insuficiente y ni excesivo para ninguno de los 2 parámetros.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que, durante el tratamiento, a la vez que se reduce la carga microbiana, ocurren cambios fisicoquímicos que pueden ser deseables (como la inactivación enzimática, ablandamiento de los tejidos o mejora de la digestibilidad) o no tan deseables (como la destrucción de nutrientes como las vitaminas, o la pérdida de calidad organoléptica). Así pues, el tratamiento térmico puede ocasionar los siguientes cambios sobre los constituyentes de los alimentos (Casp & Abril, 2003).

- Efecto sobre el agua. Al aumentar la temperatura del producto, el agua superficial comienza a evaporarse y comienza la desecación superficial, ralentizándose el intercambio térmico.
- Efecto sobre lípidos. Uno de los primeros efectos del calor sobre los lípidos es la fusión. Dependiendo de las características de la grasa, la fusión comenzará a una temperatura u otra, pero generalmente, a partir de 35-40°C, casi todas las grasas se funden y cambian de estado. Además, el aumento de la temperatura facilitará la oxidación lipídica, provocando la aparición de peróxidos, los cuales formarán compuestos que darán un aroma y olor a rancio, llegando incluso a formar compuestos amargos inaceptables organolépticamente.
- Efecto sobre carbohidratos. Uno de los efectos más importantes es la gelatinización de los glúcidos (principalmente almidón). A partir de 50°C aproximadamente, comienza la gelatinización del almidón tras la exposición del glúcido a temperatura y humedad. Por otro lado, con el tratamiento térmico, puede comenzar la reacción de Maillard. Por último y en casos de temperaturas muy elevadas (150-165°C), se puede dar la descomposición de los azúcares.
- Efecto sobre las proteínas. En este caso, conforme aumenta la temperatura, primero ocurre la activación de las enzimas, y pasada cierta temperatura propia de cada proteína, comienza la

desnaturalización. Por norma general, la activación de las enzimas ocurre entre 30 y 50°C. A partir de esta temperatura, comienza la desnaturalización. En proteínas solubles, la desnaturalización comienza a los 50°C y finaliza a los 80°C.

- Efecto sobre las vitaminas. Las vitaminas son poco sensibles a las temperaturas de cocción (salvo la vitamina B1), aunque el calor acelera la oxidación de las vitaminas cuando se cuecen sin protección (A, E, B2 y C).

3.1.2 Transmisión de calor. Radiación, convección y conducción.

La transmisión de calor es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre distintas partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. Dicha energía fluye siempre de la zona más caliente a la zona más fría.

Existen dos tipos de calor, el sensible y el latente. El calor sensible es el responsable del aumento de temperatura. De este calor aparece el término calor específico, el cual define la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura 1°C la unidad de masa. Este parámetro depende de la temperatura, es decir, en un mismo cuerpo, cada temperatura tiene un calor específico determinado. Por otro lado, el calor latente es el responsable de los cambios de fase, por lo que define la cantidad de calor necesaria para producir un cambio de fase. De este concepto aparecen los términos calor latente de sublimación, fusión y vaporización.

El calor puede ser transferido por radiación, convección o conducción (Welti-Chanes et al., 2005). En general, los tratamientos térmicos convencionales basan el calentamiento en los mecanismos de transferencia de conducción y

convección. En los últimos años, han surgido nuevas tecnologías que utilizan la radiación como principal mecanismo de transferencia de calor. En la Figura 1, se puede observar el esquema de cada uno de los mecanismos de transmisión de calor.

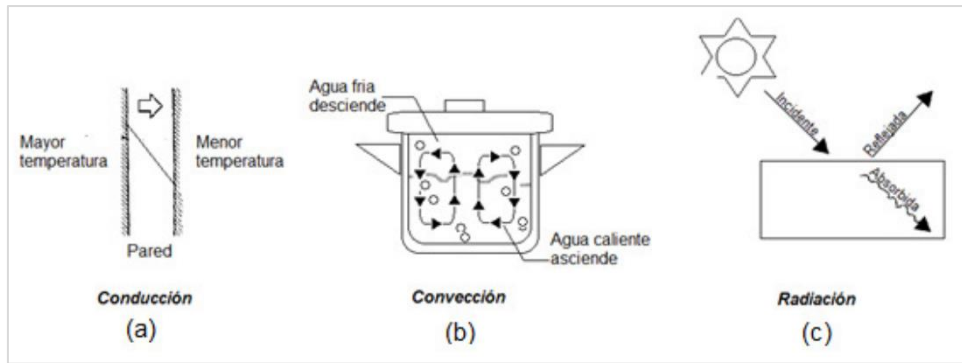


Figura 1. Mecanismos de transmisión de calor: a) conducción b) convección c) radiación
(Fuente: Pérez Reyes & Sosa Morales, 2013).

La conducción define la transferencia de calor dentro de un cuerpo sólido producido cuando existe un gradiente de temperatura entre una región del sólido y otra. Aunque no se comprende la totalidad del mecanismo de la conducción, se cree que se debe al movimiento de los electrones libres que transportan la energía (calor) cuando existe un gradiente. En 1822, el matemático Barón Joseph Fourier desarrolló la ley de Fourier de la conducción (eq.5), donde demostró que la cantidad de calor por unidad de tiempo transmitida por conducción es proporcional a la superficie del cuerpo y a la diferencia de temperatura e inversamente proporcional a su espesor:

$$eq.5: \quad \dot{Q} = k * A \frac{(T_1 - T_2)}{e}$$

donde \dot{Q} = caudal de calor transmitido (W)

A = superficie de intercambio (m²)

T_1 y T_2 = temperaturas ($^{\circ}\text{C}$ o K)

e = espesor del cuerpo (m)

k = conductividad térmica (W/m K)

La conductividad térmica (k) es el término que define la capacidad de conducir el calor. Cuanto mayor sea la conductividad térmica de un material, mejor transmitirá el calor.

En cuanto a la convección, explica la transferencia de calor generada en un líquido o gas debido al movimiento del fluido producido por un gradiente de temperatura, es decir, si en un líquido o gas existen zonas a distintas temperaturas, se producirá movimiento de las moléculas que generarán transferencia de calor. Para expresar el efecto de la convección, se utiliza la Ley de enfriamiento de Newton (eq.6) (Andrade Acosta & Masabanda Narváez, 2012; Casp & Abril, 2003):

$$\text{eq. 6: } \dot{Q} = h * A (T_s - T_{\infty})$$

donde \dot{Q} = caudal de calor transmitido por convección (W)

h = coeficiente de convección ($\text{W/m}^2\text{K}$)

A = superficie de intercambio (m^2)

T_s = temperatura de la superficie del sólido ($^{\circ}\text{C}$ o K)

T_{∞} = temperatura del fluido ($^{\circ}\text{C}$ o K)

Existen dos tipos de convección: convección natural si el movimiento del fluido está causado por las fuerzas inducidas por los gradientes de densidad generados por la diferencia de temperaturas en el fluido; y convección forzada cuando hay que provocar este movimiento (Lespinard, 2012). La convección

natural se produce en líquidos de baja viscosidad que permiten el libre movimiento del producto por los gradientes de temperaturas. Por el contrario, los productos de viscosidad media/alta, no permiten el libre movimiento, por lo que se comportan como un sólido. En estos casos, la única forma de generar movimiento dentro del envase es provocándolo externamente mediante sistemas de agitación/rotación. De esta forma, se fuerza el movimiento y se transmite el calor por convección en vez de por conducción, por lo que la difusividad térmica es mucho mayor, y, por tanto, el tiempo de tratamiento es menor.

Por último, la radiación es la transmisión de calor entre dos o más cuerpos que no están en contacto y se aplica generalmente a fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. En estos casos, siempre hay un cuerpo que actúa como fuente de energía y otro que actúa como receptor de energía, el cual absorbe parte de la energía generada y la convierte en calor. La radiación tiene una distribución espectral y direccional, ya que la magnitud varía con la longitud de onda (Andrade Acosta & Masabanda Narváez, 2012; Pérez Reyes & Sosa Morales, 2013). Dentro de la radiación, existen numerosas tecnologías basadas en el calentamiento de alimentos por ondas, como pueden ser microondas, radiofrecuencia, radiación/irradiación o inducción electromagnética. Todas ellas basan el calentamiento en emitir ondas de diferente longitud de onda, las cuales son absorbidas en mayor o menor medida por el producto a calentar.

3.1.3 Transmisión de calor en alimentos

La cinética de penetración de calor en los alimentos depende de la naturaleza del producto, del material y dimensión del envase y del fluido calefactor. Además, la transmisión de calor se producirá por conducción en caso de

sólidos y líquidos de alta viscosidad o por convección en el caso de líquidos de baja viscosidad.

Al tratarse de alimentos envasados, se pueden encontrar varios escenarios:

- a) Líquidos de baja viscosidad que permiten corrientes de convección.
- b) Sólidos o líquidos de alta viscosidad, los cuales no permiten corrientes de convección y el calentamiento se producirá por conducción.
- c) Líquidos que contienen sólidos de pequeño tamaño, donde la mayor parte de la penetración de calor viene dada por el líquido, es decir, convección.
- d) Sólidos de mayor tamaño con líquido de gobierno, en donde se producirán dos tipos de calentamiento: convección por parte del líquido de gobierno, que calentará al sólido por conducción y este a su vez se calentará a sí mismo.
- e) Productos que comienzan calentándose por convección y en un determinado momento, por cambios en su estructura y propiedades reológicas, pasan a calentarse por conducción.

En cada uno de los casos anteriores, la penetración de calor va a ser distinta y siempre va a ser directamente proporcional al gradiente de temperatura existente entre el producto a tratar y el medio calefactor.

A continuación, se pueden observar las gráficas de penetración de calor para los casos más comunes de calentamiento (convección, conducción y convección + conducción). En cada una de ellas se pueden apreciar las 3 etapas de un proceso térmico: calentamiento, mantenimiento y enfriamiento.

En el caso del calentamiento por convección (Figura 2) se puede apreciar cómo la penetración del calor es rápida, por lo que la curva de temperatura del producto es similar a la del recinto.

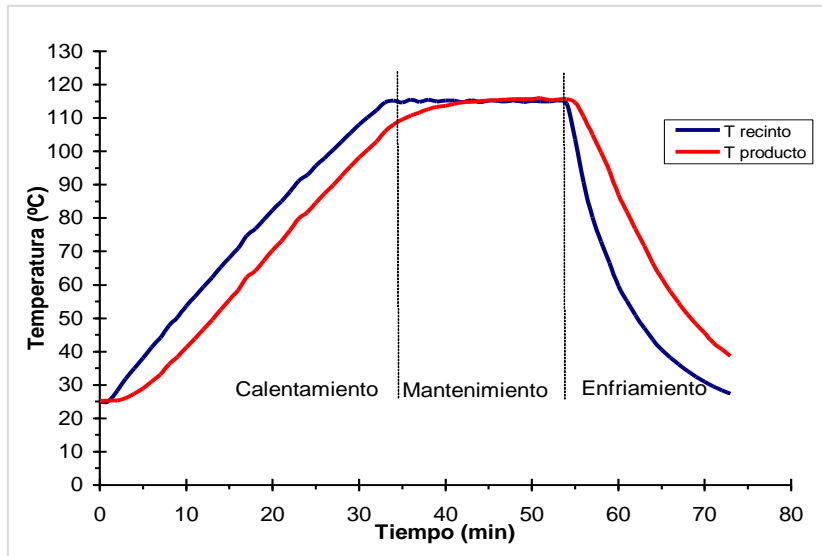


Figura 2. Penetración de calor de alimentos calentados por convección.

En el caso del calentamiento por conducción (Figura 3), la penetración de calor es más lenta, por lo que la curva de temperatura del producto es muy diferente a la del recinto. En estos casos, para que el calor llegue al centro térmico del producto, ha debido de pasar por el resto de la masa, por lo que el proceso de calentamiento es mucho más largo que en el caso anterior. Una de las principales consecuencias de este hecho es la diferencia de temperaturas entre las distintas partes del producto y de la lata. Mientras las capas cercanas a la pared del recipiente adquieren rápidamente la temperatura del recinto, el centro térmico aún no está a la temperatura adecuada, por lo que las capas externas van a sufrir un sobreatamiento, necesario para alcanzar la temperatura necesaria en todas las zonas del producto.

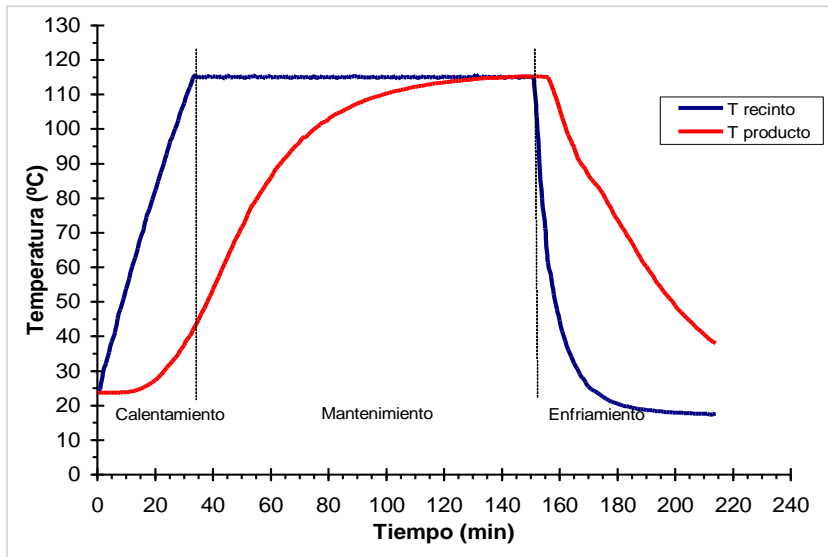


Figura 3. Penetración de calor de alimentos calentados por conducción.

Por último, en el caso del calentamiento por convección y conducción (Figura 4), se van a producir los dos calentamientos anteriores. Por una parte, el líquido de gobierno del producto se va a calentar por convección, y la penetración de calor será rápida, mientras que el producto sólido, se va a calentar por conducción, por lo que la penetración de calor será más lenta.

En la actualidad, la esterilización de los envases metálicos, rígidos y cilíndricos usados en conservas se obtiene mediante la aplicación de calor a los mismos en cuantía y tiempo suficientes para conseguirla. Relacionado con estos dos parámetros precisamente, tiempo y temperatura, se describen dos tipos de procesos: High Temperature/Short Time (HTST) y Low Temperature/Long Time (LTLT).

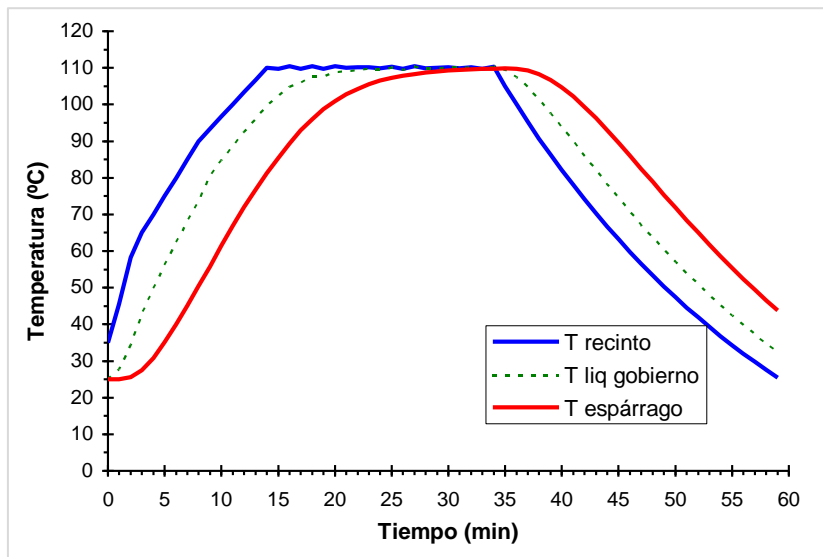


Figura 4. Penetración de calor de alimentos calentados por convección

Aunque está ampliamente comprobado que los tratamientos HTST dañan menos a los productos tratados, se ha demostrado que sólo son útiles en productos líquidos (leche, zumos...) a los que el tratamiento térmico se les aplica al producto sin envasar. Sin embargo, en el caso de productos envasados (conservas vegetales, cárnicas, pescado, alimentación animal...) en los cuales la transmisión de calor es más complicada, se hace necesaria la aplicación de altas temperaturas durante largos periodos de tiempo, hasta asegurar que todo el producto alcanza las temperaturas deseadas, y por tanto, la inocuidad del mismo y larga vida útil.

Por tanto, el tratamiento HTST no puede ser aplicado a este tipo de productos y los equipos utilizados en la actualidad son autoclaves estáticos, rotativos, verticales, horizontales, por inundación, por lluvia, etc., que generalmente utilizan agua, en sus diferentes estados, como fuente de calor.

De esta manera, para asegurar que todo el producto dentro del envase y que todos los envases dentro del equipo hayan recibido el tratamiento necesario, hay productos que son sometidos a un sobretratamiento, ya que para que el punto más frío dentro del envase adquiriera la temperatura de esterilización, todo el producto existente entre dicho punto y el exterior del envase debe estar sometido a dicha temperatura, pero durante un tiempo muy superior al requerido para conseguir la correspondiente esterilización. Este sobretratamiento, además de la sobre-cocción del producto, da lugar a gastos energéticos innecesarios y, por ende, económicos.

Esta heterogeneidad y sobretratamiento se ve agravada en los esterilizadores por cargas como los autoclaves. En este caso, el primer envase que se cierra debe esperar hasta que el equipo está lleno para dar comienzo a la esterilización. Esto provoca por un lado pérdidas de tiempo, y por otro, que la temperatura del primer envase introducido y la del último sean completamente diferentes. Además, se producen importantes tiempos de espera hasta que tiene lugar el cierre de todos los envases necesarios para completar la capacidad del autoclave.

Tal y como se ha mencionado con anterioridad, los actuales sistemas en uso para este tipo de envases utilizan vapor de agua o agua sobrecalentada a presiones que permiten alcanzar temperaturas de 116°C a 132°C. Para producir dicho vapor de agua hay que utilizar combustibles, que pueden ser gas, gasóleo, fuel oil, etc.

El principal inconveniente de este proceso está vinculado al hecho de que se trata de un proceso de alto consumo energético. Hasta la fecha se han realizado múltiples esfuerzos para mejorar la eficiencia energética de estos procesos de

esterilización térmica de los productos enlatados, pero a pesar de ello, en la actualidad, están lejos de serlo.

Por otro lado, otro importante inconveniente es la pérdida de calidad organoléptica de los alimentos. Para lograr conservar el sabor, la textura y las características nutricionales de los alimentos, se requiere del mínimo calentamiento posible. La dificultad que se plantea en este aspecto es que la velocidad con la que se puede transmitir el calor al producto enlatado afectará al tiempo total de calentamiento del alimento. Asimismo, aquellos productos que por su naturaleza o preparación sean más o menos sólidos o de altas densidades pueden quemarse si la temperatura que se aplica al exterior del envase se hace de manera rápida o es demasiado alta. Así pues, la lata debe calentarse lentamente hasta la temperatura de esterilización, lo que conduce a que el contenido de la lata se mantenga a una temperatura elevada durante un tiempo considerablemente más largo del que sería deseable para conservar un sabor, una textura y unas características nutricionales óptimas.

3.1.4 Estudio del tratamiento térmico mediante simulantes alimentarios

La utilización de productos naturales en los estudios de tratamientos de alimentos envasados incrementa la dificultad de los trabajos de transmisión de calor debido a la gran variabilidad que presentan. Los productos naturales solo permiten una única utilización, ya que el tratamiento térmico modifica sus propiedades físicas y, por ello, su comportamiento en el próximo calentamiento. Además, debido a la gran heterogeneidad de los productos naturales, es muy difícil conseguir que distintas porciones de un alimento tengan idéntica respuesta frente a un tratamiento térmico, por lo que la repetitividad de las pruebas es muy baja.

Por todo ello, es conveniente utilizar simulantes alimentarios para los estudios de transmisión de calor en alimentos envasados. Dichos simulantes poseen características térmicas definidas y constantes, las cuales no se ven modificadas con los tratamientos térmicos. Estos simulantes pueden ser:

- Elastómeros de silicona. Debido a la amplia variedad de viscosidades disponibles, permiten simular tanto los procesos por convección como los de conducción. Además, son estables a las temperaturas de procesado y son reproducibles y extrapolables a productos alimentarios.
- Goma Gellan. Es una goma vegetal en forma de polisacárido soluble en agua que se obtiene de la fermentación aeróbica de la glucosa mediante la bacteria *Sphingomonas elodea*. La goma Gellan es empleada por la industria alimentaria con la codificación E 418. La estructura molecular de esta goma es en forma de molécula lineal compuesta por uniones de monómeros como la glucosa, el ácido glucurónico y la raminosa (proporción 2:1:1), que disuelta en agua puede tener sus mismas características, sin verse afectadas sus propiedades en un amplio intervalo de temperaturas.
- Aceites vegetales. Permiten simular el tratamiento de alimentos grasos. Aunque no son productos infinitamente estables, permanecen estables durante varios usos. El principal cambio durante los tratamientos térmicos es químico (degradación de grasas y color, principalmente).
- Agua. Permite simular el tratamiento de productos líquidos de baja viscosidad y productos sólidos que contienen como líquido de gobierno agua.

Todos estos simulantes son extrapolables a los productos naturales, ya que tienen propiedades termofísicas conocidas y estables (viscosidad, difusividad térmica, densidad, etc.).

3.2 Calentamiento por inducción electromagnética.

La inducción electromagnética fue descubierta en 1831 por Michael Faraday, quien, tras varios estudios, llegó a la conclusión de que *“siempre que una fuerza magnetomotriz aumenta o disminuye, produce electricidad; a mayor rapidez de variación, mayor cantidad de electricidad produce”*. Esta corriente eléctrica producida se conoce como fuerza electromotriz (f.e.m.). Faraday concluyó que una corriente eléctrica puede ser producida por un cambio en el campo magnético. La ley de Faraday establece que se induce una tensión sobre un conductor (bobina 2) afectado por un campo magnético variable creado por la bobina 1. Cuando la bobina 2 forma un circuito cerrado, la tensión inducida en ella da lugar a una intensidad de corriente cuyo valor queda definido por la ley de Ohm ($I = V/Z$, siendo Z la impedancia eléctrica del circuito que forma la bobina 2). Así pues, la fuerza electromotriz es directamente proporcional al tiempo del cambio en el flujo magnético (Rudnev, 2002).

En 1865 Faraday, con la ayuda del matemático James Clerk Maxwell, demostró el fenómeno de la inducción electromagnética (Díaz Hellín Martínez del Rey, 2003). Gracias a ello, se inventaron equipos como los motores eléctricos, los transformadores o la dinamo. Posteriormente, James P. Joule describió el calentamiento producido por una corriente en un conductor, estableciendo así los fundamentos principales del calentamiento por inducción. (Lucía et al., 2014).

El mecanismo de calentamiento por inducción electromagnética está basado en las leyes de Faraday, Ampere y efecto Joule (Acevedo Picón et al., 2007). La Ley de Faraday (eq.7) dice que la fuerza electromotriz (f.e.m) inducida en un circuito es igual a la velocidad de variación del flujo magnético (\emptyset) en el tiempo (t) (Cabanillas Mendoza et al., 2019). La Ley de Ampere (eq.8) relaciona la corriente eléctrica estacionaria I, la magnitud del campo magnético B y la distancia r generada por dicha corriente (Sánchez Moreno et al., 2020). La aplicación del efecto Joule (eq.9) permite calcular el valor de la energía transformada en calor en una resistencia, ya que la cantidad de calor producido (Q - cal) por un conductor eléctrico es directamente proporcional al cuadrado del valor eficaz de la intensidad de corriente (I - amperios), a la resistencia del conductor (R – ohmios) y al tiempo (t – segundos) (Molina Amaya et al., 1985). Así pues, el efecto Joule se puede expresar de la siguiente forma.

$$eq.7: \quad f.e.m = \mathcal{E} = \frac{d\emptyset}{dt}$$

$$eq.8: \quad B = \frac{\mu I}{2 \pi r}$$

$$eq.9: \quad Q = 0,24 * I^2 * R * t$$

Ligado a la Ley de Faraday, surgen las corrientes de Foucault. Dichas corrientes son inducidas en un medio conductor en presencia de un flujo de campo magnético variable con el tiempo. Cuanto más fuerte es el campo magnético aplicado o la conductividad del conductor, mayores son las corrientes de Foucault. Este fenómeno provoca el calentamiento del conductor (Huamán Martínez & Monja Jiménez, 2019; Pacheco & Soto, 2009). Las corrientes de Foucault son corrientes parásitas, normalmente no deseadas, que aparecen en un material conductor cuando se ve sometido a un campo magnético variable. Estas corrientes aparecen, de acuerdo con la Ley de

Faraday, porque se producen diferencias de potencial en el material. Estas corrientes circulan por circuitos parásitos que aparecen en el propio material y, como el conductor no es ideal, se disipa energía en forma de calor de acuerdo con el efecto Joule.

La inducción electromagnética se ha usado como alternativa a tecnologías como hornos de gas, hornos de lecho fluidizado, baños de sal, calentadores de infrarrojos, hornos de combustible, etc., todos ellos para calentar metales con distintos fines (Rudnev, 2002). En las últimas décadas, el calentamiento por inducción ha comenzado a ser más usado debido a sus grandes ventajas (Lucía et al., 2014):

- Rapidez en el calentamiento. El calor se genera directamente sobre la pieza a calentar, por lo que se genera menor pérdida de calor.
- Alta eficiencia. En los últimos avances de la tecnología, se han conseguido valores de eficiencia superiores al 90%, mejorando los rendimientos de las tecnologías convencionales.
- Control del calentamiento. La potencia aplicada sobre la pieza a calentar se puede ajustar controlando la bobina y la potencia del convertidor.
- Mejora del proceso industrial. El calentamiento por inducción electromagnética maximiza la repetitividad del proceso, por lo que aumenta la calidad productiva del tratamiento. Además, como es una tecnología que no necesita contacto directo entre el inductor y la pieza a calentar, ninguna de las dos se ven afectadas por la otra.
- Limpieza y seguridad. Gracias a que la inducción electromagnética calienta directamente la pieza objetivo, la temperatura ambiente que rodea a la pieza es mejor y evita la quemadura del resto de materiales.

Debido a las numerosas ventajas que presenta la tecnología, el calentamiento por inducción electromagnética (IE) ha sido ampliamente utilizado en varios sectores (El-Mashad & Pan, 2016; Wang et al., 2020). En concreto la IE se ha utilizado en la industria del metal, en los procesos de fabricación de cristal y cuarzo, en la síntesis química de líquidos y gases. Además, la IE forma parte de la industria alimentaria, tanto a nivel doméstico como industrial, donde la energía electromagnética es convertida en calor para cocinar o calentar los alimentos (cocinas de IE).

A pesar de la gran cantidad de aplicaciones de la IE en distintos sectores, no existen datos relacionados con el uso de IE para procesos térmicos de alimentos, por lo que la investigación de la tecnología en este sector y su conocimiento es limitada (El-Mashad & Pan, 2016).

3.2.1 Simulación del tratamiento térmico de esterilización por inducción electromagnética mediante Comsol Multiphysics

El modelamiento matemático y su resolución computacional mediante diferentes métodos numéricos ha ido en constante progreso desde sus inicios cuando se aplicaba al análisis de estructuras y posteriormente a la dinámica de fluidos. Hoy en día la simulación numérico-computacional se aplica prácticamente en todas las áreas de la ciencia y la ingeniería, permitiendo resolver modelos cada vez más complejos que abarcan diferentes físicas acopladas entre ellas, es decir, modelos multifísicos.

La dinámica de fluidos computacional ha demostrado ser una herramienta útil para simular la evolución del campo de velocidades de un flujo sometido a fuerzas internas y externas.

Existen múltiples soluciones computacionales disponibles para realizar este análisis, las cuales pueden ser software comerciales, tales como: Fluent Ansys, Start C++ ó Comsol Multiphysics, además de softwares de distribución libre tales como Openfoam.

En relación, a los métodos numéricos utilizados para dinámica de fluidos la mayoría de los softwares utilizan el método de volúmenes finitos, mientras que otros utilizan el método de elementos finitos.

4 PLAN DE TRABAJO

El diseño experimental seguido para la realización del estudio es:

- Estudio de los alimentos óptimos a tratar con inducción electromagnética a través de simulantes alimentarios.
- Optimización de las condiciones de esterilizado del tratamiento convencional y por inducción electromagnética, de manera que se realice una misma intensidad de esterilización en ambos procesos para 3 productos alimentarios (cardo, champiñón y alubia blanca).
- Procesado de los productos para el estudio de vida útil:
 - Microbiológico.
 - Fisicoquímico.
 - Sensorial.
- Tratamiento de datos y estudio de las diferencias significativas entre las muestras.
- Simulación del tratamiento térmico de inducción electromagnética mediante elementos finitos.

5 MATERIAL Y MÉTODOS

5.1 Equipos comunes

A continuación, se presentan los equipos generales que se han usado para realizar los estudios:

- Lavadora de vegetales (Figura 5). Lavadora de 25L de agua para lavar vegetales. Concretamente, se ha utilizado para lavar el champiñón.



Figura 5. Lavadora de vegetales.

- Hidratador de la marca Turatti (Figura 6). El hidratador es un equipo utilizado en el proceso de champiñón en conserva para intentar reducir las mermas del producto final.



Figura 6. Hidratador de champiñones.

- Marmita (Figura 7). Marmita modelo CEA-20 de la marca Xucla, con capacidad para 200L. Utilizado para escaldar el champiñón, cardo y alubia blanca antes de esterilizar el producto, con el objetivo de inactivar reacciones enzimáticas, fijar color y empezar a cocer el producto.



Figura 7. Marmita.

- Cerradora de latas (Figura 8). Cerradora manual de latas utilizando doble sellado. En este caso, se han utilizado los rodillos para cerrar latas de 73 mm de diámetro.



Figura 8. Cerradora de latas manual.

- Autoclave agua/vapor SURDRY (Figura 9). Autoclave rotativo de una jaula. Posibilidad de trabajar con vapor, lluvia de agua o inundación, así como en estático, vaivén y rotación. En este caso, se ha trabajado con lluvia de agua y en estático, tratando de simular el tratamiento industrial de los distintos productos.



Figura 9. Autoclave convencional de vapor o agua sobrecalentada.

- Autoclave inducción electromagnética (Figuras 10 y 11). Prototipo diseñado y desarrollado en el proyecto colaborativo RTC-2015-4035-2, junto a Ikerlan IK4, Riberebro, Gvttarra y Eurochamp. El equipo es un prototipo laboratorio con capacidad de tratar 1-2 latas por ciclo. Consta de una cadena transportadora de rodillos construidas en teflón, una bobina de inducción electromagnética y una zona de ducha de agua para enfriar la lata.

El equipo puede trabajar con distintas potencias de calentamiento y mantenimiento, así como variar la velocidad de rotación de las latas.

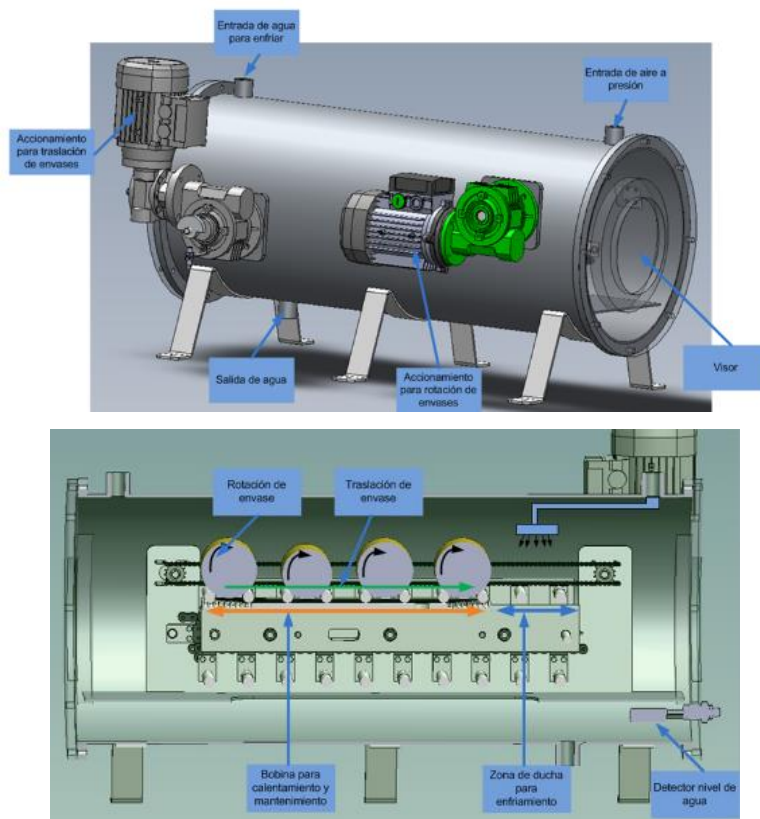


Figura 10. Dibujo autoclave prototipo de inducción electromagnética.

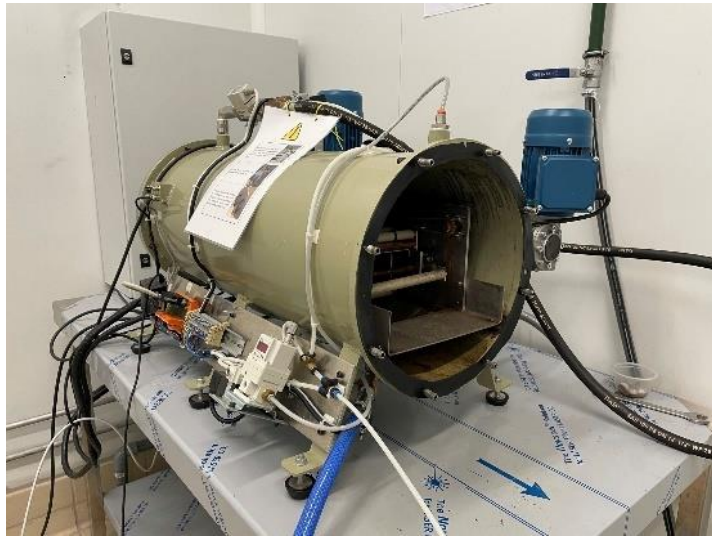


Figura 11. Autoclave prototipo de inducción electromagnética.

- Sondas Ellab (Figura 12). Sondas que permiten registrar temperaturas directamente en el producto, en el centro del envase.



Figura 12. Sondas Ellab (doble y simple).

- Texturómetro TA.TX Plus (Figura 13). Equipo utilizado para medir instrumentalmente la textura de un alimento. Dependiendo del producto a analizar, se utiliza un ensayo u otro, en función del objetivo y de las necesidades de cada uno de ellos. El texturómetro tiene la posibilidad de trabajar con la célula de carga de 5, 30 y 50kg, así como acoplar diferentes utensilios para realizar compresión, penetración, elongación, corte, etc.

En el caso del cardo, se realiza el test Kramer con 5 cuchillas, con el objetivo de simular la mordida del cardo. Para ellos, se trabaja con la célula de carga de 30kg, utilizando 75g de muestra por test y haciendo una mordida de 60mm de altura. En el caso de la alubia blanca, también se realiza el test Kramer con 5 cuchillas, célula de carga de 30kg, pero realizando una bajada de 40mm. Por último, en el caso del champiñón, se realiza un test de penetración con la sonda P2, con el objetivo de estudiar la consistencia de la parte externa del producto, representativo del estado del mismo tras el tratamiento.



Figura 13. Texturómetro TA.TXPlus.

- Colorímetro CR-400 de la marca Konica Minolta (Figura 15). Utilizado para analizar el color instrumentalmente, utilizando el cabezal para sólidos y calculando las coordenadas Cielab* (Figura 14). Así pues, el color se descompone en tres coordenadas: a^* (verde-rojo), b^* (azul-amarillo) y L^* (negro-blanco).

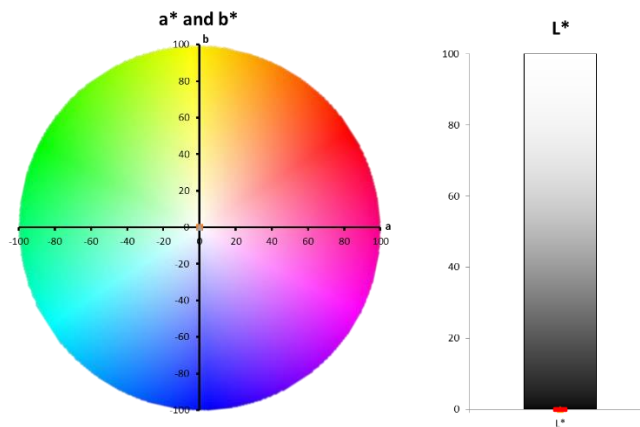


Figura 14. Coordenadas L^* , a^* y b^* .



Figura 15. Colorímetro CR-400.

5.2 Materiales

- Simulante Agua.
- Simulante Aceite de Oliva.
- Simulante silicona 1000mPa*s.

- Cardo.
- Champiñón.
- Alubia blanca.
- Líquido gobierno (agua, sal, ácido ascórbico y cítrico).
- Latas y tapas 73mm.

5.3 Estudio del tratamiento de esterilización por inducción electromagnética mediante simulantes alimentarios

En primer lugar, se ha estudiado el tratamiento de esterilización por inducción electromagnética mediante simulantes alimentarios. En este caso, se han seleccionado 3 simulantes que se asemejen a los alimentos.

- Agua (viscosidad 1mPa*s) como simulante de productos acuosos o con líquido de gobierno en base a agua, que basen el calentamiento en la convección. Para ello se ha trabajado con agua de red.
- Aceite de oliva (100mPa*s) como simulante de productos grasos, con líquido de gobierno en base grasa o productos de viscosidad media. Para ello se ha trabajado con Aceite de Oliva 0,4° de la marca Eroski.
- Silicona alimentaria (1000mPa*s) como simulante de productos de media viscosidad y/o que basen su calentamiento en la conducción. Para ello se ha trabajado con silicona RHODORSIL HUILE 47 V 1000 del fabricante RHODIA SILICONES S.A.S.

Una vez seleccionados los simulantes a estudiar, se realizan distintos tratamientos térmicos de esterilización, combinando potencias de calentamiento y velocidades de rotación de la lata.

Las potencias de calentamiento y velocidades de rotación estudiadas son “baja”, “media” y “alta”. En cada uno de los simulantes, la potencia varía en función de las propiedades de calor. En la Tabla 1 se pueden observar dichas potencias, así como las velocidades de rotación de la lata.

Tabla 1. Condiciones de procesado por inducción electromagnética de las latas (potencia de calentamiento y velocidad de rotación).

		Agua	Aceite	Silicona 1000 mPa*s
Potencia calentamiento	Baja	300 W	250 W	200 W
	Media	450 W	400 W	350 W
	Alta	650 W	600 W	550 W
Velocidad de rotación de las latas	Baja	4,3 rpm		
	Media	6 rpm		
	Alta	10 rpm		

Así pues, con cada uno de los simulantes se probaron 9 tratamientos (Figura 16), combinando las potencias de calentamiento y velocidades de rotación.

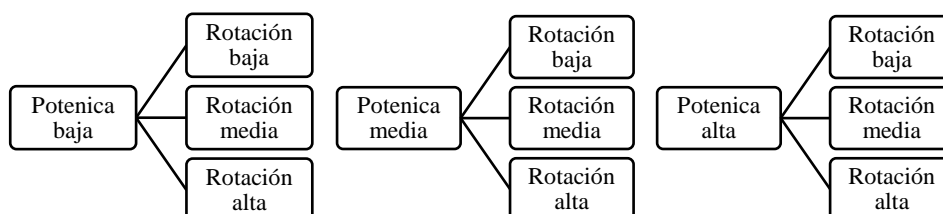


Figura 16. Diseño experimental de los tratamientos a realizar con simulantes.

5.4 Esterilización de cardo enlatado

El cardo utilizado para realizar los ensayos de esterilización pertenece a la familia *Cynara cardunculus* y ha sido obtenido de la empresa Conservas Gvtarra S.A., líder en ventas de conservas. El proceso de conserva de cardo se puede consultar a continuación (Figura 17), tomando como referencia las etapas industriales del mismo.

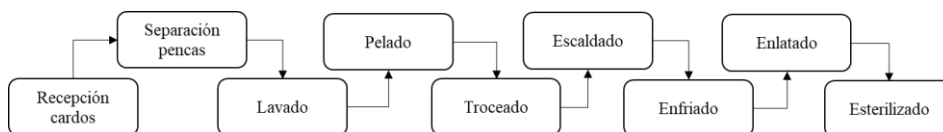


Figura 17. Diagrama de flujo del cardo en conserva.

En primer lugar, se recibe el producto y se almacena hasta su uso. Llegado el momento de procesar el cardo, se separan las pencas eliminando las deterioradas. A continuación, se lavan, se pelan y se trocean. Tras la preparación de la materia prima, se escalda en baños de agua durante 3 min a 91°C y se enfrían. Una vez escaldado se dosifica el producto en las latas, se adiciona el líquido de gobierno y se cierra. En la Figura 18 se pueden observar diferentes momentos del proceso de elaboración de cardo en conserva.

Por último, se esterilizan las latas y se almacenan hasta el momento de consumo. El tratamiento térmico a realizar fue definido durante los ensayos, tomando como referencia condiciones de procesado industriales.



Figura 18. Imágenes del proceso de elaboración del cardo en conserva.

En el caso del tratamiento convencional, se realiza en el autoclave piloto de Surdry, trabajando en estético y al máximo caudal posible (6L/s), tanto para calentar como para enfriar. En el enfriamiento, se introduce agua proveniente de la torre de refrigeración.

Una vez calculada la intensidad de esterilización mediante el autoclave convencional (F_0), se optimizó el tratamiento por inducción electromagnética

para conseguir una misma F_0 . En el caso del tratamiento por inducción electromagnética, el enfriamiento (único paso en el que se utiliza agua) se realiza a un caudal de 7,56L/min y con agua de red.

5.4.1 Análisis microbiológico

El análisis microbiológico de las latas esterilizadas consiste en realizar el test de estabilidad de la conserva siguiendo la norma AFNOR V 08-40B. Esta prueba consiste en incubar las muestras esterilizadas a 37°C y 55°C durante 7 días. Del mismo modo, se realiza un test control a temperatura ambiente. En los tres casos, se analizan las muestras por triplicado (3 latas por temperatura).

En el caso de las muestras incubadas a 37°C y a temperatura ambiente se analiza:

- Detección de Mesófilos Aerobios.
- Detección de Mesófilos Anaerobios.
- Detección de *Clostridium* sulfito-reductores (sólo en conservas de $\text{pH} \geq 4.6$).
- Detección de *Lactobacilos* (sólo en conservas de $\text{pH} < 4.6$).
- Detección de Mohos y Levaduras (sólo en conservas de $\text{pH} < 4.6$).

En el caso de las muestras incubadas a 55°C, solamente se analiza:

- Detección de Termófilos aerobios.
- Detección de Termófilos anaerobios.

Los valores recomendables y que usualmente se obtienen, para todos los parámetros citados, son de <1 ufc/g o <10 ufc/g según sea el límite de detección de la técnica. Así pues, cuando los resultados microbiológicos son satisfactorios, se puede considerar la conserva “estable”. Conserva

microbiológicamente estable se considera a aquella que no va a sufrir alteración microbiológica durante la vida útil de la misma, usualmente estipulada en 5 años.

5.4.2 Caracterización fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica del cardo en conserva consta de dos partes. Por un lado, medición de la textura con el Texturómetro TA.TXPlus, y por otro lado, medición del color a través del colorímetro CR-400.

En cuanto a la textura, se realiza el test Kramer con 5 cuchillas, utilizando la célula de carga de 30kg. En cada uno de los análisis se toman 75g de producto. Cada una de las muestras se analiza por quintuplicado. El ensayo se realiza a una velocidad de 2mm/s y una altura de 60mm.

Mediante este análisis, se simula la mordida del producto, obteniendo como resultado principal la fuerza necesaria para morder el alimento (kg).

En cuanto al color, se realizan 25 mediciones de cada muestra, obteniendo las coordenadas Lab*. Una vez obtenidas, se realiza un tratamiento para calcular el tono (ángulo HUE) y la intensidad del color (chroma). A continuación, se presenta las ecuaciones para calcular el ángulo HUE (eq.10) y el CHROMA (eq.11).

$$eq.10: \quad \text{Ángulo HUE} = \arctn(b^*/a^*)$$

$$eq.11: \quad \text{CHROMA} = (a^2 + b^2)^{1/2}$$

5.4.3 *Análisis sensorial*

Para llevar a cabo el análisis sensorial se ha contado con un panel de cata experto de 8 jueces cuya formación se ha basado en normas UNE e ISO. Las pruebas se han realizado en una sala de cata construida bajo normas.

El panel de Ctic Cita está formado desde el 2009 y trabaja en la evaluación sensorial de diferentes alimentos.

La formación del panel experto del Ctic Cita se ha basado en las metodologías explicadas en las normas UNE e ISO. Por un lado, los jueces han sido seleccionados siguiendo la norma UNE-EN ISO 8586:2024, a través de la cual se somete a los futuros catadores a pruebas de agudeza visual, detección de estímulos; además de pruebas para identificar el perfil psicológico del candidato: disponibilidad, aptitud, etc.

Una vez seleccionados los catadores, se realiza un entrenamiento básico siguiendo las normas UNE-EN ISO 8586:2014 y EN ISO 5492:2010 en cuanto a sabores, olores y texturas básicas, mediante pruebas para la investigación de la sensibilidad gustativa y el reconocimiento de umbrales de detección, identificación y diferenciación.

Por último, los jueces son sometidos a un entrenamiento específico siguiendo las normas UNE-ISO 5496:2007 y UNE-ISO 13302:2008, las cuales se basan en el entrenamiento de los jueces en aquellos descriptores específicos del producto, manejo de la hoja de cata, uso de escalas, etc. Dentro de estos parámetros se han trabajado aquellos relacionados con el color, sabor, olor, textura, etc.

La hoja de cata consta de dos partes. La primera parte es un análisis descriptivo, totalmente objetivo, en el que se valoran distintos parámetros relacionados con

la calidad sensorial del producto a analizar, con el objetivo de buscar diferencias significativas entre las muestras. La segunda parte de la cata, una vez realizado el análisis descriptivo, es una comparación de las muestras en la que se hace elegir al catador cuál de las dos muestras prefiere en cuanto a varios parámetros. En esta segunda parte, la respuesta es totalmente subjetiva, con el objetivo de conocer la aceptación del producto y los gustos del consumidor. Las hojas de cata pueden consultarse en el ANEXO 1.

Las muestras obtenidas han sido evaluadas por parte del panel de cata entrenado de Ctic Cita, con el objetivo de conocer las diferencias organolépticas del producto estudiado. A partir de la información aportada se han analizado los datos obtenidos que han permitido determinar cuáles son los principales parámetros sensoriales que difieren entre las muestras, para valorar si se aprecian o no diferencias entre ellas, además de evaluar su aceptabilidad.

Los catadores han evaluado las muestras “a ciegas”, en un orden secuencial monádico (una a una) en diferente orden para cada catador y siguiendo un diseño de bloques, para minimizar el efecto muestra. Cada catador ha contado con un acompañamiento de agua mineral natural y pan tostado entre muestras.

Cada uno de los atributos es evaluado por los catadores a través de una escala anclada no estructurada, que va de ausencia de percepción a máxima percepción percibida.

Los resultados obtenidos se han tratado estadísticamente con el programa informático XLSTST-Sensory, calculando la media, la desviación estándar y estudiando las diferencias entre las muestras, así como la aceptabilidad de las mismas.

5.5 Esterilización de champiñón enlatado

El champiñón utilizado para realizar los ensayos de esterilización pertenece a la familia *Agaricus bisporus* y ha sido obtenido de la empresa Ayecue S.A., líder en ventas de champiñón fresco. El proceso de conserva se puede consultar a continuación (Figura 19), tomando como referencia las etapas industriales del mismo.

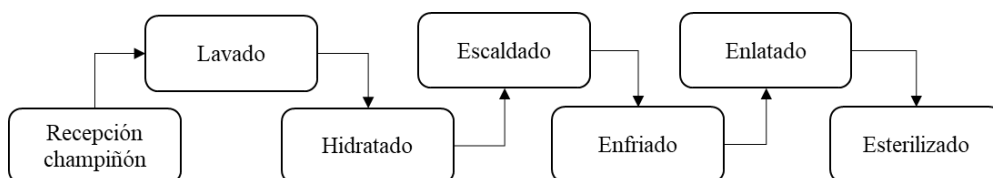


Figura 19. Diagrama de flujo del champiñón en conserva.

En primer lugar, se recibe el producto y se almacena en refrigeración hasta su uso. En el momento de procesar el champiñón, se lava durante 6 minutos para eliminar la tierra. Una vez lavado, se introduce en el hidratador para disminuir las futuras mermas que se producen durante el escaldado y esterilizado. Tras la preparación de la materia prima, se escaldan en baños de agua durante 9min a 91°C y se enfrían. Una vez escaldado se dosifica el producto en las latas, se adiciona el líquido de gobierno y se cierra. Por último, se esterilizan las latas y se almacenan hasta el momento de consumo. A continuación, en la Figura 20, se presentan imágenes de diferentes momentos del procesado de champiñón.



Figura 20. Imágenes del procesado de champiñón en conserva.

Por último, se esterilizan las latas y se almacenan hasta el momento de consumo. El tratamiento térmico a realizar fue definido durante los ensayos, tomando como referencia condiciones de procesado industriales. En el caso del tratamiento convencional, se realiza en el autoclave piloto de Surdry, trabajando en estético y al máximo caudal posible (6L/s), tanto para calentar como para enfriar. En el enfriamiento, se introduce agua proveniente de la torre de refrigeración.

Una vez calculada la intensidad de esterilización mediante el autoclave convencional (F_0), se optimizó el tratamiento por inducción electromagnética para conseguir una misma F_0 . En el caso del tratamiento por inducción

electromagnética, el enfriamiento (único paso en el que se utiliza agua) se realiza a un caudal de 7,56L/min y con agua de red.

5.5.1 *Análisis microbiológico*

El análisis microbiológico de las latas esterilizadas consiste en realizar el test de estabilidad de la conserva siguiendo la norma AFNOR V 08-40B. Esta prueba consiste en incubar las muestras esterilizadas a 37°C y 55°C durante 7 días. Del mismo modo, se realiza un test control a temperatura ambiente. En los tres casos, se analizan las muestras por triplicado (3 latas por temperatura).

En el caso de las muestras incubadas a 37°C y a temperatura ambiente se analiza:

- Detección de Mesófilos Aerobios.
- Detección de Mesófilos Anaerobios.
- Detección de *Clostridium* sulfito-reductores (sólo en conservas de pH \geq 4.6).
- Detección de *Lactobacilos* (sólo en conservas de pH $<$ 4.6).
- Detección de Mohos y Levaduras (sólo en conservas de pH $<$ 4.6).

En el caso de las muestras incubadas a 55°C, solamente se analiza:

- Detección de Termófilos aerobios.
- Detección de Termófilos anaerobios.

Los valores recomendables y que usualmente se obtienen para todos los parámetros citados son de <1 ufc/g o <10 ufc/g según sea el límite de detección de la técnica. Así pues, cuando los resultados microbiológicos son satisfactorios, se puede considerar la conserva “estable”. Conserva microbiológicamente estable se considera a aquella que no va a sufrir

alteración microbiológica durante la vida útil de la misma, usualmente estipulada en 5 años.

5.5.2 Caracterización fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica del champiñón en conserva consta de dos partes. Por un lado, medición de la textura con el Texturómetro TA.TXPlus, y por otro lado, medición del color a través del colorímetro CR-400.

En cuanto a la textura, se realiza un test de penetración utilizando la sonda P2 (2mm de diámetro) y la célula de carga de 5kg. El ensayo se realiza por quintuplicado, a una velocidad de 1mm/s, con una fuerza de detección de 5g y haciendo una penetración de 7mm.

Mediante este análisis, se simula la primera rotura del champiñón al morderlo, obteniendo como resultado principal la fuerza necesaria para romper las primeras capas de la cabeza del producto (kg).

En cuanto al color del producto, se realizan 10 mediciones de cada muestra, obteniendo las coordenadas Lab*. Una vez obtenidas dichas coordenadas, se realiza un tratamiento para calcular el tono (ángulo HUE) y la intensidad del color (chroma). Las ecuaciones de ambos parámetros pueden consultarse en las fórmulas eq.10 y eq.11 del apartado 5.4.2.

5.5.3 Análisis sensorial

En cuanto al análisis sensorial del champiñón, se realiza el mismo estudio que en el caso del cardo (Ver apartado 5.4.3).

5.6 Esterilización de alubia blanca enlatada

La alubia blanca utilizada para realizar los ensayos de esterilización pertenece a la variedad “*Canellini*” y ha sido obtenido de la empresa Conservas Gvtarra S.A., líder en ventas de legumbre en conserva. El diagrama de flujo del proceso de elaboración se puede consultar a continuación (Figura 21), tomando como referencia las etapas industriales del mismo.

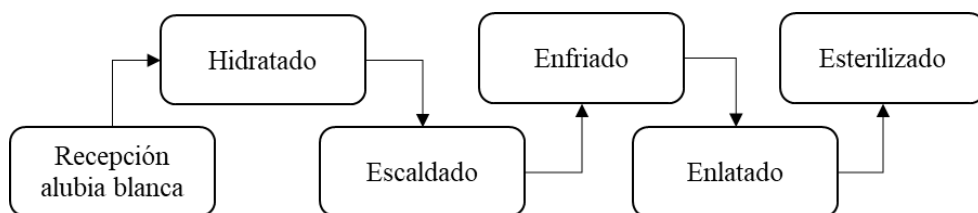


Figura 21. Diagrama de flujo de la alubia blanca en conserva.

En primer lugar, se recibe el producto y se almacena a temperatura ambiente hasta su uso. De manera previa al procesado de la alubia blanca, es necesario hidratar la legumbre entre 18-24h con agua de red para facilitar la cocción de la misma durante el procesado. Una vez hidratada, se escalda en baños de agua durante 8 min a 90°C y se enfrían. Una vez escaldada, se dosifica el producto en las latas, se adiciona el líquido de gobierno y se cierra. En la Figura 22 pueden observarse las imágenes de las diferentes etapas del proceso.

Por último, se esterilizan las latas y se almacenan hasta el momento de consumo. El tratamiento térmico a realizar fue definido durante los ensayos, tomando como referencia condiciones de procesado industriales.



Figura 22. Imágenes del procesado de alubia blanca en conserva.

En el caso del tratamiento convencional, se realiza en el autoclave piloto de Surdry, trabajando en estético y al máximo caudal posible (6L/s), tanto para

calentar como para enfriar. En el enfriamiento, se introduce agua proveniente de la torre de refrigeración.

Una vez calculada la intensidad de esterilización mediante el autoclave convencional (F_0), se optimizó el tratamiento por inducción electromagnética para conseguir una misma F_0 . En el caso del tratamiento por inducción electromagnética, el enfriamiento (único paso en el que se utiliza agua) se realiza a un caudal de 7,56L/min con agua de red.

5.6.1 *Análisis microbiológico*

El análisis microbiológico de las latas esterilizadas consiste en realizar el test de estabilidad de la conserva siguiendo la norma AFNOR V 08-40B. Esta prueba consiste en incubar las muestras esterilizadas a 37°C y 55°C durante 7 días. Del mismo modo, se realiza un test control a temperatura ambiente. En los tres casos, se analizan las muestras por triplicado (3 latas por temperatura).

En el caso de las muestras incubadas a 37°C y a temperatura ambiente se analiza:

- Detección de Mesófilos Aerobios.
- Detección de Mesófilos Anaerobios.
- Detección de *Clostridium* sulfito-reductores (sólo en conservas de $\text{pH} \geq 4.6$).
- Detección de *Lactobacilos* (sólo en conservas de $\text{pH} < 4.6$).
- Detección de Mohos y Levaduras (sólo en conservas de $\text{pH} < 4.6$).

En el caso de las muestras incubadas a 55°C, solamente se analiza:

- Detección de Termófilos aerobios.
- Detección de Termófilos anaerobios.

Los valores recomendables y que usualmente se obtienen para todos los parámetros citados son de <1 ufc/g o <10 ufc/g según sea el límite de detección de la técnica. Así pues, cuando los resultados microbiológicos son satisfactorios, se puede considerar la conserva “estable”. Conserva microbiológicamente estable se considera a aquella que no va a sufrir alteración microbiológica durante la vida útil de la misma, usualmente estipulada en 5 años.

5.6.2 Caracterización fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica de la alubia blanca en conserva consta de tres partes. Por un lado, medición de la textura con el Texturómetro TA.TXPlus. Para ello, se realiza el test Kramer con 5 cuchillas, utilizando la célula de carga de 30kg. En cada uno de los análisis se toman 75g de producto, realizando una bajada de 40mm a una velocidad de ensayo de 2mm/s. Cada una de las muestras se analiza por quintuplicado. Los parámetros del ensayo pueden observarse a continuación.

Mediante este análisis, se simula la mordida del producto, obteniendo como resultado principal la fuerza necesaria para morder el producto (kg).

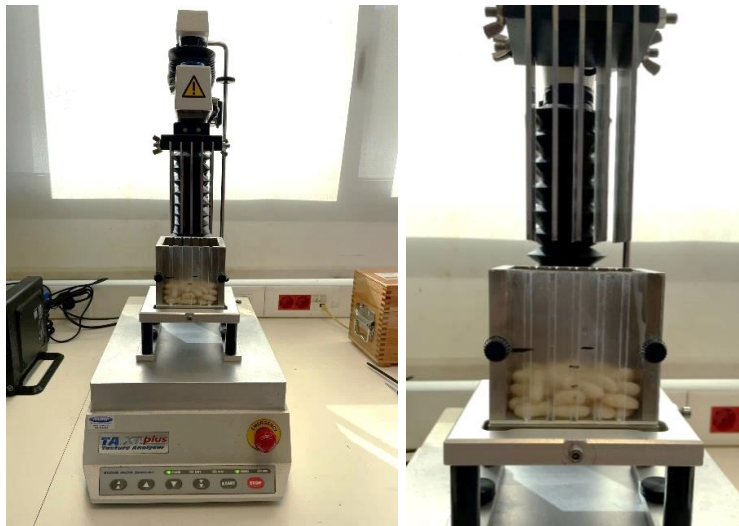


Figura 23. Análisis de textura de alubia blanca en conserva. Test kramer de 5 cuchillas.

Por otro lado, medición del color a través del colorímetro CR-400, donde se realizan 10 mediciones de cada muestra, obteniendo las coordenadas Lab*. Una vez obtenidas dichas coordenadas, se realiza un tratamiento para calcular el tono (ángulo HUE) y la intensidad del color (chroma) y el índice de blanqueamiento (IB). Las ecuaciones de del tono e intensidad pueden consultarse en las fórmulas eq.10 y eq.11 del apartado 5.4.2. La ecuación del índice de blanqueamiento se presenta a continuación (eq.12).

$$\text{eq.12:} \quad \text{IB} = 100 - (\text{L}^*2 + \text{b}^*2 + \text{c}^*2)^{1/2}$$

Por último, se ha realizado un análisis de antinutrientes para comprobar si el tratamiento térmico por inducción electromagnética mejora la digestibilidad de las legumbres o no. Para ello, se ha analizado rafinosa, estaquiosa y ácido fítico. Estos tres compuestos son algunos de los responsables de la “mala” digestión de legumbres, además de afectar a la absorción de otros nutrientes como proteínas o vitaminas, por lo que la disminución de estos en el producto final es un avance importante para personas con problemas digestivos.

5.6.3 *Análisis sensorial*

En cuanto al análisis sensorial de la alubia blanca, se realiza el mismo estudio que en el caso del cardo y del champiñón (ver apartado 5.4.3).

5.7 Simulación del tratamiento térmico de esterilización por inducción electromagnética

La esterilización de alimentos ha sido modelizada y simulada en numerosos estudios (ver Apartado 6.5), pero siempre teniendo en cuenta el calentamiento de la lata por agua sobrecalentada o vapor. Por otra parte, la mayoría de los estudios han sido realizados en autoclaves convencionales, aplicando rotación tapa-fondo-tapa o vaivén, principalmente. En el trabajo realizado por Tutar y Erdogan (2012), aplicaron rotación axial, como en el presente estudio, pero variando la velocidad de rotación desde 10 hasta 160 rpm.

En este caso, se ha simulado el tratamiento térmico de esterilización basando el calentamiento por inducción electromagnética, el cual no se ha estudiado hasta ahora, ya que es una tecnología novedosa desarrollada en el Centro Tecnológico Ctic Cita. Así pues, mediante el programa informático de simulación numérica Comsol Multiphysics se ha modelizado y simulado el calentamiento de latas en conserva por inducción electromagnética, permitiendo entender mejor la dinámica de fluidos y la transferencia de calor que ocurre durante el proceso.

En este estudio se ha utilizado el software Comsol Multiphysics con el objetivo de contrastar los valores obtenidos a través de múltiples ensayos experimentales con valores obtenidos a través de simulación computacional. Una vez validado el modelo se puede utilizar para ampliar el estudio del

presente trabajo para configurar nuevas variables de proceso, como por ejemplo, velocidad de rotación, potencia energética, nuevos productos y potencialmente buscar el punto óptimo de operación.

Se ha seleccionado Comsol debido a su flexibilidad para incorporar fenómenos físicos de flujo de fluidos y transmisión de calor, además de permitir simular el giro del envase a través de una malla dinámica.

El modelo de simulación ha seguido los pasos lógicos en este tipo de estudios:

- Estudio del caso real
- Modelo físico
- Modelo matemático
- Geometría
- Mallado
- Resolución numérica
- Resultados

5.7.1 Modelo físico

El proceso de esterilización mediante calentamiento por inducción electromagnética se ha estudiado a través de un modelo simplificado que represente adecuadamente el calentamiento de la superficie exterior de la lata. Así pues, no se ha utilizado directamente las ecuaciones de inducción electromagnética para generar el calentamiento, si no que se ha simulado su efecto sobre la superficie de la lata.

En Figura 24 se muestra el modelo 2D para explicar el concepto del modelo físico, diferenciándose 4 dominios:

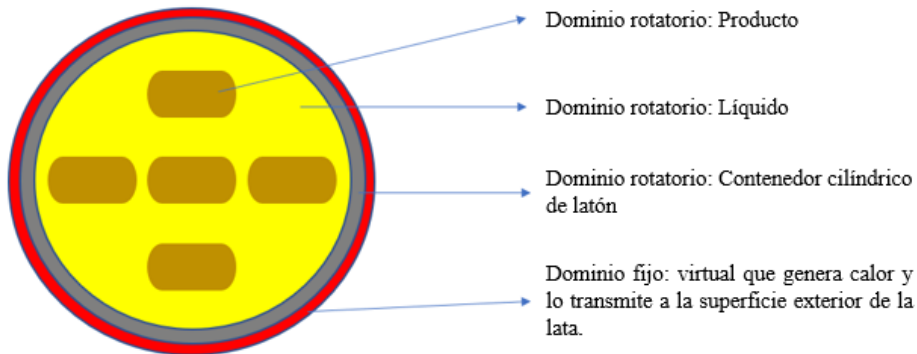


Figura 24. Dominios de la geometría del modelo de simulación en 2D.

- a) **Producto:** En este dominio se estudiará la transmisión de calor que penetra en el producto. Por un lado, la transferencia de energía está basada en la conducción térmica, la cual depende del área de transferencia, la conductividad térmica (k) del producto y la diferencia de temperatura (responsable de esta transferencia). Sin embargo, la conducción térmica no es el único medio por el cual se calienta el cardo. Este producto no es homogéneo y tiene porosidades y roturas por donde puede circular líquido caliente acelerando la penetración de calor. Para cuantificar esta energía adicional que penetra en el producto se ha modificado la conductividad térmica del producto y determinado una conductividad térmica efectiva que incorpore ambos fenómenos: conductividad más flujo a través de poros. La conductividad térmica efectiva se ha determinado a través de simulaciones con distintos valores de “ k ” y comparando los resultados de la simulación con los datos de los experimentos.

Este dominio es giratorio y gira a la misma velocidad que el producto y el envase. Este fenómeno se ha determinado experimentalmente, ya

que se ha visto que a bajas velocidades y por la fricción que ejerce la superficie interior de la lata sobre el producto, se genera una fuerza de giro que permite asumir que es la misma del envase. Al igual que en el estudio de Tutar y Erdogan (2012), se ha utilizado un dominio con rotación axial, pero sin considerar el espacio de cabeza de la lata (aire), por lo cual ha sido tratado como un fluido homogéneo con una sola fase.

- b) Líquido: En este dominio se estudia la dinámica de fluidos que se genera por el giro del envase y productos y por el movimiento debido a diferencias de temperatura (fuerzas de flotación). Este efecto de flotación genera el movimiento del líquido en el interior de la lata, y es uno de los fenómenos que gobierna la dinámica de fluidos y la transferencia de calor. Otro fenómeno físico que se estudia en este medio es la transmisión de calor por convección. Ambas físicas están acopladas, ya que el movimiento de fluidos afecta a la transmisión de calor, y la transmisión de calor afecta al movimiento de fluidos. De nuevo, este dominio es giratorio, asumiendo que gira a la misma velocidad que el producto y el envase.
- c) Envase latón: Este dominio permite contener el líquido y el producto, además recibe el calor generado por el dominio exterior que simula la generación de calor por inducción electromagnética. Por un lado, el calor que recibe este es principalmente transmitido al fluido y luego en consecuencia al producto, y por otro lado, un porcentaje menor del calor se transmite al ambiente exterior por convección natural y por radiación.
- d) Fuente de energía “virtual”: Es un dominio creado para simplificar el modelo. En la realidad, existe una bobina de inducción electromagnética que actúa como fuente de energía, pero para

simplificar el modelo, se ha creado este dominio. Para ello, se le han asignado propiedades similares a las del cobre, de manera que la conductividad térmica sea rápida y no genere resistencia adicional al modelo. Por otra parte, el espesor de este dominio es de 0,5 mm, lo cual no afecta al balance general de energía. Es un dominio fijo (no rota), lo cual el resto de los dominios rotan mientras este está estático. En el trabajo realizado por Rabiey et al., (2007) se despreció el efecto de las paredes, su inercia y su resistencia térmica por ser una masa pequeña respecto al producto a estudiar sin afectar a los resultados finales. En este caso, se ha incorporado una capa adicional fina, la cual por sus dimensiones y características facilita la simulación del aporte energético por inducción electromagnética a la cara exterior de la lata sin afectar a los resultados.

5.7.2 *Modelo matemático*

El modelo matemático del estudio se basa en las ecuaciones de continuidad, momento y energía, las cuales se refieren a la conservación de masa, momento y energía, explicando así todo lo que ocurre en la termodinámica de fluidos. Para ello, partimos asumiendo que trabajamos con flujo laminar e incompresible, con un fluido Newtoniano y despreciando el calentamiento por fricción viscosa.

- Ecuación de Continuidad (eq.13), conservación de la masa.

$$eq. 13: \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

Resumiendo, la ecuación de conservación de la masa indica que la masa que entra es igual a la masa que sale.

- Ecuación de momento (eq.14), conservación de momento.

$$eq. 14: \quad \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] + \mathbf{F}$$

Así pues, la ecuación de momento indica que la fuerza es igual a masa por aceleración.

- Ecuación de Energía (eq.15), conservación de energía.

$$eq. 15: \quad \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k\nabla T) + Q = 0$$

De esta forma, la ecuación de energía explica que la energía que entra es igual a la energía que sale más la energía acumulada.

- Hipótesis de Bousinesq.

La aproximación de Bousinesq es utilizada para modelar las fuerzas de flotación debido a diferencias de densidad, ya que la ecuación de momento para flujo compresible es más complicada de resolver. Dicho de otra forma, la hipótesis de Bousinesq explica el movimiento de los fluidos calientes, los cuales flotan sobre los fríos. Este fenómeno es conocido como fuerza de “flotación” (eq.16).

$$eq. 16: \quad F = (\rho_0 + \Delta\rho)g$$

- Leyenda:

ρ : densidad, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

\mathbf{u} : vector velocidad, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

F : vector fuerza volumetrica, $\frac{\text{N}}{\text{m}^3}$

C_p : calor especifico a presión constante, $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$

T : temperatura absoluta, K

Q : fuente de calor, $\frac{\text{W}}{\text{m}^3}$

μ : viscosidad dinamica, Pa * s

Para resolver estas ecuaciones en los diferentes dominios es necesario especificar las condiciones iniciales y de borde, las cuales se muestran en la Tabla 2 y 3 respectivamente.

Tabla 2. Condiciones iniciales de los dominios del modelo.

	Valor	Unidad	Dominio
Temperatura	313.15	K	Todos
Velocidad (u_x u_y u_z)	0	m/s	Líquido
Presión	0	Pa	Líquido

Tabla 3. Condiciones de borde de los distintos dominios del modelo (*Mills, 1992).

Condición de Borde	Valor/Expresión	Unidad	Dominio
Pérdida de calor por convección natural	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0$ $q_0 = h(T_{\text{ext}} - T)$ $h = \frac{k}{D} \left(0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2$	W	Superficie exterior cilindro
Pérdida de calor por convección natural	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0$ $q_0 = h(T_{\text{ext}} - T)$ $h = \begin{cases} \frac{k}{L} \left(0.68 + \frac{0.67Ra_L^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right) & \text{if } Ra_L \leq 10^9 \\ \frac{k}{L} \left(0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 & \text{if } Ra_L > 10^9 \end{cases}$	W	Superficie vertical exterior (tapa de cilindro)
Pérdida de calor por radiación	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0$ $q_0 = h(T_{\text{ext}} - T)$ $h = 6\varepsilon = 4.6 \text{ (W/m}^2\text{K)}^*$	W	Superficie exterior (cilindro y tapa)
Simetría (transferencia de calor)	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0$	W	Superficie de simetría
Velocidad relativa fluido en pared	$\mathbf{u} = 0$	m/s	Superficies de contacto con sólidos (lata y producto)
Simetría fluido	$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$ $\mathbf{\kappa}_n - (\mathbf{\kappa}_n \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = \mathbf{0}, \mathbf{\kappa}_n = \mathbf{\kappa}_n$	m/s	Superficie de simetría

5.7.3 Geometría

Al igual que en el estudio de Rabiey et al., (2007), la geometría se ha simplificado, evitando detalles como la ondulación lateral de la lata o los bordes del sellado, evitando así posibles problemas generados por una complicada geometría. Así pues, se ha generado una geometría de paredes lisas. De igual manera que en el caso de la geometría de la lata, se ha diseñado la geometría del producto a estudiar (cardo), simplificando el diseño.

En primer lugar, se dibujó la lata con las dimensiones reales (109,50mm de alto por 73mm de diámetro) (Figura 25).

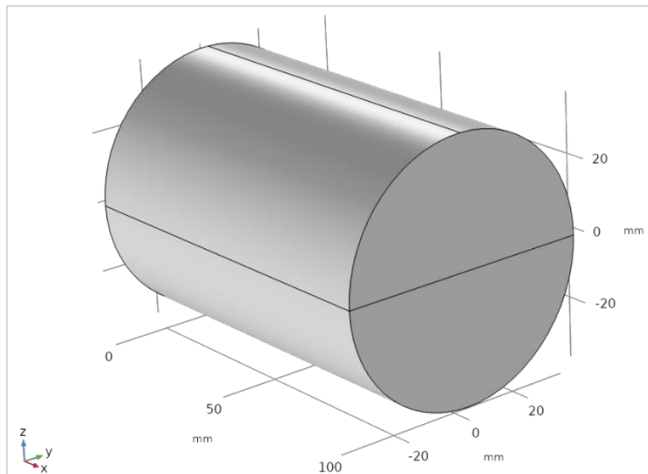


Figura 25. Geometría de la lata.

Una vez dibujada, se buscó el plano de simetría (Figura 26), con el objetivo de simplificar y reducir los tiempos de cálculos.

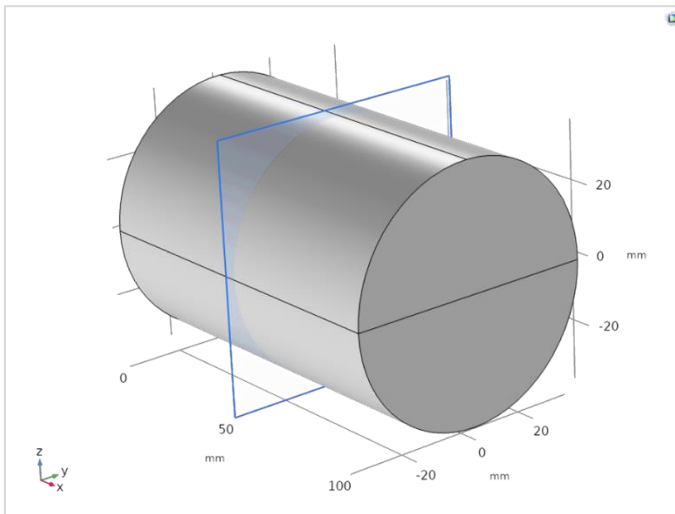


Figura 26. Plano de simetría de la lata.

Una vez realizado el plano simétrico, se añadió una condición de borde (Figuras 27 y 28), necesaria para poder simular la fuente de energía de inducción electromagnética, simplificando la existencia de la bobina.

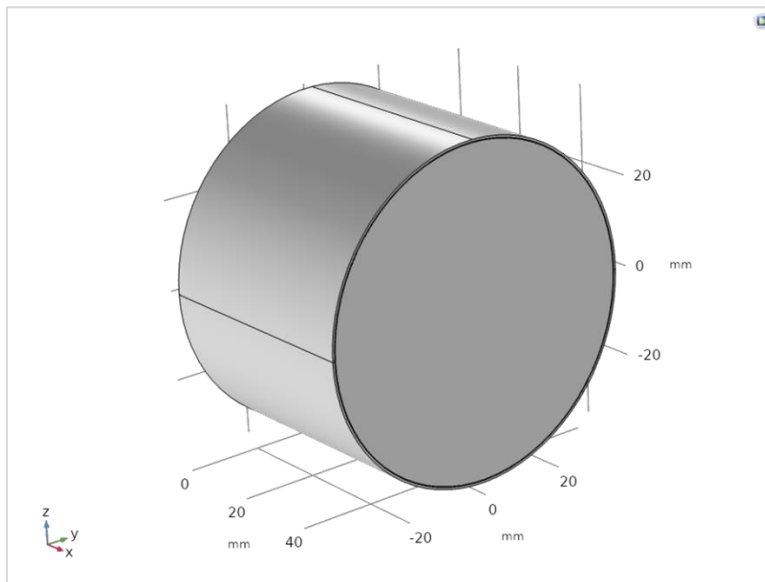


Figura 27. Geometría de trabajo tras la división simétrica.

Así pues, la parte externa representa la fuente de inducción electromagnética. Para ello, previamente se realizó un estudio de la distribución de la energía, donde se observó que solo la mitad de la lata inferior recibe energía, mientras que el resto no. Es por ello por lo que solo la parte inferior de la parte externa emitirá energía (condición de borde).

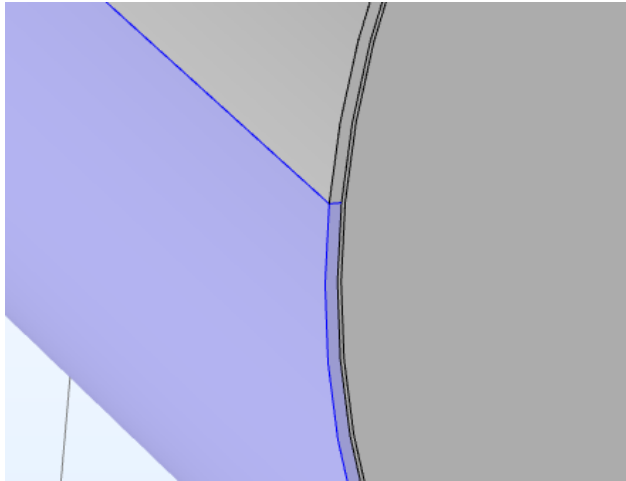


Figura 28. Vista detallada de las capas externa de la lata y el dominio virtual.

A continuación, después de la capa de condición de borde, se encuentra el espesor de la lata. Tras dicho espesor, el interior representa el producto (en este caso agua).

En todos los casos, el calentamiento por inducción electromagnética ha sido calculado con una velocidad de rotación media (6rpm) y una potencia de calentamiento alta (565kW).

5.7.4 Propiedades de los materiales

A continuación, en la Tabla 4, se presentan las propiedades de los materiales utilizados en el modelo. El cobre corresponde a la bobina de inducción electromagnética, el acero a la lata, el producto al cardo y el agua al líquido de gobierno.

Tabla 4. Propiedades de los materiales del modelo.

	Cobre	Acero	Producto	Agua
Calor específico (Cp) [J/Kg°K]	385	475	4044	Figura 29
Densidad (rho) [kg/m ³]	8960	7850	1008	Figura 30
Conductividad térmica (k) [W/m°K]	400	44.5	2,45	Figura 31

En el caso del agua, las propiedades dependen de la temperatura. Por ello, se presenta a continuación cada una de las propiedades en función de la temperatura. El calor específico (Figura 29) varía entre 4200 y 5200J/Kg°K, la densidad (Figura 30) entre 100 y 960kg/m³ y la conductividad (Figura 31) entre 0,56 y 0,68W/m°K.

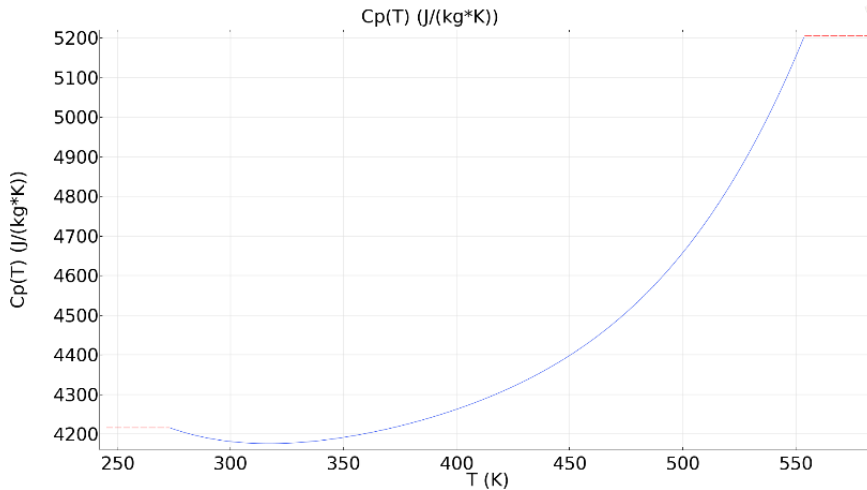


Figura 29. Variación del calor específico del agua en función de la temperatura.

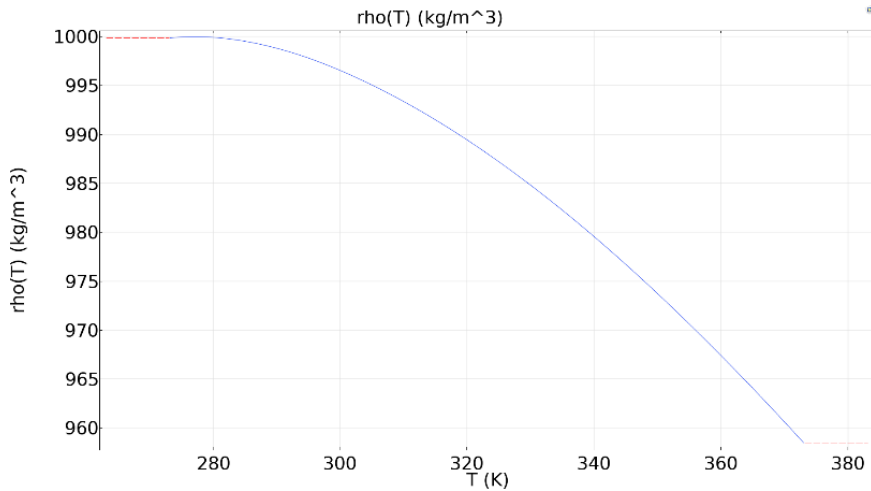


Figura 30. Variación de la densidad del agua en función de la temperatura.

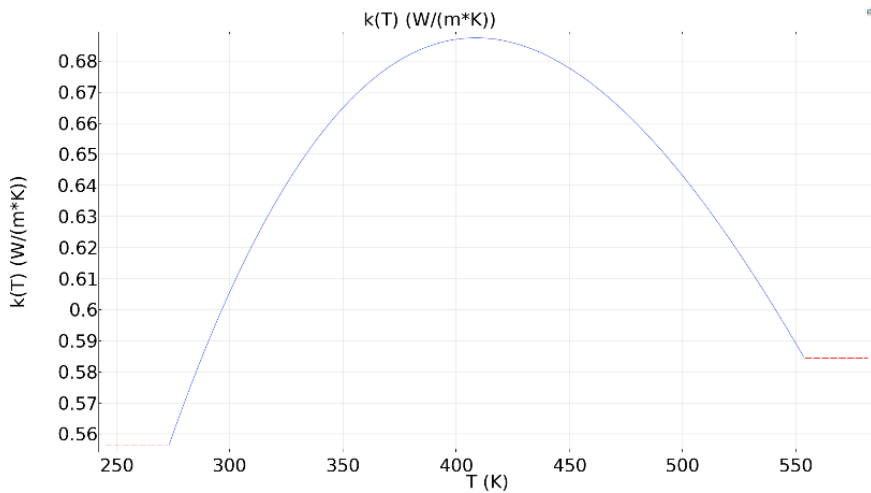


Figura 31. Variación de la conductividad del agua en función de la temperatura.

5.7.5 Mallado

En cuanto al mallado, Comsol tiene la posibilidad de trabajar con mallas de distintos “grosos”. Conforme se aumenta el número de nudos de la malla, mayor tiempo de cálculo necesita el programa para realizar la simulación. Así pues, una vez construida la geometría, se procedió a realizar ensayos con

distintos mallados, en busca del más óptimo. Se probaron un total de 6 mallas, las cuales pueden observarse a continuación en la Figura 32.

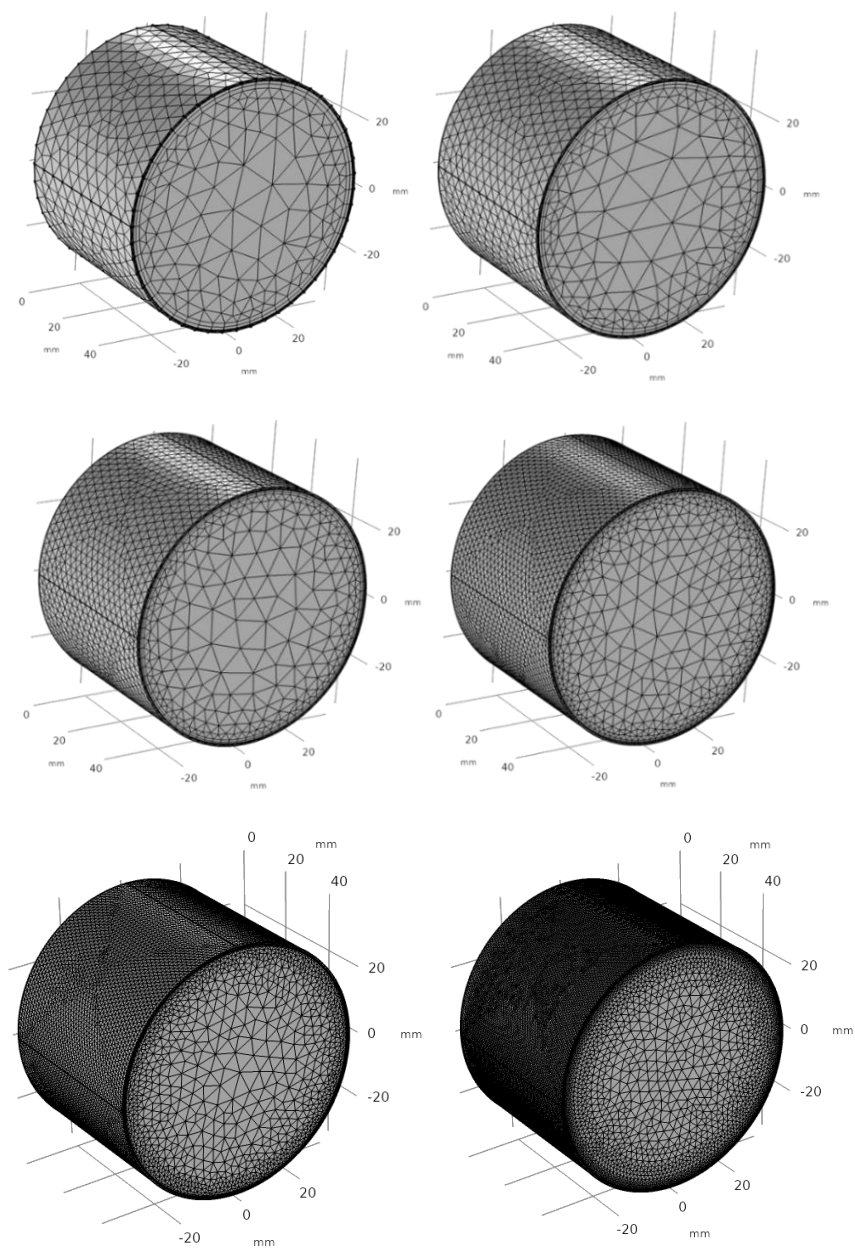


Figura 32. Mallados de diferente grosor: extremadamente gruesa, extra gruesa, muy gruesa, gruesa, normal y fina (de izquierda a derecha y de arriba abajo).

En el caso de Tutar y Erdogan (2012), utilizaron elementos cuadriláteros. En este caso, se ha utilizado una malla especial no uniforme compuesta de elementos tetraédricos que se ajustan mejor a geometrías complejas. Además, al igual que Rabiey et al., (2007) se ha utilizado una malla más precisa y refinada en las zonas de contacto entre líquido y sólido, es decir, en las paredes y en las zonas de contacto del cardo y líquido, zonas donde existe un mayor gradiente de velocidades y temperaturas. En cada una de las mallas se comprobaron la cantidad de elementos totales (tetraedros más prismas), así como el tiempo que tardaba en calcular 300 segundos de simulación. Dichos parámetros pueden observarse a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de modelado del mallado en función del grosor.

	Extremadamente gruesa	Extra gruesa	Muy gruesa	Gruesa	Normal	Fina
Tetraedros	16.299	28.653	61.104	145.852	415.389	1.579.527
Prismas	2.800	4.876	8.992	19.056	44.472	135.632
Elementos totales	19.099	33.529	70.096	164.908	459.861	1.715.159
Tiempo	300s	300s	300s	300s	10s	10s
Tiempo cálculo	44min	1h 6min	2h 44min	9h 13min	51min	5h55min

Como puede observarse en la tabla anterior, conforme se disminuye el grosor de la malla, no solo aumenta el número de elementos a simular, si no el tiempo que tarda el programa en calcular dichos elementos. Así pues, se puede comprobar cómo el aumento del tiempo de cálculo tiene un crecimiento exponencial, llegando a tiempos superiores a 3-5 días para simular el modelo con una malla fina (para modelizar 10 segundos, el programa tarda 5h 55min).

Una vez estudiado el número de elementos a calcular y el tiempo de espera de cada uno de ellos, se decidió desarrollar el modelo con una malla “gruesa”, la cual trabaja con un total de 164.908 elementos, realizando los cálculos en 9h 13min. Esto indica que cada vez que se desee calcular algo nuevo o se modifica cualquier parámetro del modelo, el programa tarda 9h 13min en mostrar los resultados.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Simulantes alimentarios

6.1.1 Agua.

El agua es uno de los componentes principales y mayoritarios de los alimentos. Además, la mayoría de los líquidos de gobierno están formados en base a agua, por lo que es uno de los simulantes alimentarios más apropiados para el estudio. De esta forma, el agua representa todos aquellos alimentos acuosos o que contengan como líquido de gobierno agua.

El objetivo principal de esta fase es estudiar las pendientes de calentamiento del agua, dependiendo de la potencia de calentamiento (pot) y velocidad de rotación (rot) de la lata. En la Tabla 6 se puede observar el resumen de todo el estudio.

En primer lugar, se probó la combinación potLOW-rotLOW. La Figura 33 muestra la evolución de la temperatura en dichas condiciones.

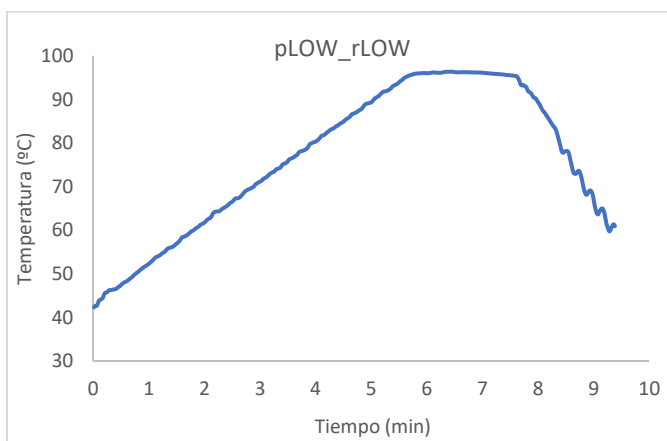
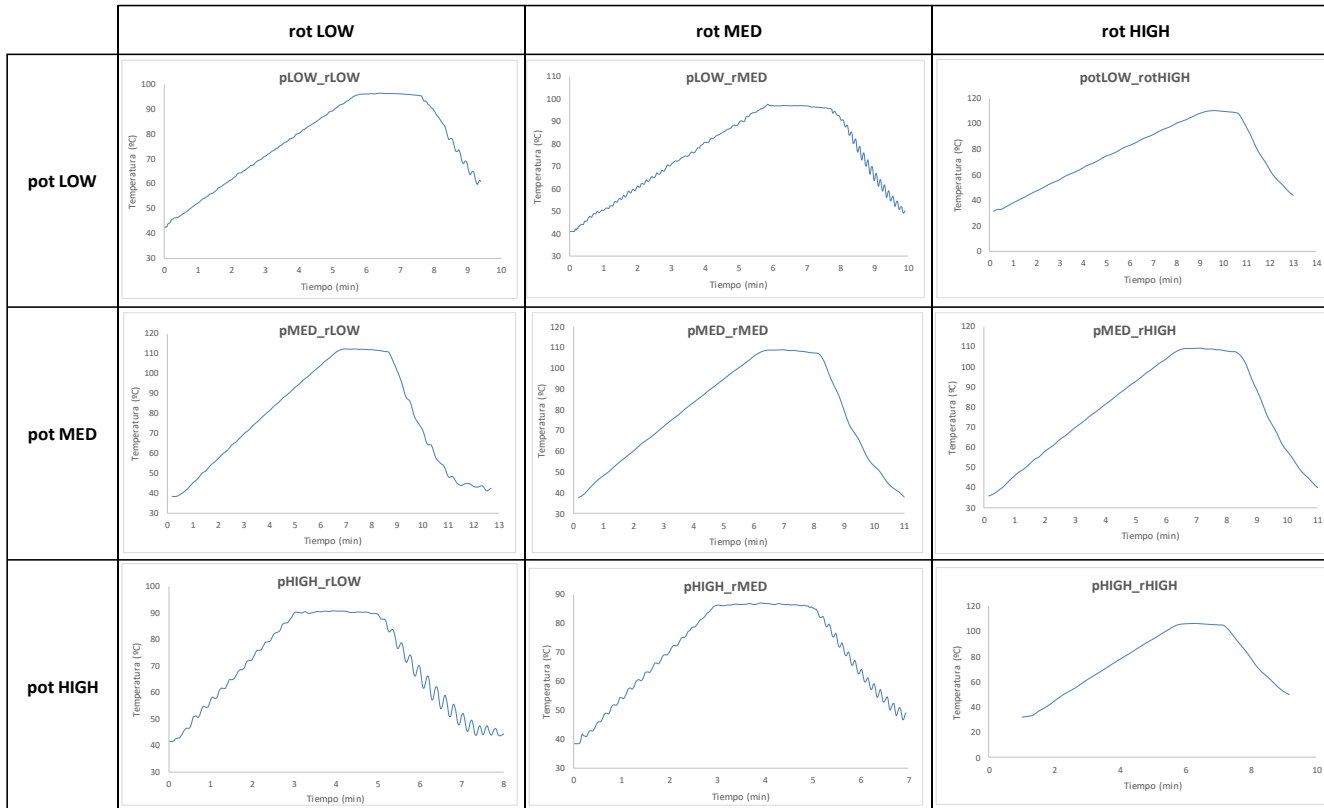


Figura 33. Curva de calentamiento de agua a potencia baja y velocidad de rotación baja.

Tabla 6. Resumen de los tratamientos de esterilización de agua, combinando potencias de calentamiento baja, media y alta con velocidades de rotación baja, media y alta.



En este caso, la pendiente de calentamiento se rige por la ecuación $y=9,3195x+43,069$ obteniendo una pendiente de calentamiento de $9,32^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

A continuación, se probaron las combinaciones porLOW-rotMED y potLOW-rotHIGH para comprobar si la velocidad de rotación de la lata afecta a la pendiente de calentamiento, trabajando con potencias bajas (Figuras 34 y 35).

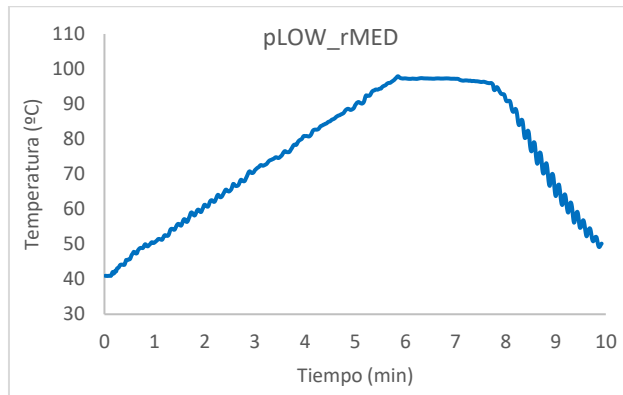


Figura 34. Curva de calentamiento de agua a potencia baja y velocidad de rotación media.

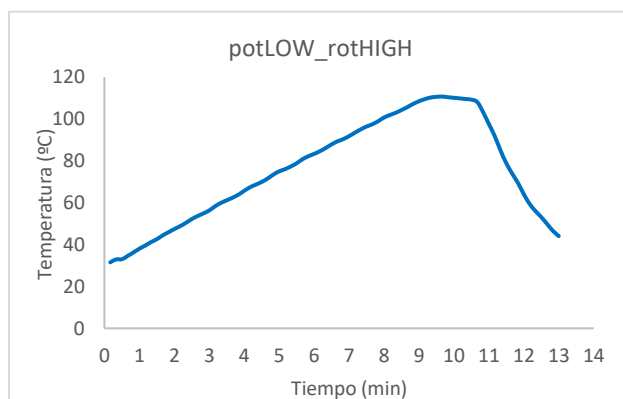


Figura 35. Curva de calentamiento de agua a potencia baja y velocidad de rotación alta.

En este caso, las ecuaciones de la pendiente de calentamiento fueron $y=9,7565x+41,103$ e $y=8,8234x+29,885$ para las rotaciones medias y altas respectivamente.

Así pues, se puede comprobar como la velocidad de rotación no afecta significativamente el valor de la pendiente de calentamiento a potencias bajas.

Una vez finalizadas las pruebas a potencias bajas, se procedió a estudiar el comportamiento del agua a potencias medias. De igual manera que en el caso anterior, se probaron velocidades de rotación baja, media y alta.

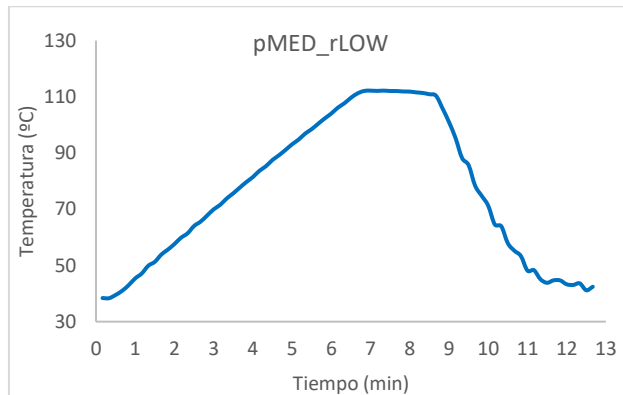


Figura 36. Curva de calentamiento de agua a potencia media y velocidad de rotación baja.

En este caso, trabajando con potencias media y rotación baja (Figura 36) conseguimos una ecuación para la pendiente de calentamiento de $y=11,679x+34,275$. Comparando dicha pendiente con las obtenidas en los ensayos anteriores (potencia baja), se obtiene un aumento de $2-3^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Tras la prueba con rotación baja, se estudió el comportamiento del simulante a velocidades medias y altas (Figuras 37 y 38).

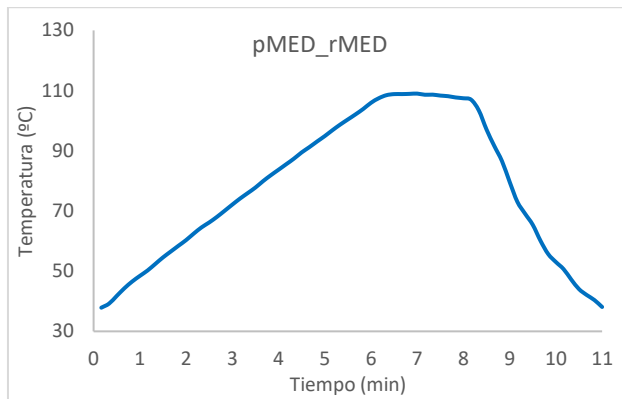


Figura 37. Curva de calentamiento de agua a potencia media y velocidad de rotación media.

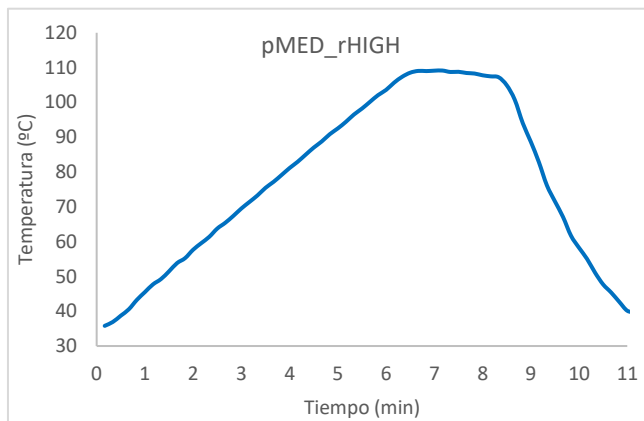


Figura 38. Curva de calentamiento de agua a potencia media y velocidad de rotación alta.

En este caso, se consiguieron ecuaciones para las pendientes de calentamiento de $y=11,575x+36,92$ e $y=11,714x+33,875$ por lo que, tras el estudio, se puede concluir que la velocidad de rotación no afecta a la pendiente de calentamiento del agua a potencia media.

Una vez finalizadas las pruebas a potencias bajas, se procedió a estudiar el comportamiento del agua a potencias altas. De igual manera que en el caso anterior, se probaron velocidades de rotación baja, media y alta.

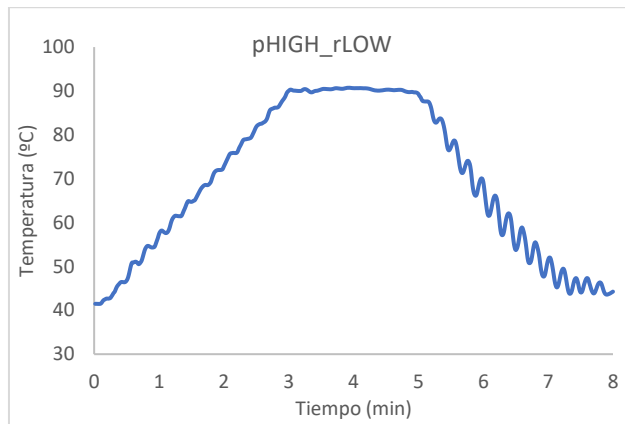


Figura 39. Curva de calentamiento de agua a potencia alta y velocidad de rotación baja.

El primer tratamiento (pHIGH_rLOW) presenta una pendiente de calentamiento con ecuación $y=16,661x+39,797$, aumentando la velocidad de calentamiento $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ respecto a los tratamientos a potencia media (Figura 39).

Una vez obtenida la pendiente de calentamiento a potencia alta y rotación baja, se procedió a comprobar si la velocidad de rotación de la lata podía mejorar dicha pendiente o no (Figuras 40 y 41).

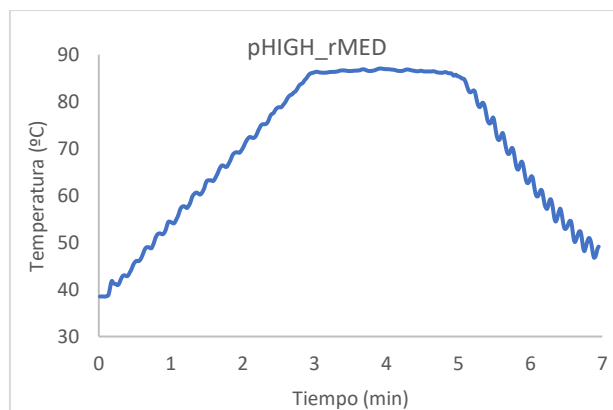


Figura 40. Curva de calentamiento de agua a potencia alta y velocidad de rotación media.

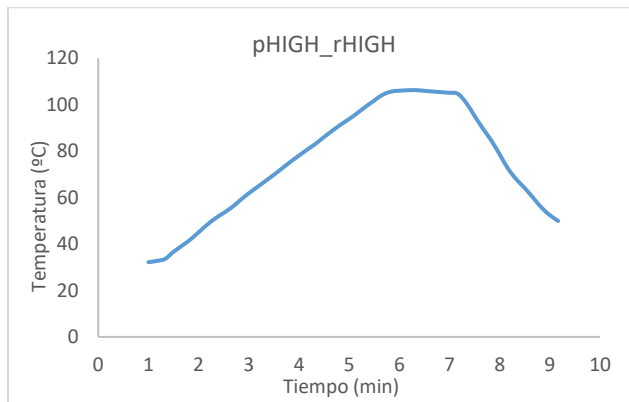


Figura 41. Curva de calentamiento de agua a potencia alta y velocidad de rotación alta.

Una vez obtenidas las curvas de penetración de calor del agua a potencia alta, con velocidades de rotación media y alta, se consiguieron pendientes de calentamiento de $y=16,472x+37,472$ e $y=16,014x+29,396$ respectivamente.

En este caso, igual que en los anteriores, la velocidad de rotación no afecta a la pendiente de calentamiento.

Para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, a continuación, se presentan las gráficas de las pendientes de calentamiento de los distintos tratamientos (Figuras 42 y 43).

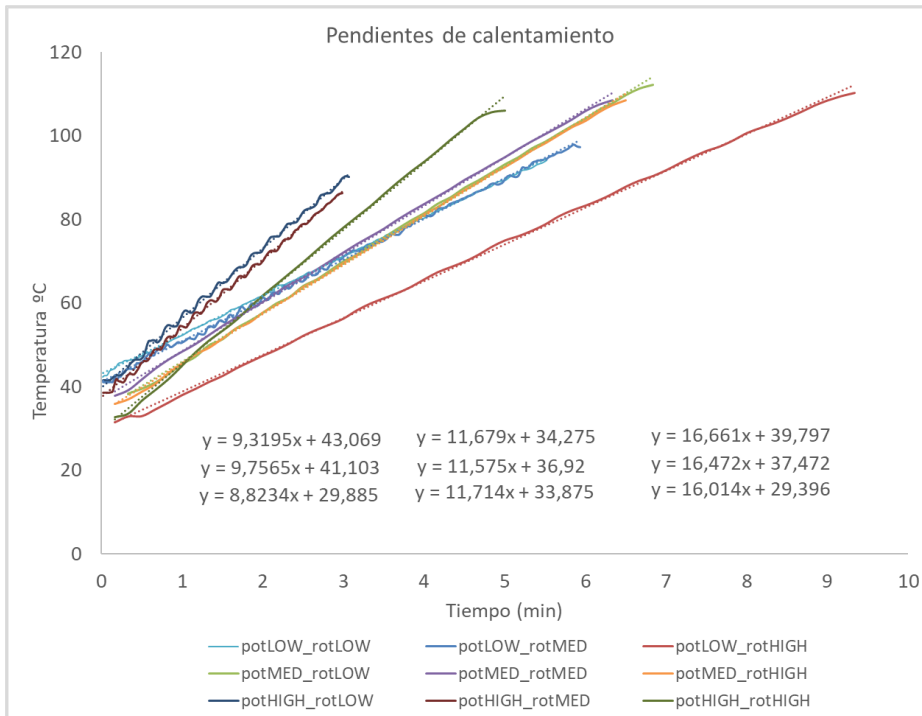


Figura 42. Pendientes de calentamiento y ecuaciones de los 9 tratamientos de agua.

En la Figura 43 se pueden observar los 3 grupos de tratamientos: 1) potencia baja con pendientes de calentamiento de 8-9°C/min; 2) potencia media con pendientes de calentamiento de 11,5 °C/min; 3) potencias de calentamiento alta con pendientes de 16°C/min. En este caso, la diferencia entre las distintas potencias emitidas es clara. Sin embargo, la velocidad de rotación no afecta a la transmisión de calor, ya que el agua es un producto con una difusividad térmica alta, permitiendo una rápida penetración de calor.

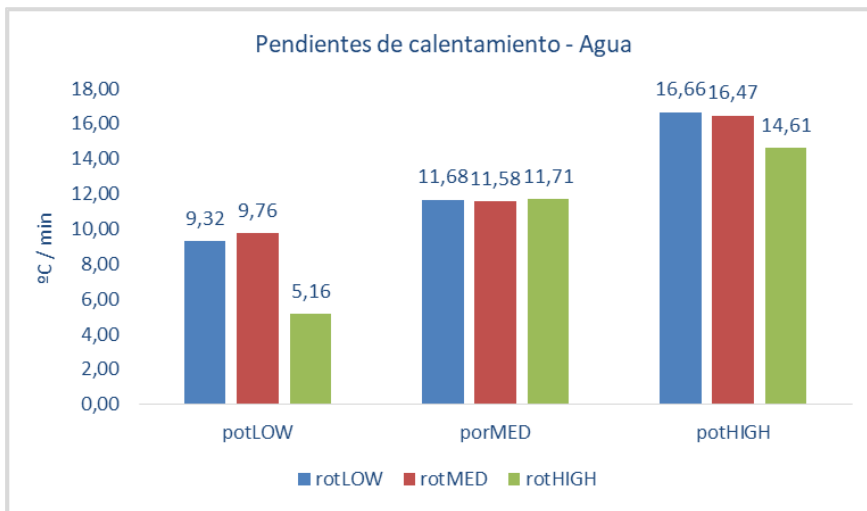


Figura 43. Pendientes de calentamiento de los 9 tratamientos de agua.

Desde la creación de los tratamientos térmicos de esterilización se ha trabajado en buscar alternativas al sistema convencional para mejorar la penetración de calor. Los sistemas más utilizados hasta el momento para reducir los tiempos de procesado son las diferentes formas de agitación (Casp & Abril, 2003).

Por un lado, se puede aplicar rotación tapa-fondo-tapa, la cual consiste en la traslación del envase sobre un eje perpendicular a su máxima longitud. Se han publicado resultados utilizando como fluido calefactor mezcla de vapor y aire (Ali et al., 2006), inmersión en agua (Naveh & Kopelman, 1980) y lluvia de agua sobrecalentada (Van Loey et al., 1994). En el caso de productos de muy baja viscosidad o acuosos, se ha observado que la penetración no mejora significativamente, debido a que cuando se aplica el tratamiento en estático, se producen corrientes de convección de forma natural (Abril & Casp, 2010; Ali et al., 2006).

Este mismo efecto se ha podido comprobar en el presente estudio, ya que no se encuentran diferencias entre las distintas velocidades de rotación cuando se trabaja con agua. En este caso, se está aplicando rotación axial y es necesaria para distribuir el calor inducido por la bobina a través de toda la lata y evitar así que se pueda quemar. Además, Tucker (2005) expuso que velocidades superiores a 15rpm pueden ocasionar problemas mecánicos al trabajar con equipos industriales. En el presente estudio, se ha trabajado con velocidades inferiores, por lo que la implantación industrial sería viable.

Por otro lado, se puede aplicar la rotación axial. En este caso, es una técnica comúnmente usada en sistemas de esterilización continuos y con vapor de agua saturado como medio calefactor (Berry et al., 1979, 1985; Berry & Bradshaw, 1980, 1982, 1986; Berry & Dickerson, 1981; Berry & Kohnhorst, 1985; Bichier et al., 1995) Según (Dwivedi & Ramaswamy, 2010b) Dwivedi y Ramaswamy, la agitación axial es más eficaz que en el caso de la rotación tapa-fondo-tapa, lo cual comprobaron Dwivedi y Ramaswamy en su estudio posterior (2010a).

Sin embargo, en productos de viscosidad media, sí que se mejora significativamente la penetración de calor (Berry & Bradshaw, 1982; Berry & Dickerson, 1981). Este hecho se puede comprobar a continuación en los resultados presentados en el apartado 6.1.2 y 6.1.3 donde se estudia el efecto de la potencia y la velocidad de rotación sobre productos de media y alta viscosidad.

6.1.2 *Aceite de oliva*

Una vez finalizado el estudio con agua, se procedió a realizar los mismos ensayos con aceite de oliva, con el objetivo de estudiar el comportamiento de productos grasos o de baja viscosidad ante el calentamiento por inducción electromagnética. En la Tabla 7 se encuentran resumidos los 9 tratamientos, combinando potencias baja, media y alta con velocidades de rotación baja, media y alta.

A simple vista, los distintos tratamientos presentan curvas de penetración relativamente homogéneas, aunque se comienzan a ver comportamientos extraños. Estos comportamientos son debidos a la viscosidad del producto que, aunque no sea muy alta, comienza a sufrir efectos de deslizamiento con los bordes de la lata, provocando así una mala agitación del producto dentro del recipiente y mostrando picos de temperaturas heterogéneas. Dicho efecto se puede observar en potencias de calentamiento media y alta, donde el producto se calienta muy rápido pero no es capaz de transmitir el calor hacia el interior de manera homogénea. Este comportamiento ha sido observado en otros estudios realizados, tales como en trabajo realizado por (Abril Requena & Casp Vanaclocha, 2006) sobre el efecto de la rotación en siliconas, donde se pudo apreciar el efecto “sierra” provocado por la mezcla del producto con la rotación.

Para facilitar el análisis de los resultados obtenidos, en las Figuras 44 y 45 se presentan las pendientes de calentamiento y sus ecuaciones. El grupo de ecuaciones de la izquierda pertenece a la potencia baja de calentamiento, el grupo de arriba a la derecha, a la potencia de calentamiento media y el de abajo a la derecha, potencia alta.

Dentro de cada grupo, de arriba abajo, corresponden a velocidades de calentamiento baja, media y alta respectivamente.

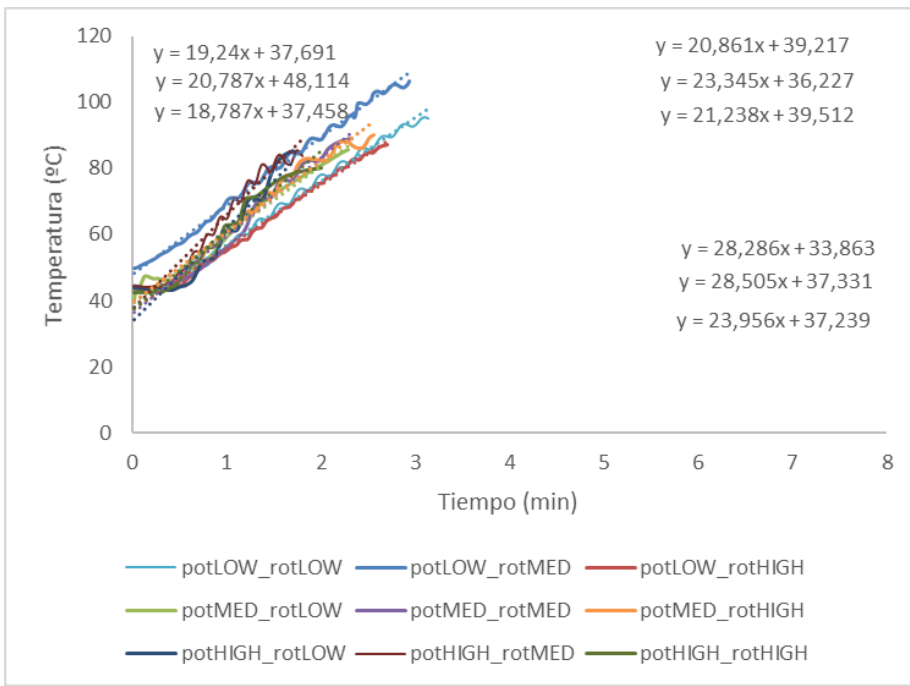
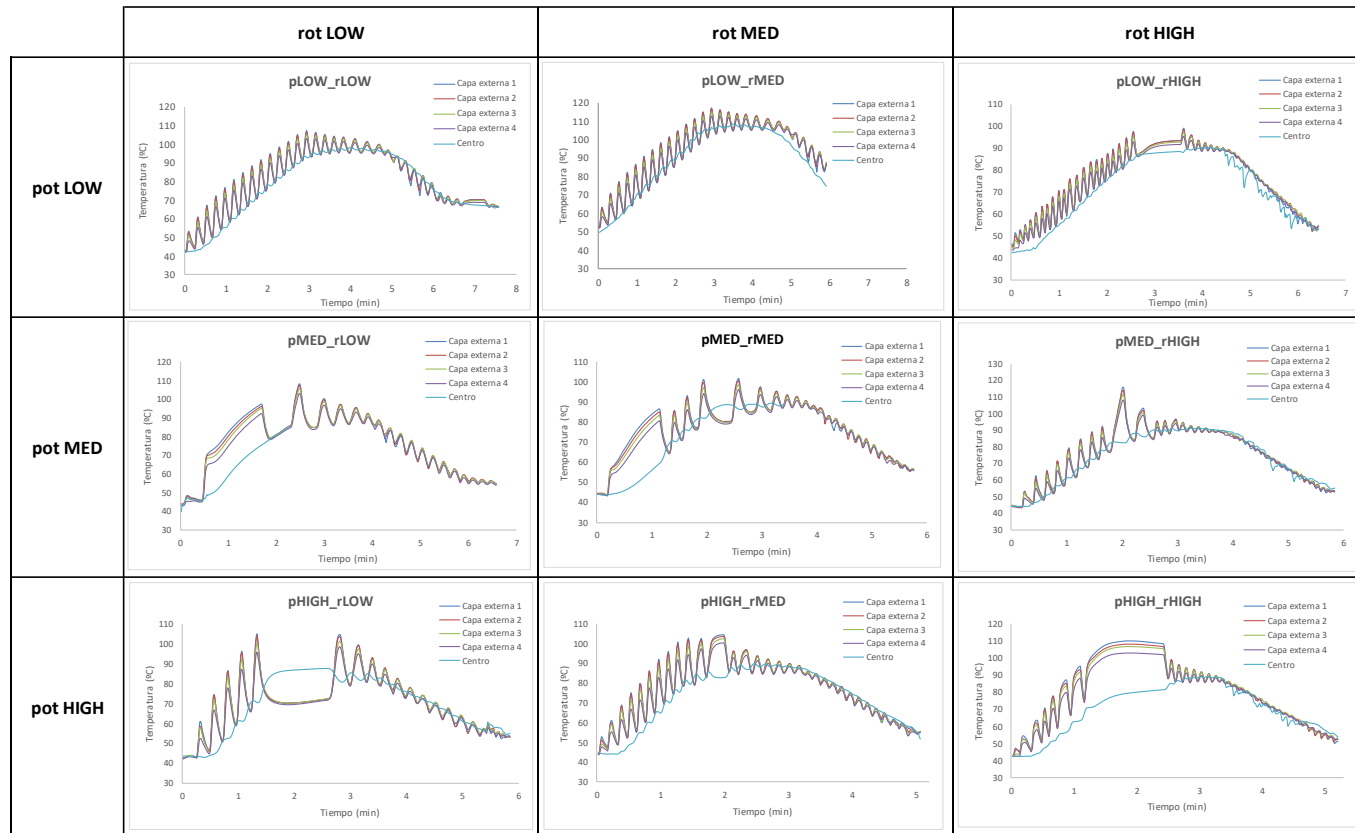


Figura 44. Pendientes de calentamiento y ecuaciones de los 9 tratamientos de aceite de oliva.

Si se analizan las pendientes de calentamiento comparando las potencias emitidas, podemos observar cómo la pendiente aumenta a la vez que la potencia. Así pues, para potencias bajas los resultados presentan una potencia de 18-20°C/min, para potencias medias de 20-23 °C/min y para potencias altas de 23-28°C/min.

Tabla 7. Resumen de los tratamientos de esterilización de aceite de oliva, combinando potencias de calentamiento baja, media y alta con velocidades de rotación baja, media y alta.



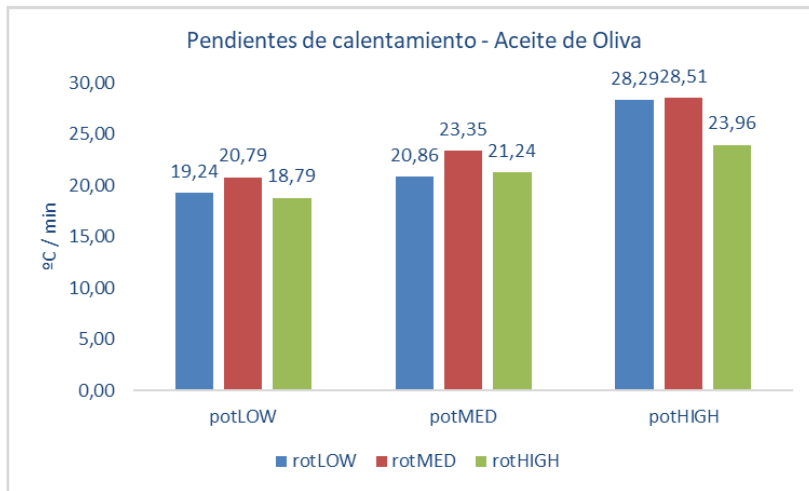


Figura 45. Pendientes de calentamiento de los 9 tratamientos de aceite de oliva.

Por otro lado, es importante conocer cómo afecta la velocidad de rotación sobre la pendiente de calentamiento en cada una de las potencias aplicadas. En las 3 potencias aplicadas se puede observar el mismo comportamiento. La velocidad de rotación media mejora la pendiente de calentamiento respecto a la velocidad de rotación baja, pero cuando la velocidad aumenta a velocidad alta (10rpm), ocurre el efecto contrario, es decir, la pendiente de calentamiento disminuye.

Este comportamiento se puede explicar mediante el efecto “deslizante” que el producto sufre a velocidades de rotación altas, mediante el cual el aceite desliza sobre la superficie interna de la lata y no rota a la vez que esta.

Así pues, en productos de viscosidad baja-media o productos con líquido de gobierno en base a grasa o aceite, hay que tener en cuenta el efecto de deslizamiento que se produce al rotar la lata a velocidades altas para no provocar el efecto contrario al deseado. Ates et al. (2014). comprobaron que con la rotación por vaivén se conseguía reducir de 70 min a 12 el tiempo de tratamiento, consiguiendo pendientes de calentamiento de 5-6°C/min. En este

caso, se cuadruplica la pendiente de calentamiento obtenida con la tecnología desarrollada.

6.1.3 *Silicona 1000mPa·s*

El objetivo principal de esta fase es estudiar el comportamiento de la Silicona 1000mPa·s, simulando el tratamiento térmico de productos de alta viscosidad que basan el calentamiento en la conducción. Así pues, de igual manera que con el agua y el aceite, se combinaron potencias de calentamiento baja, media y alta, con velocidades de rotación baja, media y alta.

Las curvas de penetración de cada uno de los estudios se pueden observar en la Tabla 8. A simple vista y sin analizar las pendientes de calentamiento, se puede observar que las curvas de temperatura no son uniformes, presentando picos muy heterogéneos y diferencia entre capas externas e internas. Esto es debido a la baja difusividad térmica que presenta la silicona. De la misma forma ocurrirá cuando tratemos alimentos de alta viscosidad, como por ejemplo, cremas, pures, concentrados de tomate o salsas espesas. Este comportamiento ha sido observado en otros estudios (Llerena Danza & Tejada Atahualpa, 2017), donde no se aprecia una distribución homogénea del calor. Así pues, las corrientes convectivas pueden verse interrumpidas, presentando temperaturas altas en las zonas externas y más bajas en el centro, debido a un bajo coeficiente de transferencia de calor y una mala penetración (Casp & Abril, 2003)

Para facilitar el análisis de los resultados obtenidos, en las Figuras 46 y 47 se presentan las pendientes de calentamiento y sus ecuaciones. El grupo de ecuaciones de la izquierda pertenece a la potencia baja de calentamiento, el

grupo de arriba a la derecha, a la potencia de calentamiento media y el de abajo a la derecha, potencia alta.

Dentro de cada grupo, de arriba abajo, corresponden a velocidades de calentamiento baja, media y alta.

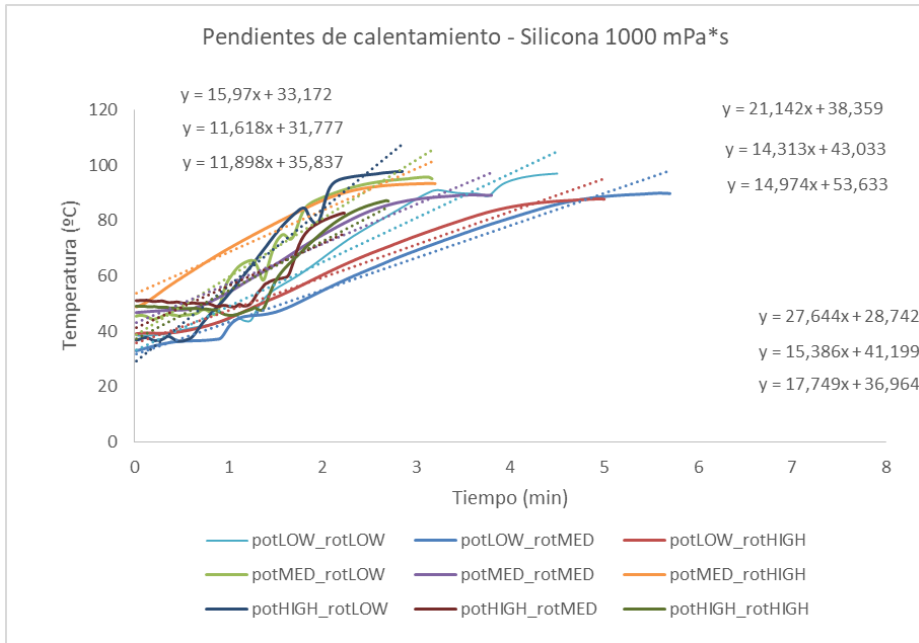
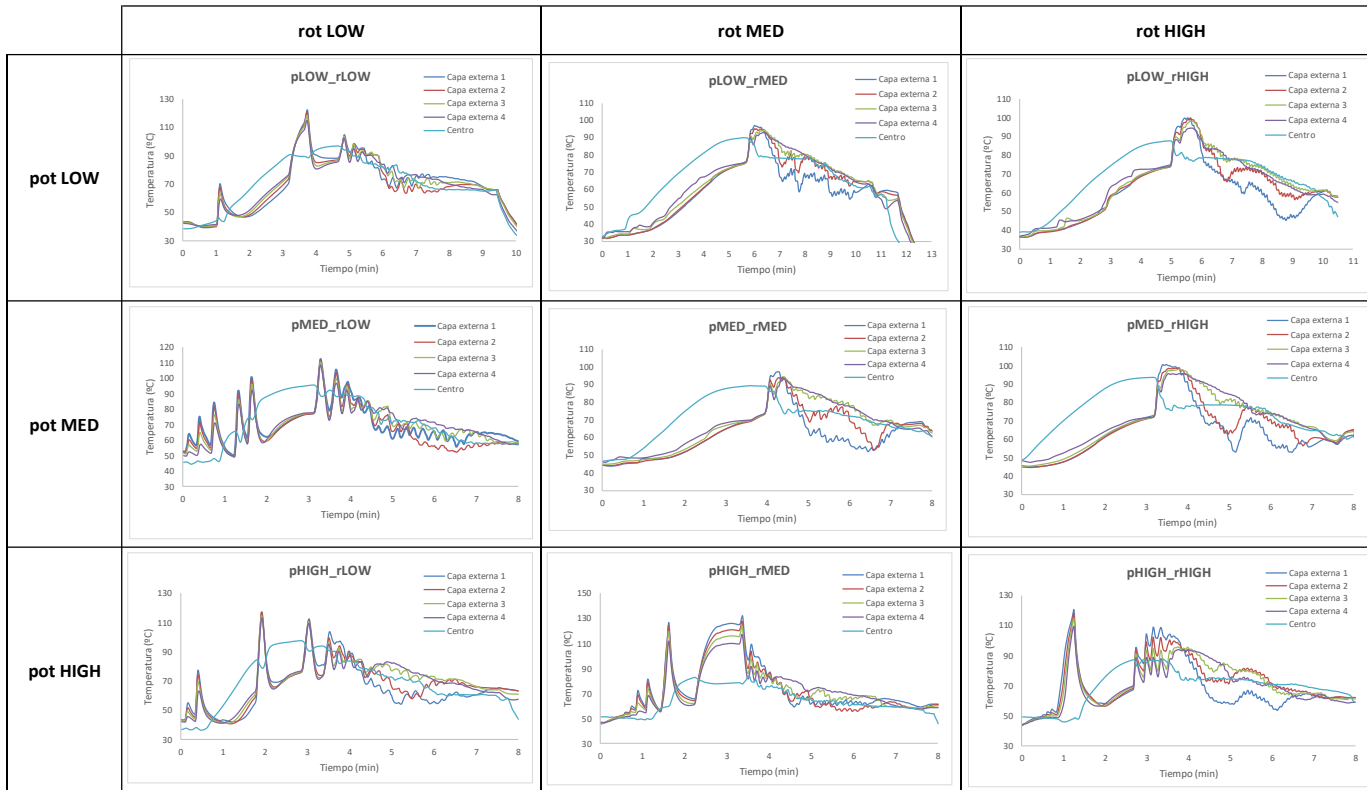


Figura 46. Pendientes de calentamiento y ecuaciones de los 9 tratamientos de silicona 1000mPa*s.

El primer grupo a estudiar es la potencia de calentamiento baja. Si se observan las pendientes de calentamiento se puede apreciar cómo a velocidades de rotación baja la pendiente de calentamiento es de 15,97°C. Al aumentar la velocidad de rotación (media y alta) se provoca un efecto negativo sobre el producto, ya que la lata gira más rápido de lo que el producto puede (debido a la viscosidad alta de la silicona), por lo que la pendiente de calentamiento disminuye 4°C/min al aumentar la velocidad de rotación.

Tabla 8. Resumen de los tratamientos de esterilización de la Silicona 1000mPa*s, combinando potencias de calentamiento baja, media y alta con velocidades de rotación baja, media y alta.



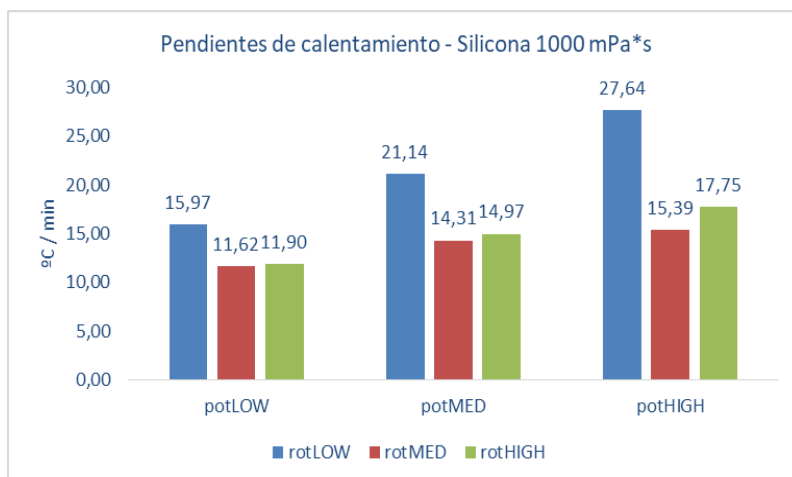


Figura 47. Pendientes de calentamiento del proceso de esterilización del simulante Silicona 1000mPa*s

En el caso de potencias medias, al trabajar con velocidad de rotación baja se obtiene una pendiente de calentamiento de 21,14°C, incrementando 5°C/min aproximadamente respecto a la potencia de calentamiento baja. De igual manera que en el caso anterior, al aumentar la velocidad de rotación a media y alta, la pendiente de calentamiento disminuye a 14,31 y 14,97°C/min respectivamente.

Por último, en cuanto al tratamiento con potencia alta, se consigue una pendiente de calentamiento de 27,64°C al trabajar con velocidad de rotación baja, incrementando así 6°C/min el calentamiento respecto a los tratamientos con potencia media. Al aumentar la velocidad de rotación a media y alta, se produce el mismo comportamiento que en los casos anteriores, es decir, la pendiente de calentamiento disminuye a 15,39 y 17,75°C/min respectivamente.

Existen numerosos trabajos en los que se ha estudiado el efecto de distintos tipos de agitación (rotación axial, rotación tapa-fondo-tapa, vaivén, etc.) y las velocidades de rotación para mejorar la penetración de calor (Sarghini &

Erdogdu, 2016). Naveh y Kopelman (1980) compararon el efecto de la velocidad de rotación axial y tapa-fondo-tapa respecto al coeficiente de transferencia de calor en productos viscosos. Price y Bhowmik (1994) estudiaron el coeficiente de transferencia de calor en productos líquidos enlatados aplicando rotación vertical y horizontal. En todos estos casos mencionados, la agitación mejora la penetración de calor. Sin embargo, no siempre la rotación mejora el calentamiento (Knap & Durance, 1998). En los estudios de Tutar y Erdogdu (2012) y Erdogdu y Tutar (2012) observaron un efecto negativo en la rotación axial en productos donde la viscosidad es muy alta, efecto observado en el presente estudio a velocidades de rotación elevadas.

6.2 Esterilización de cardo enlatado

El cardo es uno de los productos en conserva más consumidos. Además, el tratamiento de esterilización deteriora las estructuras fibrosas del cardo y los pigmentos, por lo que, tras la exposición a un largo tiempo a altas temperaturas, la textura y color del producto se deterioran.

Por todo ello, es importante buscar nuevas tecnologías que sustituyan al proceso convencional de esterilización, en este caso, la esterilización por inducción electromagnética.

Siguiendo el diagrama de flujo industrial, en primer lugar, se separan las pencas que tengan la calidad mínima requerida para el consumo. Una vez seleccionadas, se lavan y limpian dichas pencas, eliminando las fibras externas del producto, facilitando su posterior cocción. A continuación, se trocean las pencas y se escalda el producto.

Una vez escaldado, se enlata el producto añadiendo el líquido de gobierno caliente para facilitar el tratamiento térmico.

Una vez finalizado el proceso de elaboración, se tratan térmicamente las latas, bien sea por el método convencional o por inducción electromagnética.

6.2.1 Curvas de temperatura del tratamiento de esterilización

En primer lugar, se realiza el tratamiento térmico de esterilización del cardo enlatado tomando como referencia las condiciones de procesado industriales. Las condiciones pueden consultarse en la Tabla 9.

Tabla 9. Condiciones industriales de esterilización de cardo enlatado.

Tiempo	Temperatura	Presión
20min	121°C	2,1bar
15min	121°C	2,1bar
30min	60°C	1,2bar
20min	30°C	1,2bar

Así pues, una vez obtenida la curva de tratamiento registrada con ayuda de las sondas Ellab colocadas en el centro térmico del envase, se calcula la intensidad de esterilización (F_0), tomando como referencia los valores de termodestrucción de *Clostridium botulinum* (T^a ref = 121,1°C y $z = 10$). En este caso, se consigue alcanzar los 120°C, obteniendo una F_0 de 10 aproximadamente (Figura 48). En el estudio de Urtasun Pascual (2016) trabajaron en la optimización del proceso de esterilización de diferentes productos alimentarios. Aunque no estudiaron el caso en particular del cardo, probaron productos de tamaños similares, como por ejemplo, la alcachofa (troceada), con la cual trabajaron con intensidades de esterilización de 5-8.

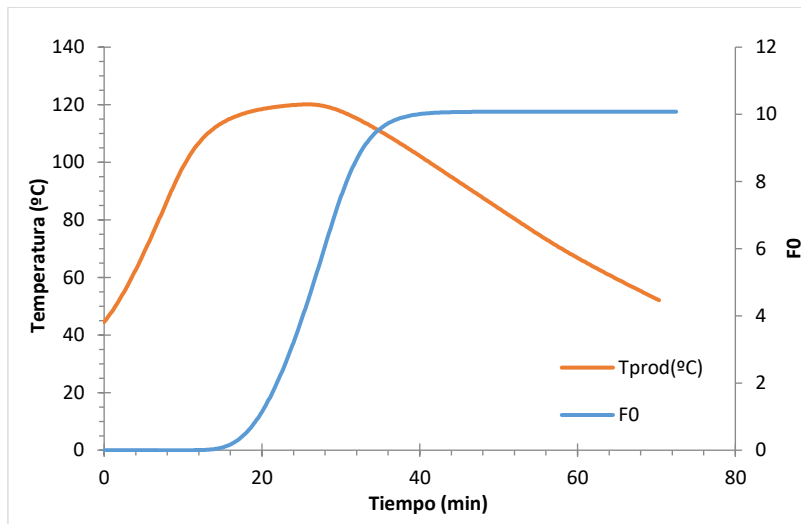


Figura 48. Curva de temperatura del proceso convencional de esterilización de cardo enlatado.

Una vez conocida la intensidad del proceso de esterilización por lluvia de agua sobrecalentada, se optimiza y ajusta el tratamiento térmico por inducción electromagnética para conseguir un tratamiento de igual intensidad.

El tratamiento escogido para los ensayos de vida útil es a potencia alta (650W), con una velocidad de rotación media (6 rpm) y consigna de temperatura de mantenimiento 125°C durante 3min 30s a una potencia del 75%. De este modo se consigue de nuevo una F₀ de 10, alcanzando los 120°C en el interior del producto (Figura 49).

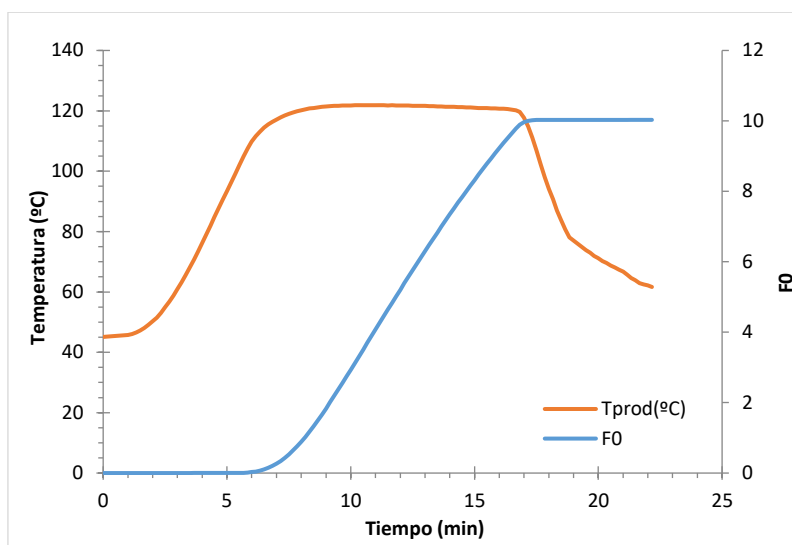


Figura 49. Curva de temperatura del proceso de esterilización de cardo enlatado mediante inducción electromagnética.

A continuación, en la Figura 50 se pueden observar las dos curvas de tratamiento térmico y sus intensidades de esterilización. Por un lado, si se comparan las curvas de penetración se puede observar cómo la temperatura alcanzada es la misma, 120°C.

Sin embargo, la muestra tratada por inducción electromagnética tarda 8 min aproximadamente en alcanzarlos, mientras que la tratada por lluvia de agua sobrecalentada tarda casi 30 min.

Esta diferencia concluye en que el tiempo de esterilización por inducción electromagnética es de 20 min, mientras que el de esterilización por lluvia de agua es de 75. Esto supone una reducción del 75% en el tiempo de procesado, por lo que los costes energéticos son mucho menores, además de respetar la calidad organoléptica y la estructura del producto, como se verá en los siguientes apartados.

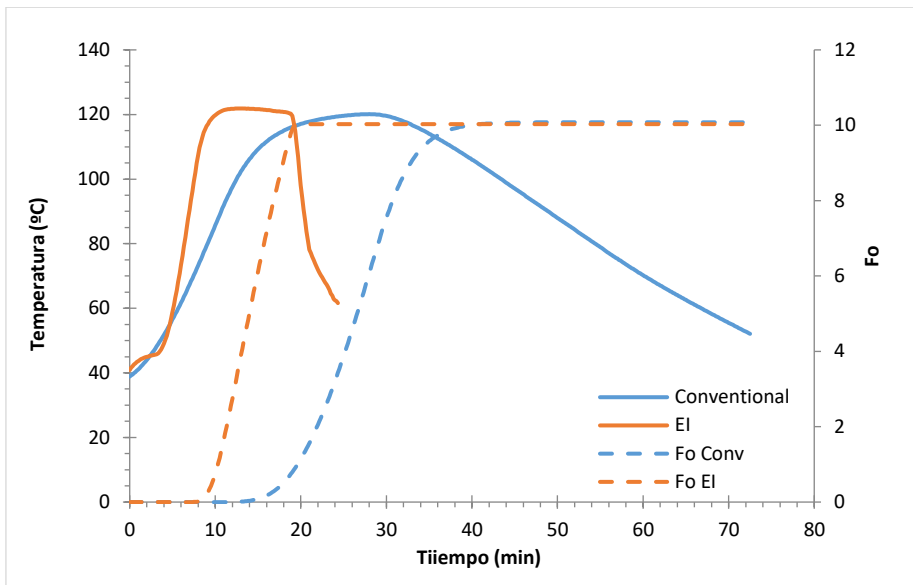


Figura 50. Tratamientos térmicos del proceso de esterilización convencional y por IE de cardo.

Con el objetivo de comparar de manera más sencilla los tratamientos, en la Figura 51 se presentan las pendientes de calentamiento y sus ecuaciones.

El tratamiento basado en el calentamiento por lluvia de agua sobrecalentada, tiene una pendiente de calentamiento que se rige por la ecuación $y=5,1661x+33,214$. Esto indica que el calentamiento se produce a una velocidad de $5,1661^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Sin embargo, la ecuación que explica el calentamiento basado en inducción electromagnética es $y=15,472x+48,938$, es decir, una velocidad de calentamiento de $15,472^{\circ}\text{C}/\text{min}$. En el trabajo de Urtasun Pascual (2016) compararon la intensidad de esterilización del mismo proceso en autoclave convencional, trabajando en estático o con rotación. En el caso de la alcachofa, consiguieron aumentar la F0 de 1 a 5,50 al pasar de estático a rotativo (6rpm). En ese caso, no buscaban reducir el tiempo de procesado, sino comparar el mismo tratamiento estudiando el efecto de la rotación. Aun así, la mejora en la transferencia de calor (aumento de F0), es un

indicativo de que para conseguir una misma intensidad de tratamiento ($F_0=1$), el tiempo de tratamiento se habría visto reducido aproximadamente 15 minutos, pasando de un tiempo total de 75 a 60.

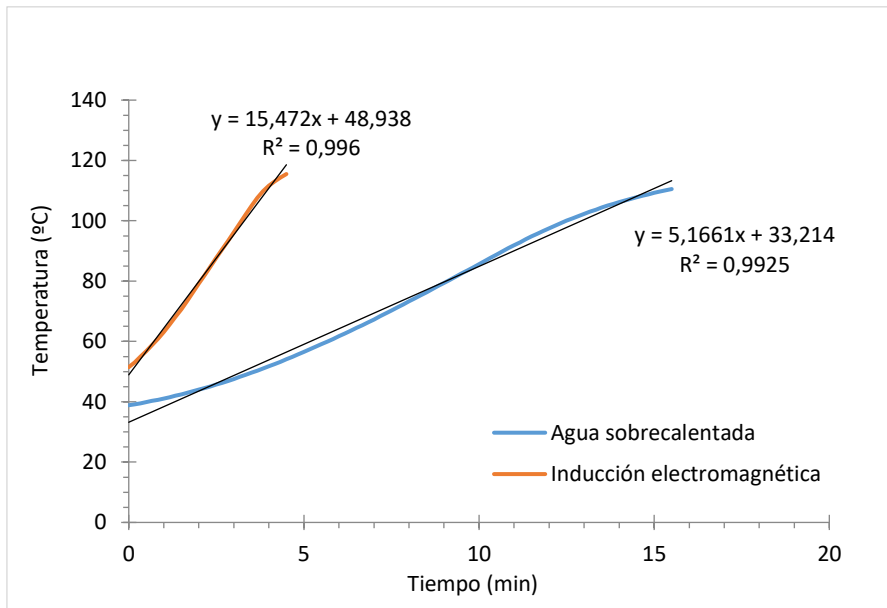


Figura 51. Pendientes de calentamiento de los procesos de esterilización de cardo.

Resumiendo, la tecnología de inducción electromagnética aumenta $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ la pendiente de calentamiento respecto al tratamiento convencional en el proceso de esterilización, reduciendo un 75% el tiempo total de procesado.

6.2.2 Análisis microbiológico. Test de estabilidad de conservas

Una vez esterilizado el producto con las dos tecnologías, se realizó el test de estabilidad de conservas para comprobar el efecto de la esterilización sobre los microorganismos. En ambos casos, todos los resultados fueron satisfactorios, presentando valores en todos los análisis por debajo de los límites de detección.











6.2.3 *Caracterización fisicoquímica.*

En primer lugar, es muy importante valorar la apreciación visual del producto una vez abierto el envase y conocer su evolución durante los meses de estudio. Así pues, a continuación, se pueden observar en la Tabla 10 las muestras de cardo esterilizadas por lluvia de agua sobrecalentada y por inducción electromagnética a día 0, mes 1, mes 3, mes 6 y mes 9.

En las imágenes se puede observar cómo el cardo tratado por inducción electromagnética (derecha) presenta un color más claro y vivo que el tratado mediante el método convencional (izquierda).

Además, se puede apreciar cómo los trozos de cardo de la derecha están menos deteriorados por el tratamiento que los de la izquierda, presentando menos defectos visuales en cuanto a la textura. Aunque las diferencias puedan percibirse visualmente, es necesario cuantificarlas objetivamente. Por ello, a continuación, se presentan los resultados de textura y color medidos instrumentalmente.

Tabla 10. Seguimiento visual de las muestras de cardo enlatado durante 9 meses de almacenamiento.

	TRATAMIENTO CONVENCIONAL	INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA
DÍA 0		
MES 1		
MES 3		
MES 6		
MES 9		

Textura

En la Figura 52 se encuentran resumidos los análisis de textura del cardo, representando la media y la desviación a lo largo del tiempo, así como la estadística de los datos.

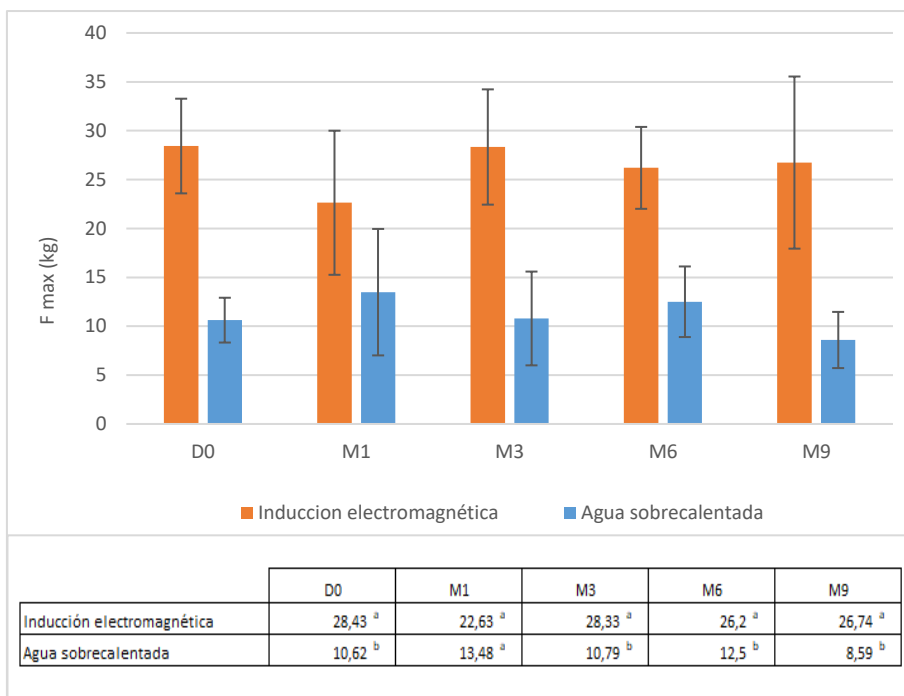


Figura 52. Evolución de la textura del cardo esterilizado durante 9 meses de almacenamiento.

En primer lugar, se puede observar cómo durante los 9 meses de vida útil, la fuerza necesaria para “morder” el cardo tratado por inducción electromagnética es superior a la necesaria para “morder” el convencional. Este hecho es un factor importante, ya que indica que el tratamiento es menos agresivo para el producto, respetando y preservando mejor las características fisicoquímicas y sensoriales del producto.

En la tabla inferior de la Figura 52 se encuentra reflejado el estudio estadístico de los datos. Diferente letra en la misma columna indica diferencias significativas entre las muestras con un nivel de confianza del 95%. Así pues, excepto a MES 1, las muestras presentan diferencias significativas en cuanto a la fuerza necesaria para masticar el producto, siendo superior en el caso de las tratadas mediante inducción electromagnética.

Los datos obtenidos concuerdan con las apreciaciones visuales comentadas anteriormente, donde se podía observar cómo el cardo tratado por inducción electromagnética estaba “más entero” y menos deteriorado que el convencional. Esta diferencia observada, ha sido estudiada en otros trabajos, donde se ha podido comprobar que uno de los tratamientos que más afecta a las propiedades fisicoquímicas y estructurales de los productos alimentarios, es la esterilización (Muñoz Martín, 2012). Por ello, toda mejora en el tratamiento térmico reducirá el deterioro producido.

Por otro lado, cabe destacar la gran variabilidad existente dentro de cada muestra, ya que en una misma lata existen trozos de cardo de pencas externas y de pencas internas, así como de la parte superior e inferior.

Color

En cuanto al color, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para los parámetros L^* , a^* y b^* a lo largo del tiempo (Figuras 53, 54 y 55), así como el ángulo HUE y el CHROMA de cada muestra (Figuras 57 y 58).

La coordenada L^* (Figura 53) describe la luminosidad de la muestra en un intervalo de 0 a 100 (negro a blanco respectivamente). A día 0, las dos muestras presentan una luminosidad similar. Conforme pasa el tiempo de almacenamiento (M1, M3 y M6), las muestras difieren, presentando un tono

más blanquecino la tratada mediante inducción electromagnética, con tendencia a oscurecerse conforme pasa el tiempo. Este comportamiento finaliza en el mes 9, cuando las muestras vuelven a presentar una luminosidad similar.

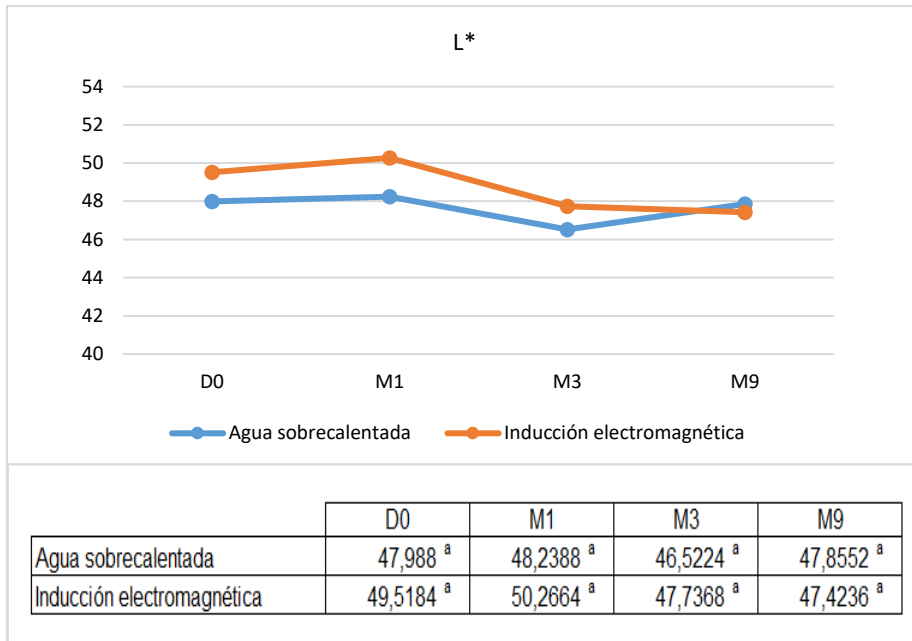


Figura 53. Evolución de la luminosidad del cardo durante 9 meses de almacenamiento.

En cuanto a la coordenada a* (Figura 54), explica la tendencia verde-rojo de la muestra. En la Figura 54 se puede observar cómo el cardo tratado con lluvia de agua sobrecalentada presenta un valor de a* superior, indicando que tiene tonos más rojizos que la tratada por inducción electromagnética, la cual tiende a tonos más verdosos. Este aspecto indica que el tratamiento de esterilización mediante inducción electromagnética preserva mejor el color de la materia prima, manteniendo el color verdoso del producto crudo.

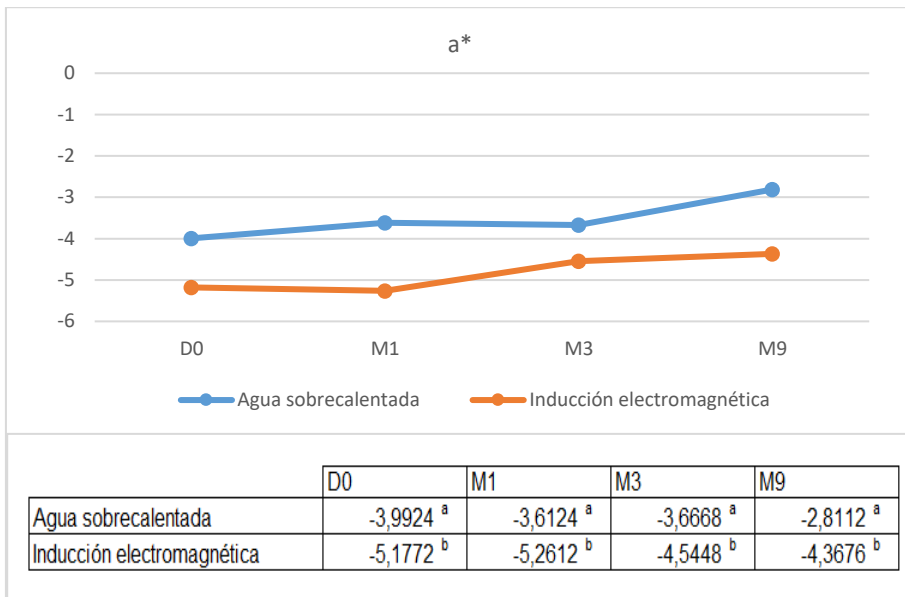


Figura 54. Evolución de la coordenada a^* (verde-rojo) del cardo durante 9 meses de almacenamiento.

Por último, la coordenada b^* (Figura 55) explica la tendencia azul-amarillo. En este caso, la muestra tratada por inducción electromagnética presenta un valor inferior que la tratada por el método convencional. Dicha diferencia no es relevante ya que, al realizar el estudio estadístico de los datos, las muestras no presentan diferencias significativas con un nivel de confianza de 95%.

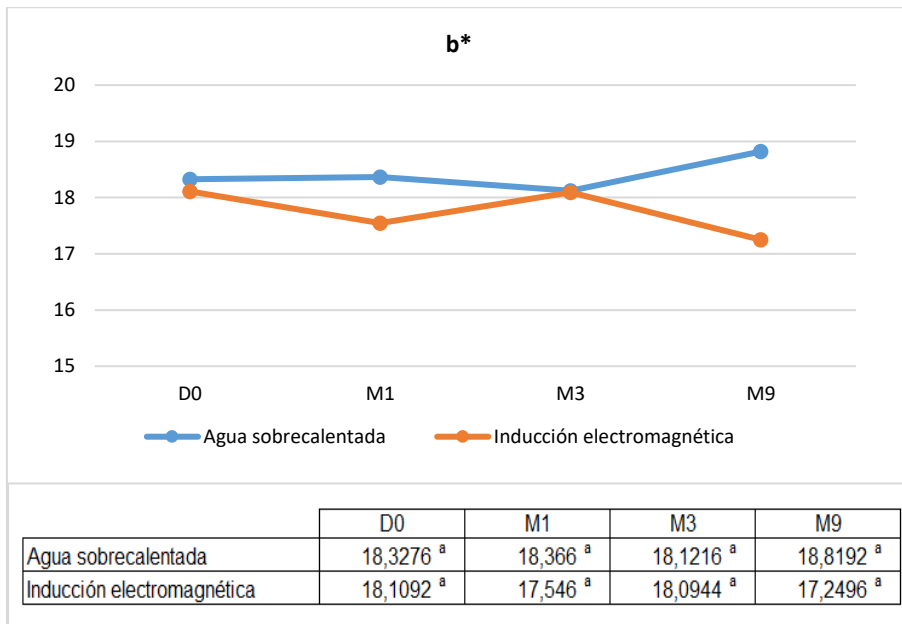


Figura 55. Evolución de la coordenada b^* (amarillo-azul) del cardo durante 9 meses de almacenamiento.

Con el objetivo de observar de manera más visual las coordenadas a^* y b^* y su disposición en el espectro de colores, en la Figura 56 se encuentran representados los valores de cada muestra.

Así pues, se puede observar cómo las muestras tratadas por inducción electromagnética se encuentran colocadas más a la izquierda que las tratadas por agua sobrecalentada, es decir, más cerca del color verde. Esta disposición explica las diferencias significativas mencionadas anteriormente para la coordenada a^* , y las no diferencias encontradas para la coordenada b^* , ya que en el eje “y”, las muestras se encuentran en la misma disposición, mientras que en el eje “x” es donde se pueden observar las diferencias entre ellas.

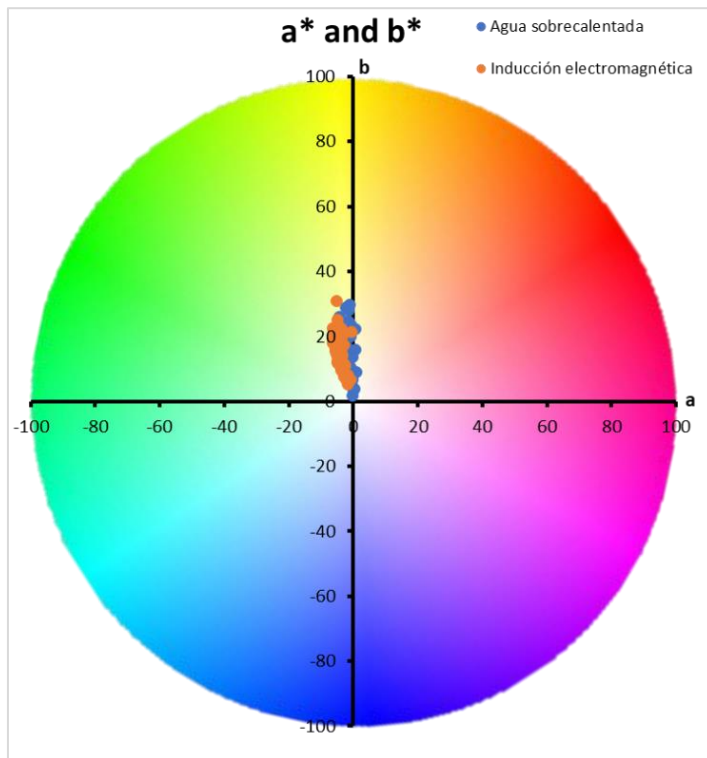


Figura 56. Angulo HUE de las muestras de cardo.

Por otro lado, se ha calculado el ángulo HUE, estudiando así la relación de a^* y b^* de las muestras. En la Figura 57 se puede observar como la muestra tratada por inducción electromagnética presenta un mayor ángulo que la convencional, indicando tonos más verdosos. Las muestras presentan diferencias significativas en todos los puntos de muestreo, con un nivel de confianza del 95%. Esta degradación del color, fue observada en estudios similares como el de Chirinos Garcia y Gargurevich Villaizan (2021), los cuales observaron la pérdida de color verde y rojo en pimiento tras el tratamiento térmico. De igual manera, la degradación del color verde (clorofila) y su dependencia con la temperatura ha sido estudiada en varios trabajos y con numerosos productos,

donde se llega a la conclusión de que la temperatura y el tiempo de exposición afectan a la degradación del color (Canjura et al., 1991; Weemaes et al., 1999).

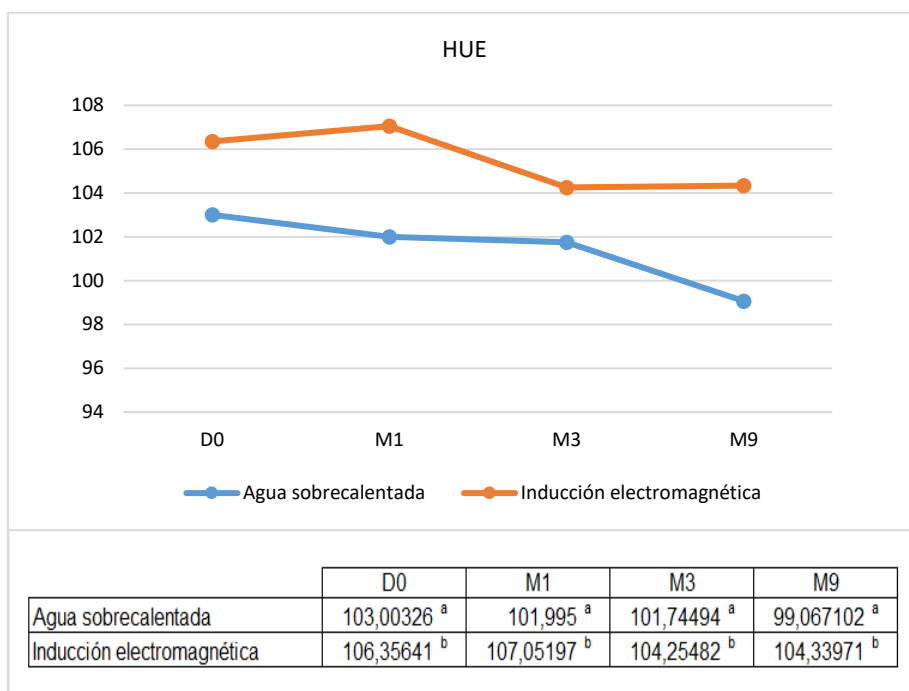


Figura 57. Evolución del ángulo HUE de las muestras esterilizadas de cardo durante 9 meses.

Por último, se ha calculado la intensidad de color, es decir, el CHROMA, a través del cual se calcula la distancia del color de la muestra al origen (blanco absoluto). En este caso, se puede observar en la Figura 58 cómo las muestras no presentan diferencias significativas durante los 9 meses de almacenamiento.

En definitiva, a través del análisis instrumental del color se ha comprobado cómo las muestras esterilizadas mediante inducción electromagnética presentan tonos más verdosos y luminosos que las convencionales.

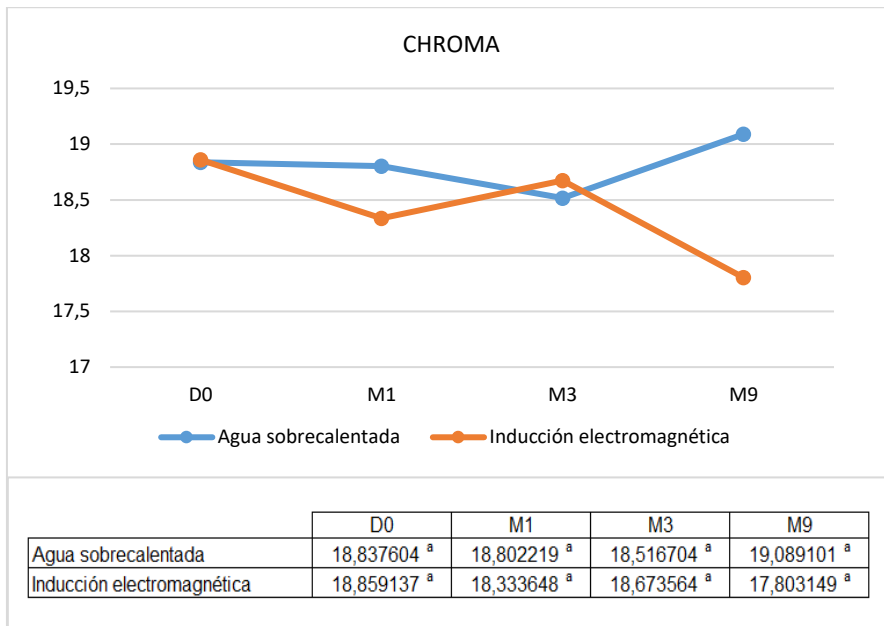


Figura 58. Evolución del tono o CHROMA de las muestras esterilizadas de cardo.

6.2.4 Análisis sensorial

Las muestras de cardo a analizar fueron codificadas con números de 3 dígitos al azar. En este caso, la muestra tratada por lluvia de agua sobrecalentada (convencional) fue la 130 y la tratada mediante inducción electromagnética la 215.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos resumidos en gráficos y tablas. En la Figura 59 se presentan las medias obtenidas para cada uno de los atributos valorados por los catadores expertos en un gráfico de arañas.

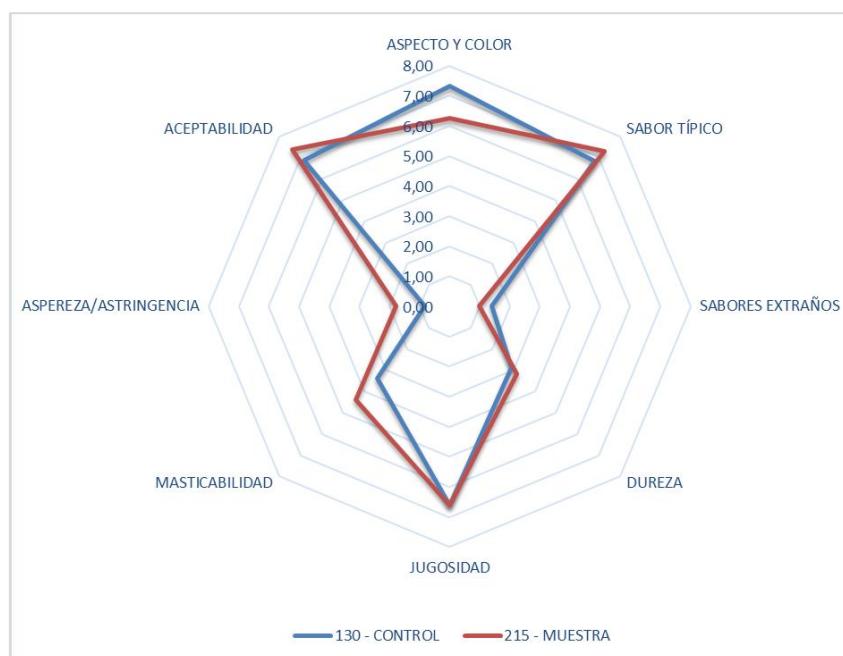


Figura 59. Puntuación media de los atributos del cardo valorado por los catadores.

Visualmente, las valoraciones presentan leves diferencias. Tras realizar el tratamiento de datos y analizar estadísticamente los resultados, el estudio muestra que no existen diferencias significativas en ninguno de los parámetros descriptivos valorados por los catadores (Tabla 11).

Tabla 11. Valores medios de los atributos valorados del cardo. Diferente letra en la misma fila indica diferencias significativas al 95% de confianza.

	130 CONVENCIONAL	215 INDUCCIÓN	Significativo
ASPECTO Y COLOR	7,333 a	6,250 a	No
SABOR TÍPICO	6,816 a	7,285 a	No
SABORES EXTRAÑOS	1,391 a	0,973 a	No
DUREZA	2,889 a	3,158 a	No
JUGOSIDAD	6,623 a	6,601 a	No
MASTICABILIDAD	3,405 a	4,401 a	No
ASPEREZA/ASTRINGENCIA	0,839 a	1,771 a	No
ACEPTABILIDAD	6,863 a	7,375 a	No

Sin embargo, en la parte comparativa de la cata donde se hace elegir al catador por una de las dos muestras en función del atributo a estudiar, se puede observar cómo la tendencia es clara (Figura 60). El 87,5% de los catadores creen que la muestra 215 (inducción electromagnética) tiene mejor color que la 130 (convencional), y el 100% de los catadores consideran que tiene mejor sabor y textura.

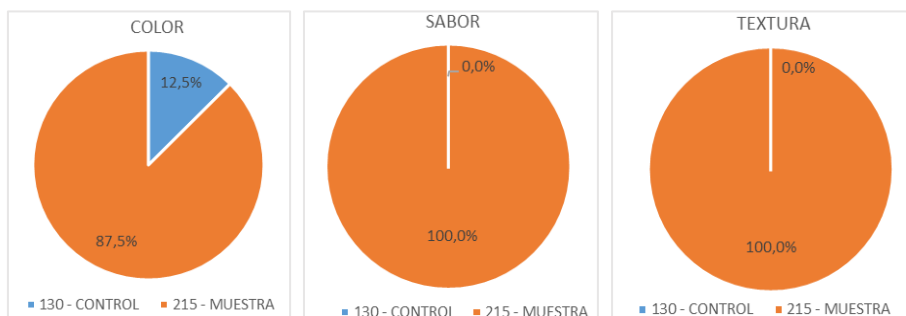


Figura 60. Resultados del análisis comparativo entre las muestras de cardo.

Este comportamiento del consumidor es uno de los factores más importantes de cara a desarrollar e invertir en nuevas tecnologías, ya que la opinión del cliente sobre el producto es muy importante para estimar los éxitos en el lineal.

6.3 Esterilización de champiñón enlatado

6.3.1 Curvas de temperatura del tratamiento de esterilización

En primer lugar, se realiza el tratamiento térmico de esterilización del champiñón enlatado tomando como referencia las condiciones de procesado industriales. Las condiciones pueden consultarse en la Tabla 12.

Tabla 12. Condiciones industriales de esterilización de champiñón enlatado.

Tiempo	Temperatura	Presión
20min	121°C	2,1bar
15min	121°C	2,1bar
30min	60°C	1,2bar
20min	30°C	1,2bar

Así pues, una vez obtenida la curva de tratamiento registrada con ayuda de las sondas Ellab, colocadas en el centro térmico del envase, se calcula la intensidad de esterilización (F_0), tomando como referencia los valores de termodestrucción de *Clostridium botulinum* (T^a ref = 121,1°C y $z = 10$). En este caso, se consigue alcanzar los 120°C, obteniendo una F_0 de 11,5 aproximadamente (Figura 61). En el estudio de Calix Lara (2005), realizaron un proceso a menor temperatura (110°C), pero con una etapa de mantenimiento más larga (35min), con la problemática de exponer al producto a altas temperaturas durante más tiempo, provocando así un mayor deterioro de la calidad final del producto. En el caso de Lespinard y Mascheroni (2010) donde realizaron una simulación del tratamiento térmico del champiñón en conserva,

sometieron el producto a 118°C , consiguiendo una intensidad de esterilización de 8.

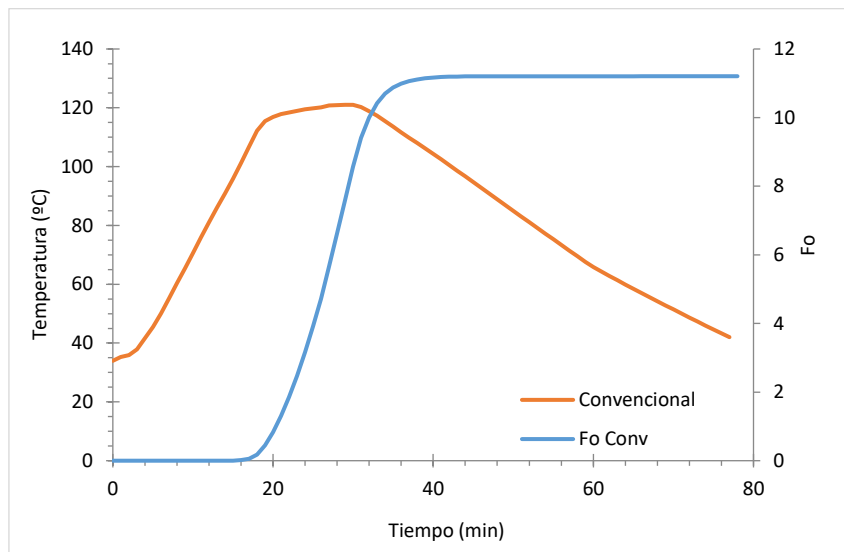


Figura 61. Curva de temperatura del tratamiento del proceso de esterilización convencional del champiñón enlatado.

Una vez conocida la intensidad del proceso de esterilización por lluvia de agua sobrecalentada, se optimiza y ajusta el tratamiento térmico por inducción electromagnética para conseguir un tratamiento de igual intensidad. El tratamiento escogido para los ensayos de vida útil es a potencia alta (650W), con una velocidad de rotación media (6 rpm), consigna de temperatura de mantenimiento de 125°C durante 3min 30s a una potencia del 75%. De este modo, se consigue de nuevo una F_0 de 10,5 superando incluso los 125°C en el interior del producto durante unos segundos (Figura 62).

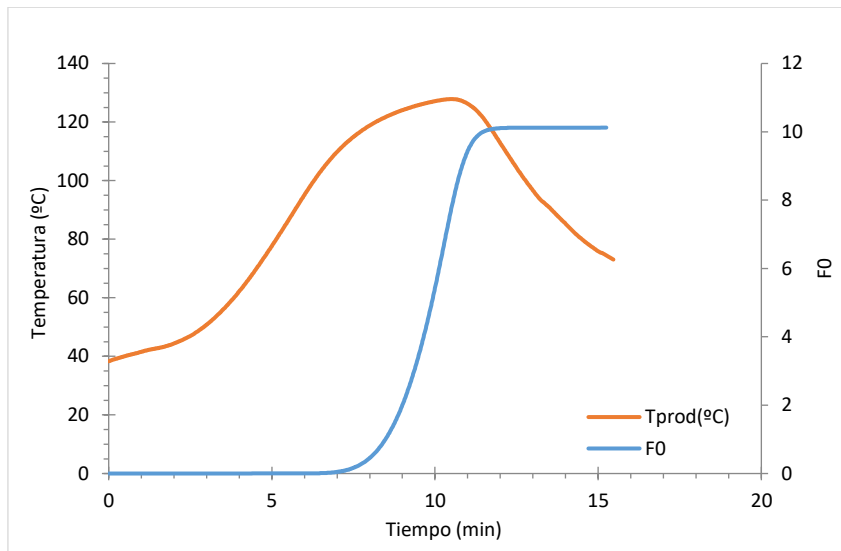


Figura 62. Curva de temperatura del tratamiento del proceso de esterilización por inducción electromagnética del champiñón.

En la Figura 63 se pueden observar las dos curvas de tratamiento térmico y sus intensidades de esterilización. Por un lado, si se comparan las curvas de penetración podemos observar cómo la temperatura alcanzada no es la misma.

En el ciclo de esterilización mediante lluvia de agua sobrecalentada, la temperatura alcanzada es de 120°C aproximadamente, mientras que en el de inducción electromagnética, es de casi 130°C. Esta diferencia conlleva una disminución en el tiempo de mantenimiento, reduciendo así dicho tiempo de 15min a 3min.

Además, se puede apreciar cómo, aun siendo la temperatura alcanzada mayor mediante inducción electromagnética, el tiempo necesario en alcanzar dicha temperatura es de 10 minutos, la mitad que el necesario para alcanzar los 120°C mediante el método convencional.

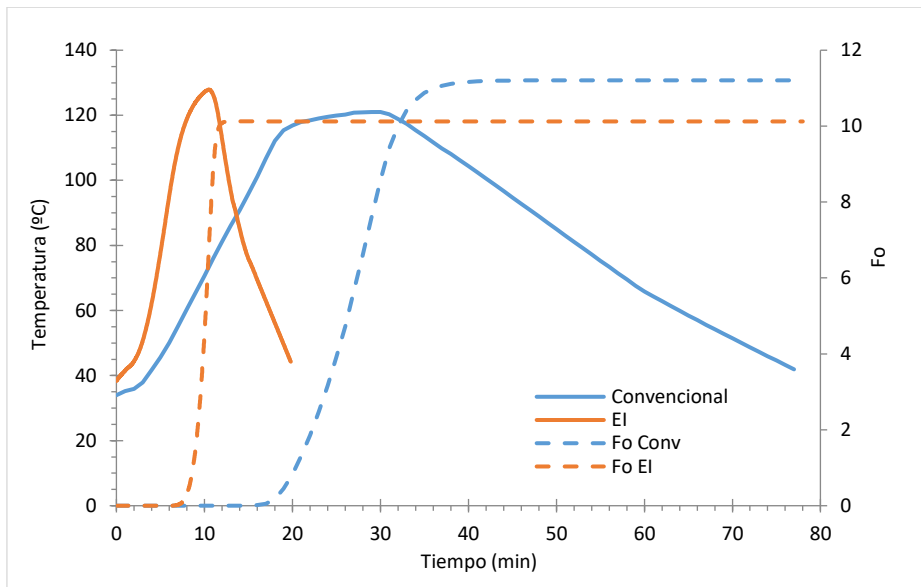


Figura 63. Tratamientos térmicos del proceso de esterilización convencional y por IE de champiñón.

Esta diferencia concluye en que el tiempo de esterilización por inducción electromagnética es de 15 min, mientras que el de esterilización por lluvia de agua es de 80. Esto supone una reducción del casi 80% en el tiempo de procesado, por lo que los costes energéticos son mucho menores, además de respetar la calidad organoléptica y la estructura del producto, como se verá en los siguientes apartados.

Con el objetivo de comparar de manera más sencilla los tratamientos, en la Figura 64 se presentan las pendientes de calentamiento y sus ecuaciones. El tratamiento basado en el calentamiento por lluvia de agua sobrecalentada, tiene una pendiente de calentamiento que se rige por la ecuación $y=5,0064x+35,962$. Esto indica que el calentamiento se produce a una velocidad de 5°C/min. Sin embargo, la ecuación que explica el calentamiento basado en inducción electromagnética es $y=14,792x+48,83$ es decir, una velocidad de calentamiento de 14,80°C/min. En el caso de la esterilización de champiñón

embotado realizado por Lespnard y Mascheroni (2010), consiguieron una pendiente de calentamiento de 3°C/min aproximadamente.

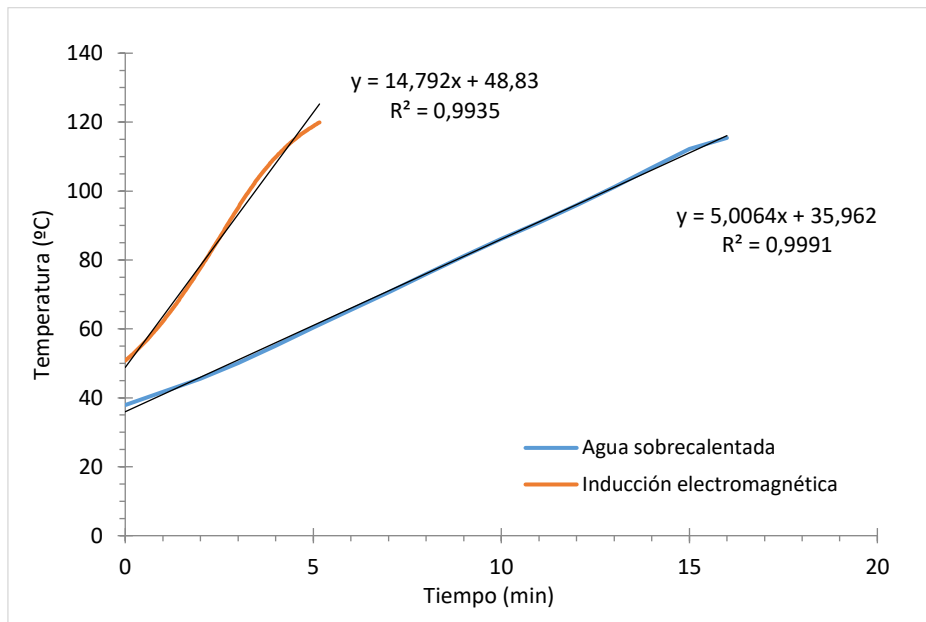


Figura 64. Pendientes de calentamiento de las muestras de champiñón esterilizadas con agua sobrecalentada e inducción electromagnética.

Resumiendo, la tecnología de inducción electromagnética aumenta 10°C/min la pendiente de calentamiento respecto al tratamiento convencional en el proceso de esterilización, reduciendo un 80% el tiempo total de procesado.

6.3.2 Análisis microbiológico. Test de estabilidad de conservas











Una vez esterilizado el producto con las dos tecnologías, se realizó el test de estabilidad de conservas para comprobar el efecto de la esterilización sobre los microorganismos. En ambos casos, todos los resultados fueron satisfactorios, presentando valores en todos los análisis por debajo de los límites de detección.

6.3.3 *Caracterización fisicoquímica.*

En primer lugar, es muy importante valorar la apreciación visual del producto una vez abierto el envase y conocer su evolución durante los meses de estudio. Así pues, a continuación, en la Tabla 13 se pueden observar las imágenes de champiñón esterilizado por lluvia de agua sobrecalentada y por inducción electromagnética a día 0, mes 1, mes 3, mes 6 y mes 9.

Si se observan las imágenes, se puede comprobar cómo a día 0 se aprecia una diferencia visual, presentando un color más claro los champiñones esterilizados mediante inducción electromagnética. Conforme pasan los meses, esta diferencia visual se ve reducida, llegando a tener un color similar a los 9 meses.

Tabla 13. Seguimiento visual de las muestras de champiñón enlatado durante 9 meses de almacenamiento.

	TRATAMIENTO CONVENCIONAL	INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA
DÍA 0		
MES 1		
MES 3		
MES 6		
MES 9		

Sin embargo, si se observa el estado físico de los champiñones, se puede apreciar una gran diferencia (Figura 65). El champiñón de la izquierda se corresponde con el tratado mediante lluvia de agua sobrecalentada y presenta el velo abierto y deteriorado. Por otro lado, a la izquierda se encuentra el champiñón esterilizado por inducción electromagnética y en este caso, el velo está totalmente cerrado. Este hecho es un factor muy importante ya que el estado del velo es uno de los atributos valorados por el consumidor (Calix Lara, 2005).



Figura 65. Estado del velo del champiñón esterilizado.

Por otro lado, se han calculado las mermas del champiñón, con el objetivo de comparar las diferencias entre el tratamiento y ver si reducimos la pérdida de peso del champiñón. Así pues, en la Figura 66, se puede observar cómo las mermas del champiñón tratado por inducción electromagnética son inferiores que en el tratado por lluvia de agua sobrecalentada, reduciéndose de un 14-16% a un 12-14%, es decir, un 2% del peso. Además, el estudio estadístico de los datos muestra cómo existen diferencias significativas en todos los puntos de análisis, por lo que se puede confirmar que el proceso de esterilización por

inducción electromagnética reduce las mermas del producto final. Esta reducción del 2% puede suponer un gran impacto económico en la empresa, ya que estaría produciendo un 2% más de champiñón en conserva partiendo de la misma cantidad de materia prima.

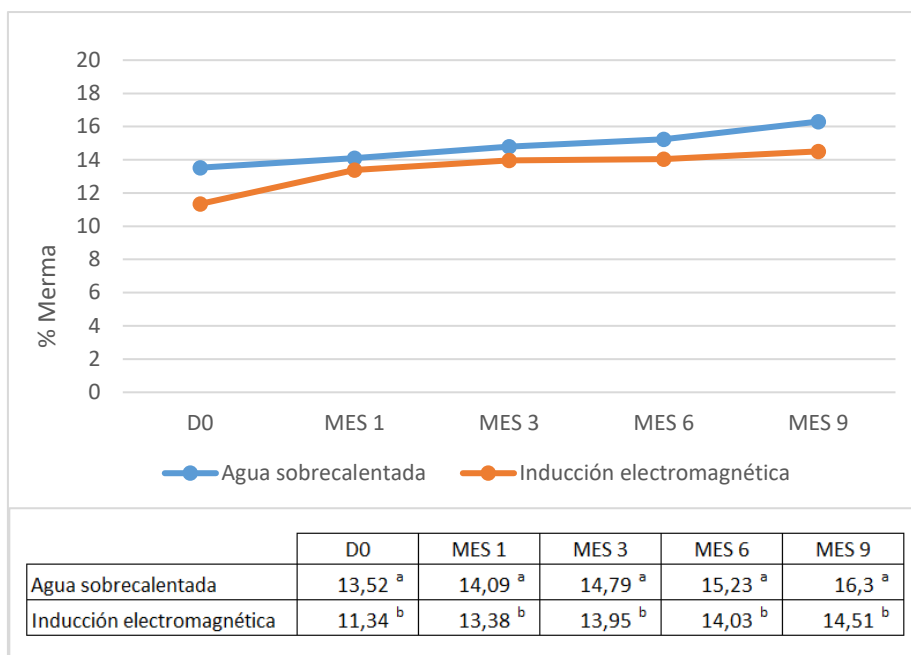


Figura 66. Evolución de las mermas de las muestras de champiñón durante 9 meses de almacenamiento.

Textura

A continuación, en el diagrama de barras de la Figura 67 se presentan los valores medios y desviaciones del análisis de textura de los champiñones esterilizados a lo largo de 9 meses de almacenamiento.

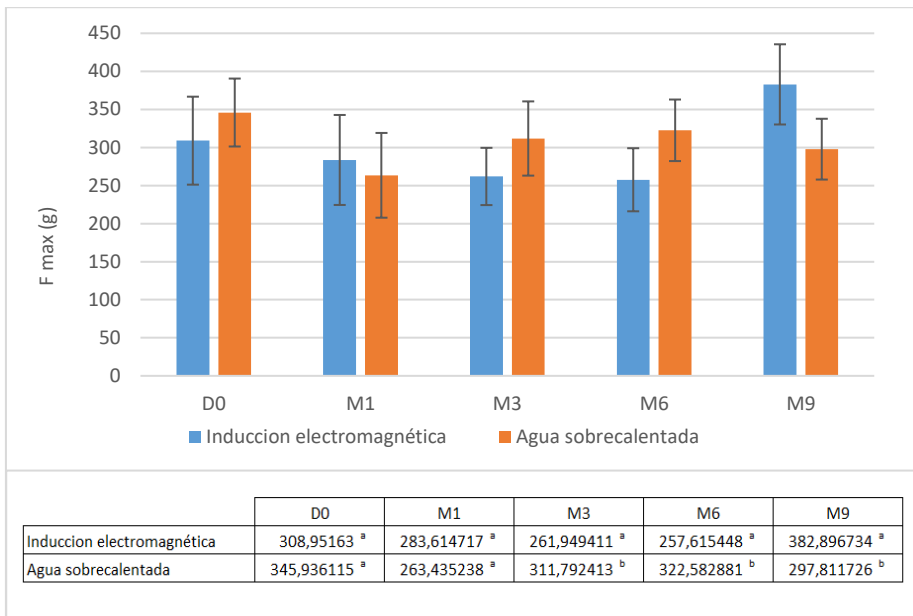


Figura 67. Fuerza máxima necesaria (g) para romper la capa externa del champiñón esterilizado.

A simple vista, se puede apreciar cómo los valores obtenidos tras los ensayos de penetración son similares para los dos tratamientos. Al realizar el análisis estadístico de los datos, se puede comprobar cómo a día 0 y mes 1, las muestras no presentan diferencias significativas. Sin embargo, a partir de ese momento, las muestras sí que son diferentes con un intervalo de confianza del 95%. En los meses 3 y 6, la muestra tratada por inducción electromagnética presenta valores inferiores de fuerza, mientras que en el mes 9 ocurre lo contrario.

Si se observa la gráfica, se puede comprobar cómo las desviaciones de cada muestra son elevadas, por lo que, aunque estadísticamente existan diferencias significativas, podemos omitir estas diferencias y asumir que las muestras son similares.

Color

En cuanto al color, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para los parámetros L^* , a^* y b^* a lo largo del tiempo (Figuras 68, 69 y 70), así como el ángulo HUE y el CHROMA de cada muestra (Figuras 72 y 73).

La coordenada L^* (Figura 68) describe la luminosidad de la muestra en un intervalo de 0 a 100 (negro a blanco respectivamente). Durante los 9 meses de almacenamiento analizados, la muestra tratada por inducción electromagnética presenta mayor luminosidad que la tratada con agua sobrecalentada. Al realizar el tratamiento estadístico de los datos, solo existen diferencias significativas en los puntos de muestreo MES 1 y MES 3, con un intervalo de confianza del 95%.

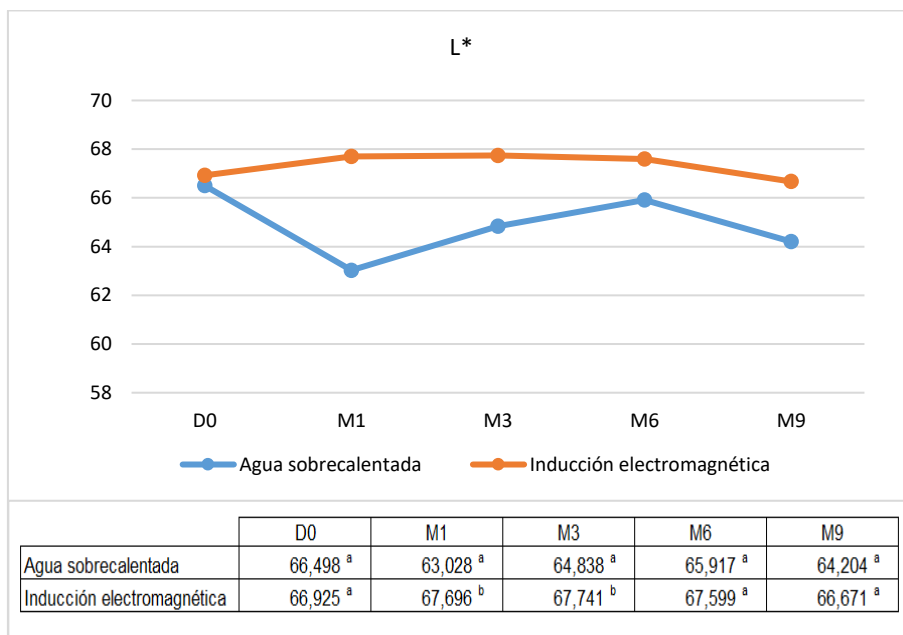


Figura 68. Evolución de la luminosidad del champiñón esterilizado.

En cuanto a la coordenada a^* explica la tendencia verde-rojo de la muestra. En la Figura 69 se puede observar cómo el champiñón tratado mediante inducción

electromagnética presenta un valor de a^* inferior, indicando que tiene tonos menos rojizos que la tratada con agua sobrecalentada. Tras realizar el estudio estadístico correspondiente a dicho parámetro se ha comprobado que dichas diferencias son significativas en todos los puntos de muestreo, con un nivel de confianza del 95%.

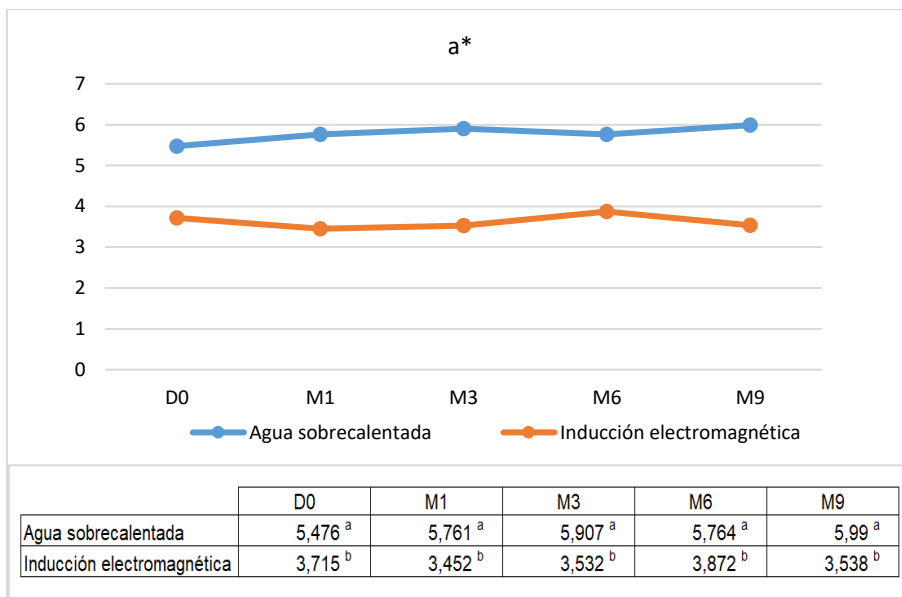


Figura 69. Evolución de la coordenada a^* del champiñón esterilizado.

Por último, la coordenada b^* (Figura 69) explica la tendencia azul-amarillo. En este caso, excepto para el punto de análisis MES 3, existen diferencias significativas entre las muestras. Sin embargo, en unos casos es mayor el valor de b^* en la muestra tratada por inducción electromagnética y en otros al revés. Este hecho es debido a que la muestra de inducción electromagnética presenta una evolución constante y lineal, mientras que la convencional presenta picos a lo largo de los 9 meses.

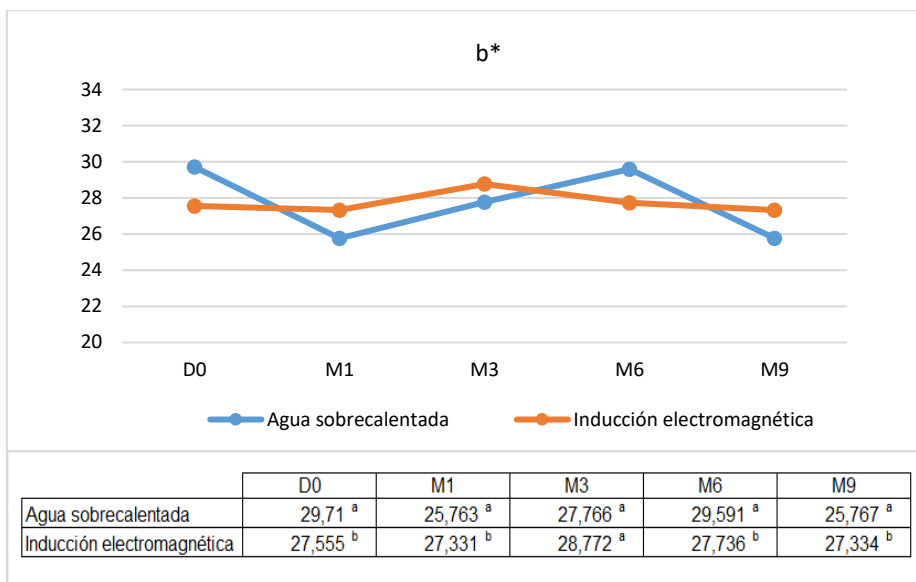


Figura 70. Evolución coordinada b^* de las muestras de champiñón esterilizadas.

Con el objetivo de observar de manera más visual las coordenadas a^* y b^* y su disposición en el espectro de colores, en la Figura 71 se encuentran representados los valores de cada muestra.

Así pues, se puede observar cómo las muestras tratadas por lluvia de agua sobrecalentada se encuentran colocadas más a la derecha que las tratadas por agua sobrecalentada, es decir, más cerca de colores rojizos. Esta disposición explica las diferencias significativas mencionadas anteriormente para la coordenada a^* .

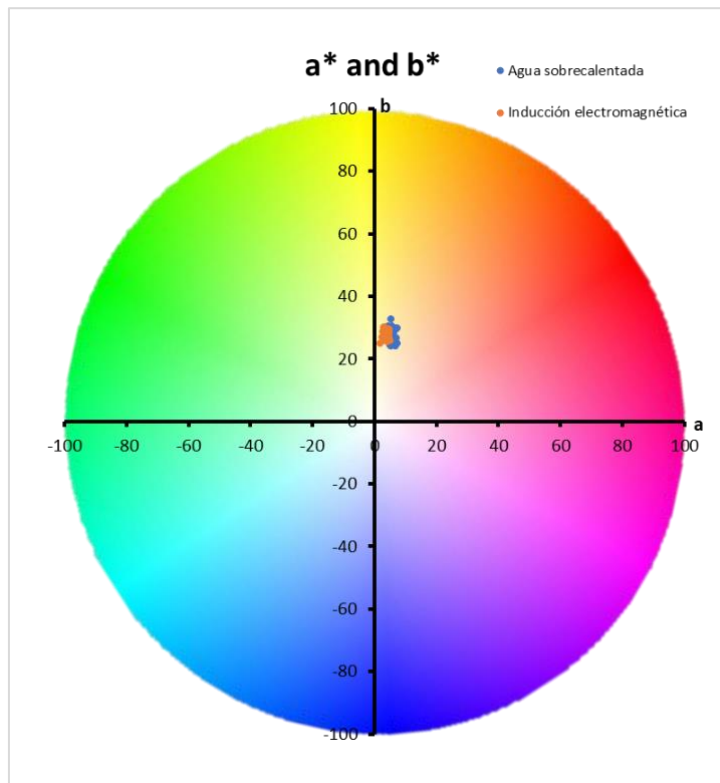


Figura 71. Disposición de las coordenadas a^* y b^* de las muestras de champiñón esterilizadas.

Por otro lado, se ha calculado el ángulo HUE, estudiando así la relación de a^* y b^* de las muestras. En la Figura 72 se puede observar cómo la muestra tratada por lluvia de agua sobrecalentada presenta un menor ángulo que la tratada por inducción, indicando tonos más rojizos. Las muestras presentan diferencias significativas en todos los puntos de muestreo, con un nivel de confianza del 95%. De nuevo, al igual que en el resto de productos, se puede apreciar como la exposición del producto a altas temperaturas durante mayor tiempo, degrada el color hacia tonos rojizos debido al pardeamiento (Canjura et al., 1991; Weemaes et al., 1999).

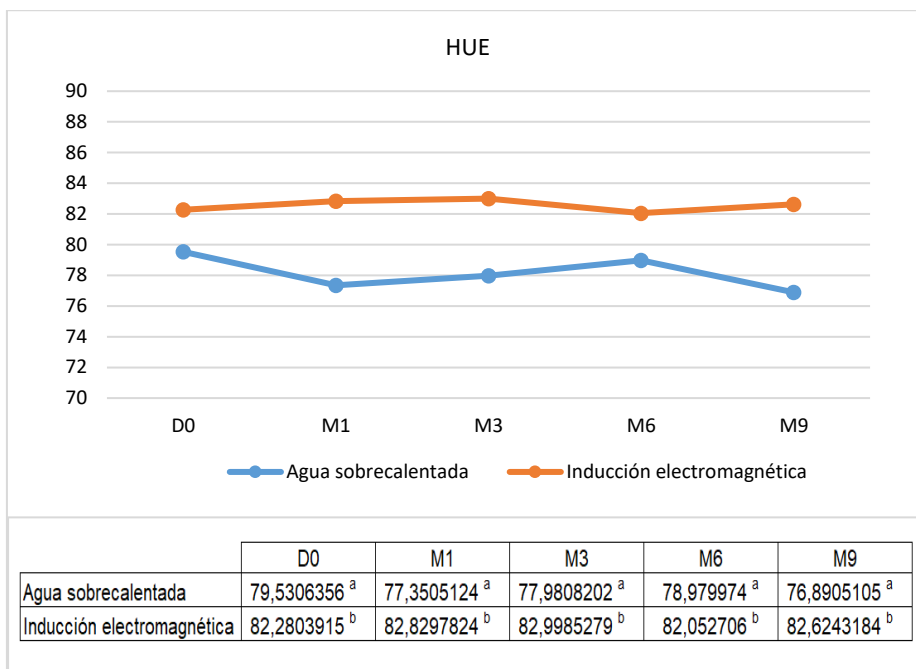


Figura 72. Evolución del Angulo HUE o tono de las muestras de champiñón esterilizadas.

Por último, se ha calculado la intensidad de color, es decir, el CHROMA (Figura 73), a través del cual se calcula la distancia del color de la muestra al origen (blanco absoluto). En este caso, se puede observar cómo se replica el mismo comportamiento que en el caso de la coordenada b* debido a la inestabilidad de las muestras tratadas mediante lluvia de agua sobrecalentada.

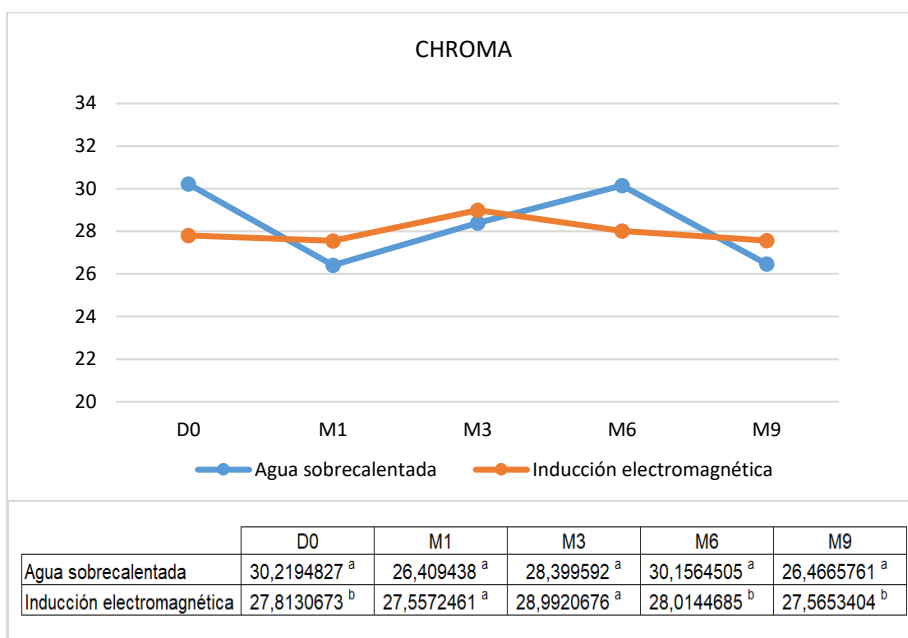


Figura 73. Evolución del CHROMA o intensidad de color de las muestras de champiñón esterilizadas.

En resumen, a través del análisis instrumental del color se ha comprobado cómo las muestras de champiñón esterilizadas por el método convencional presentan tonos más rojizos o pardos que las tratadas por inducción electromagnética.

6.3.4 Análisis sensorial

Las muestras de champiñón a analizar fueron codificadas con números de 3 dígitos al azar. En este caso, la muestra tratada por lluvia de agua sobrecalentada (convencional) fue la 589 y la tratada mediante inducción electromagnética la 660.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos resumidos en gráficos y tablas. En la figura 74 se presentan las medias obtenidas para cada uno de los atributos valorados por los catadores expertos en un gráfico de arañas.

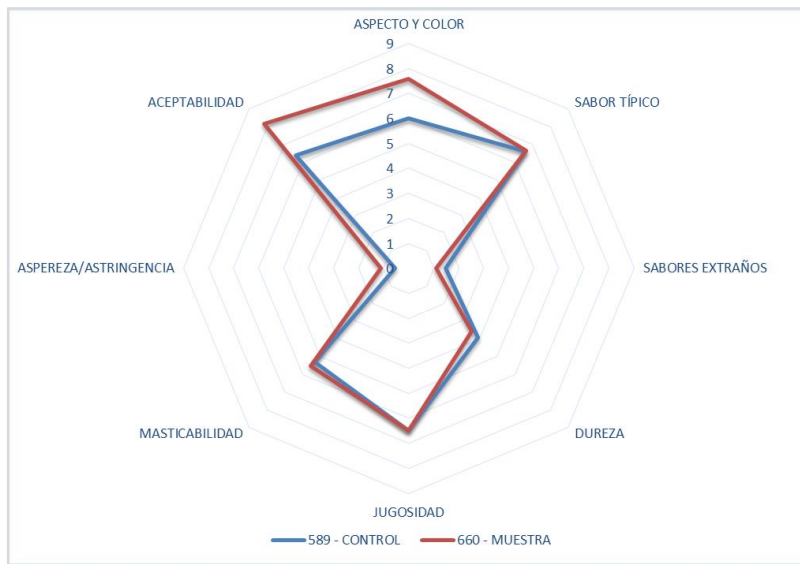


Figura 74. Puntuación media de los atributos del champiñón valorados por los catadores.

Visualmente, las valoraciones son bastante similares, excepto para los atributos “ACEPTABILIDAD” y “ASPECTO Y COLOR”, en las cuales la muestra 660 (IE) presenta una mayor puntuación que la convencional. Tras realizar el tratamiento de datos y analizar estadísticamente los resultados, el estudio muestra que no existen diferencias significativas en ninguno de los parámetros descriptivos valorados por los catadores, excepto en el aspecto y color, y la aceptabilidad (Tabla 14). Este aspecto es favorable para la tecnología de inducción electromagnética ya que se mantienen los atributos sensoriales del producto convencional, mejorando el aspecto y el color, haciéndolo así un producto con más aceptabilidad.

Tabla 14. Valores medios de los atributos valorados del champiñón. Diferente letra en la misma fila indica diferencias significativas al 95% de confianza.

	589 - CONTROL	660 - MUESTRA	Significativo
ASPECTO Y COLOR	6,000 b	7,575 a	Sí
SABOR TÍPICO	6,606 a	6,645 a	No
SABORES EXTRAÑOS	1,469 a	1,105 a	No
DUREZA	3,903 a	3,555 a	No
JUGOSIDAD	6,498 a	6,479 a	No
MASTICABILIDAD	5,298 a	5,524 a	No
ASPEREZA/ ASTRINGENCIA	0,538 a	1,113 a	No
ACEPTABILIDAD	6,375 b	8,175 a	Sí

Sin embargo, en la parte comparativa de la cata donde se hace elegir al catador por una de las dos muestras en función del atributo a estudiar (Figura 75), se puede observar cómo la mitad de los catadores creen que la muestra 589 es mejor que la 660 en cuanto a color y sabor y la otra mitad, al contrario. Por último, el 75% de los catadores consideran que el champiñón tratado por inducción electromagnética tiene mejor textura que el convencional.

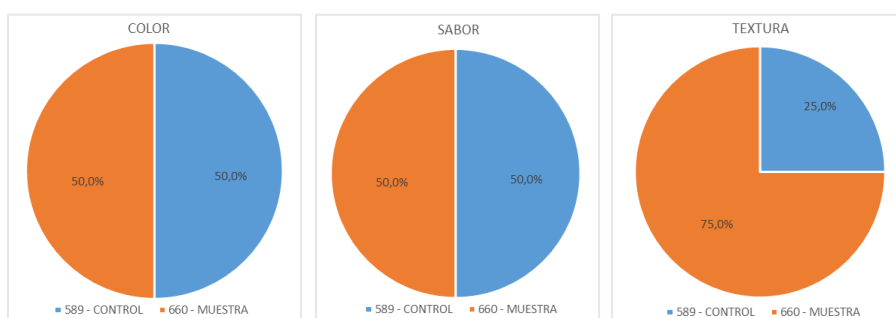


Figura 75. Resultados del análisis comparativo entre las muestras de champiñón.

Este comportamiento del consumidor es uno de los factores más importantes de cara a desarrollar e invertir en nuevas tecnologías, ya que la opinión del cliente sobre el producto es muy importante para estimar los éxitos en el lineal.

6.4 Esterilización de alubia blanca enlatada

6.4.1 Curvas de temperatura del tratamiento de esterilización

En primer lugar, se realiza el tratamiento térmico de esterilización de alubia blanca enlatada tomando como referencia las condiciones de procesado industriales. Las condiciones pueden consultarse en la Tabla 15.

Tabla 15. Condiciones del proceso de esterilización industrial de alubia blanca enlatada.

Tiempo	Temperatura	Presión
20min	118°C	2,1bar
22min	118°C	2,1bar
30min	60°C	1,2bar
20min	30°C	1,2bar

Así pues, una vez obtenida la curva de tratamiento registrada con ayuda de las sondas Ellab colocadas en el centro térmico del envase, se calcula la intensidad de esterilización (F_0), tomando como referencia los valores de termodestrucción de *Clostridium botulinum* (T^a ref = 121,1°C y $z = 10$). En este caso, se consigue alcanzar 118°C, obteniendo una F_0 de 12 aproximadamente (Figura 76). En el estudio de Urtasun Pascual (2016) estudiaron el efecto de la rotación sobre la intensidad de esterilización y obtuvieron una F_0 de 18 y 21 trabajando en estático y en rotación a 6rpm. Esta

diferencia no es tan llamativa como en otros casos, ya que la alubia blanca es un producto pequeño, con líquido de gobierno acuoso, por lo que la transferencia de calor es rápida (Berry et al., 1985; Berry & Kohnhorst, 1985).

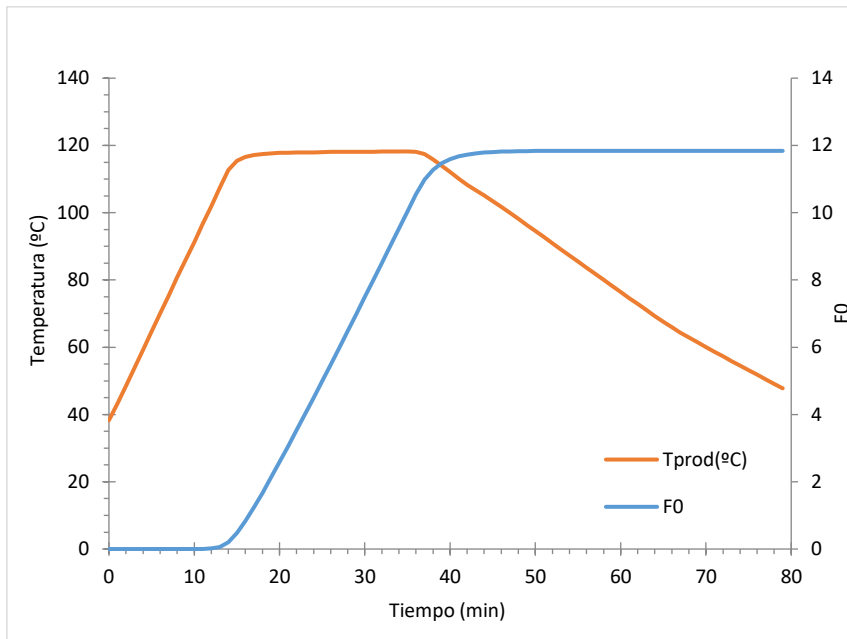


Figura 76. Curva de temperatura del tratamiento de esterilización convencional por lluvia de agua sobrecalentada de alubia blanca enlatada.

Una vez conocida la intensidad del proceso de esterilización por lluvia de agua sobrecalentada, se optimiza y ajusta el tratamiento térmico por inducción electromagnética para conseguir un tratamiento de igual intensidad. El tratamiento escogido para los ensayos de vida útil es a potencia alta (650W), con una velocidad de rotación media (6 rpm), consigna de temperatura de mantenimiento de 128°C durante 1min 30s a una potencia del 75%. De este modo, se consigue una F₀ de 11 superando incluso los 130°C en el interior del producto durante unos segundos (Figura 77).

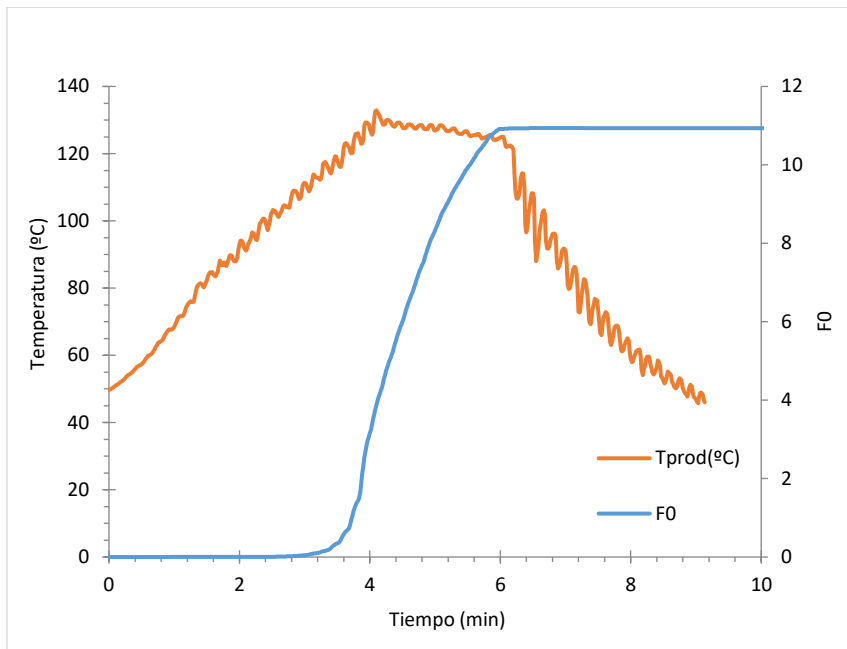


Figura 77. Curva de temperatura del tratamiento de esterilización por inducción electromagnética de alubia blanca enlatada.

En la Figura 78 se pueden observar las dos curvas de tratamiento térmico y sus intensidades de esterilización. Por un lado, si se comparan las curvas de penetración, se puede observar cómo la temperatura alcanzada no es la misma. En el ciclo de esterilización mediante lluvia de agua sobrecalentada la temperatura alcanzada es de 120°C aproximadamente, mientras que en el de inducción electromagnética es de 130°C. Esta diferencia conlleva una disminución en el tiempo de mantenimiento, reduciendo así dicho tiempo de 22 min a 1,5 min. Además, se puede apreciar cómo, aun siendo la temperatura alcanzada mayor mediante inducción electromagnética, el tiempo necesario en alcanzar dicha temperatura es de 4 minutos, la tercera parte que el necesario para alcanzar los 120°C mediante el método convencional.

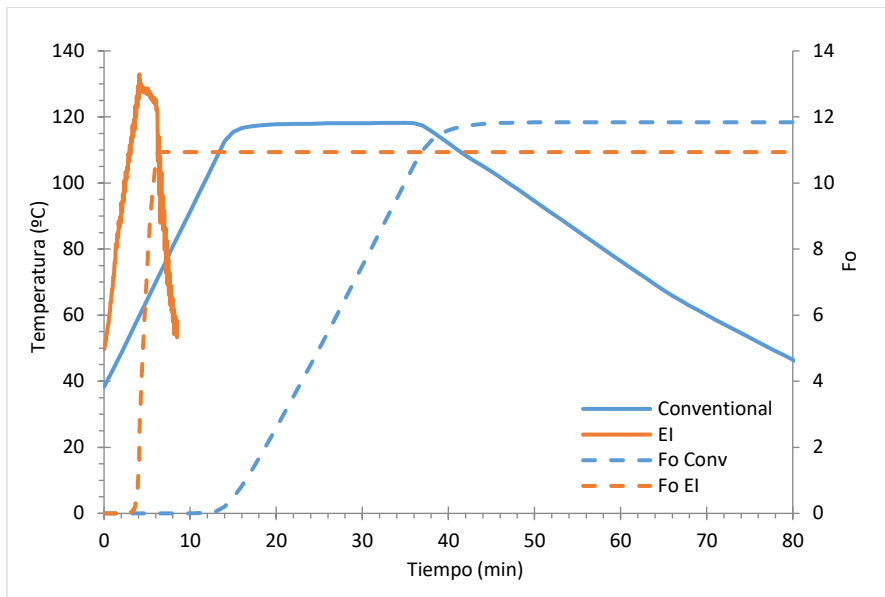


Figura 78. Curvas de tratamiento de esterilización convencional y por IE de alubia blanca enlatada.

Esta diferencia concluye en que el tiempo de esterilización por inducción electromagnética es de 10 min, mientras que el de esterilización por lluvia de agua es de 80. Esto supone una reducción del casi 90% en el tiempo de procesado, por lo que los costes energéticos son mucho menores, además de respetar la calidad organoléptica y la estructura del producto, como veremos en los siguientes apartados.

Con el objetivo de comparar de manera más sencilla los tratamientos, en la gráfica 79 se presentan las pendientes de calentamiento y sus ecuaciones. El tratamiento basado en el calentamiento por lluvia de agua sobrecalentada tiene una pendiente de calentamiento que se rige por la ecuación $y=5,3325x+37,993$. Esto indica que el calentamiento se produce a una velocidad de $5,33^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Sin embargo, la ecuación que explica el calentamiento basado en inducción electromagnética es $y=19,953x+49,836$ es decir, una velocidad de calentamiento de casi $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$. En el trabajo realizado por Alcívar Castillo,

(2012) estudiaron la penetración de calor en el proceso de esterilización de frejoles, donde para una misma intensidad de esterilización (7), consiguieron reducir el tiempo de mantenimiento de 40 min (116°C por cargas) a 12 min (121°C en continuo), reduciendo el total del proceso de 65 a 25 respectivamente (60%).

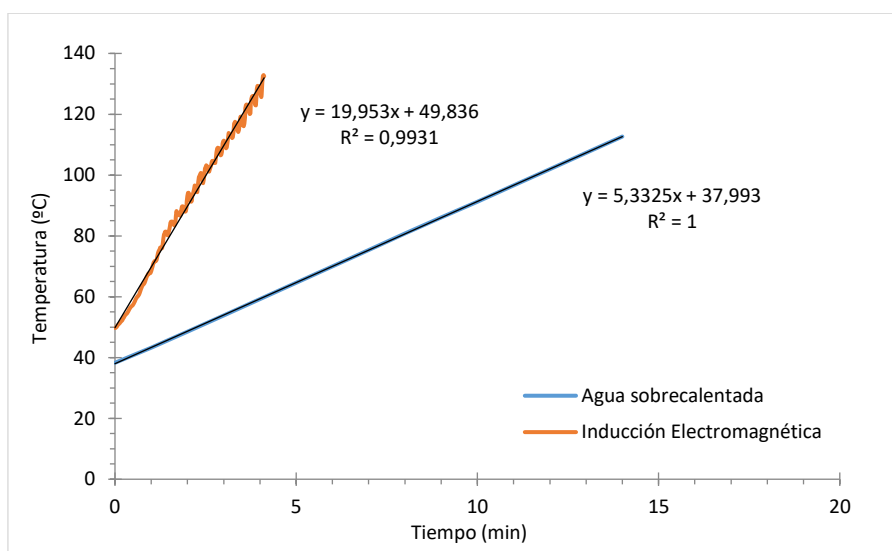


Figura 79. Pendientes de calentamiento de los procesos de esterilización de alubia blanca enlatada.

Resumiendo, la tecnología de inducción electromagnética aumenta 15°C/min la pendiente de calentamiento respecto al tratamiento convencional en el proceso de esterilización, reduciendo casi un 90% el tiempo total de procesado.

6.4.2 Análisis microbiológico. Test de estabilidad de conservas

Una vez esterilizado el producto con las dos tecnologías, se realizó el test de estabilidad de conservas para comprobar el efecto de la esterilización sobre los microorganismos. En ambos casos, todos los resultados fueron satisfactorios, presentando valores en todos los análisis por debajo de los límites de detección.











6.4.3 *Caracterización fisicoquímica.*

En primer lugar, es muy importante valorar la apreciación visual del producto una vez abierto el envase y conocer su evolución durante los meses de estudio. Así pues, a continuación, en la Tabla 16 se pueden observar las muestras de alubia blanca esterilizadas por lluvia de agua sobrecalentada y por inducción electromagnética a día 0, mes 1, mes 3, mes 6 y mes 9.

En las imágenes se puede observar claramente cómo la alubia blanca esterilizada por inducción electromagnética presenta un color más blanquecino que la convencional, la cual ha pardeado más con el tratamiento térmico. Además, también se puede apreciar cómo la alubia blanca convencional va apelmazándose conforme pasan los meses de almacenamiento, mientras que la de IE no.

Por otro lado, se ha observado una gran diferencia en la cantidad de líquido de gobierno que queda libre en la lata tras el tratamiento térmico. En la Figura 80 se puede ver la cantidad de líquido de gobierno existente en una lata de alubia blanca esterilizada por el método convencional y por inducción electromagnética.

Tabla 16. Seguimiento visual de las muestras de alubia blanca esterilizadas durante 9 meses de almacenamiento.

	TRATAMIENTO CONVENCIONAL	INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA
DÍA 0		
MES 1		
MES 3		
MES 6		
MES 9		

En este caso, se ha comprobado cómo la alubia durante el proceso de esterilización convencional absorbe mucha mayor cantidad de agua del líquido de gobierno que en el proceso por IE.

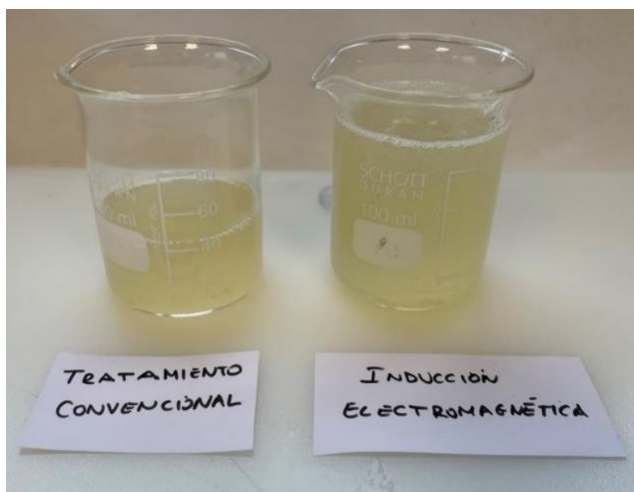


Figura 80. Líquido de gobierno de las muestras de alubia blanca tratadas por el método convencional (izquierda) y por inducción electromagnética (derecha).

Más adelante, en el apartado de Análisis Sensorial, se verán varios aspectos relacionados con este factor comentado.

Textura

A continuación, en el diagrama de barras de la Figura 81 se presentan los valores medios y las desviaciones del análisis de textura de la alubia blanca esterilizada a lo largo de 9 meses de almacenamiento.

A simple vista, se puede observar cómo la diferencia entre las muestras es clara. La alubia blanca esterilizada mediante inducción electromagnética necesita mucha más fuerza para ser masticada que la tratada por el método convencional. Esta diferencia queda explicada a través del estudio estadístico,

el cual afirma las diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% entre las dos muestras a lo largo de los 9 meses de almacenamiento.

Esta diferencia entre las muestras puede favorecer o no la calidad del producto final, ya que conlleva que el producto esté menos cocinado. Este aspecto se valorará más adelante en el apartado de Análisis Sensorial.

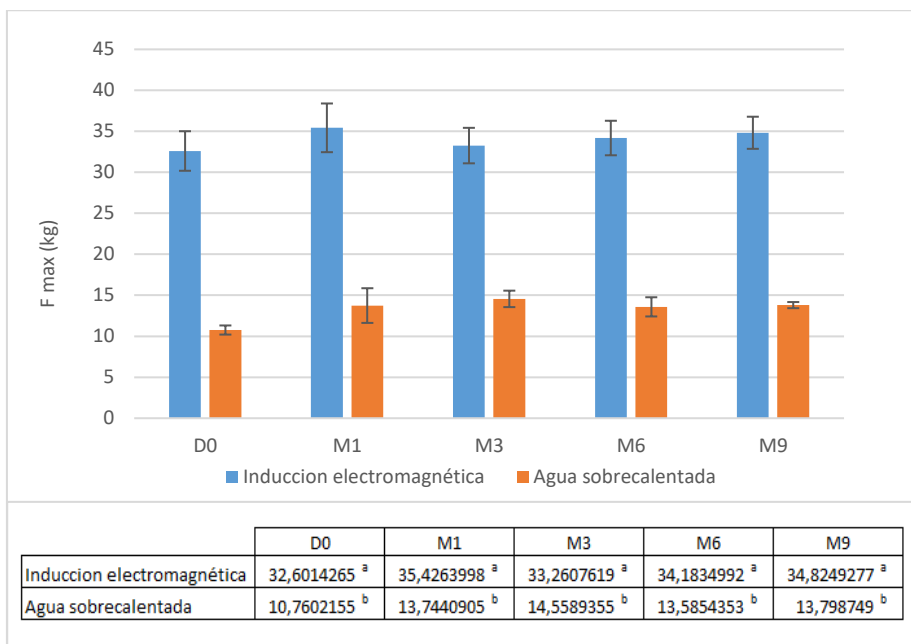


Figura 81. Fuerza máxima necesaria (kg) para “masticar” las muestras de alubia blanca esterilizadas. Distinta letra en la misma columna indica diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%.

Color

En cuanto al color, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para los parámetros L^* , a^* y b^* a lo largo del tiempo, así como el índice de blanqueamiento (IB), el tono (ángulo HUE) y la intensidad del color (CHROMA) de cada muestra.

La coordenada L^* (Figura 82) describe la luminosidad de la muestra. Durante los 9 meses de almacenamiento analizados, la muestra tratada por inducción electromagnética presenta mayor luminosidad que la tratada con agua sobrecalentada. Al realizar el tratamiento estadístico de los datos, solo existen diferencias significativas en el día 0. Tras este punto, la luminosidad de las muestras se iguala sin presentar diferencias significativas con un intervalo de confianza del 95%.

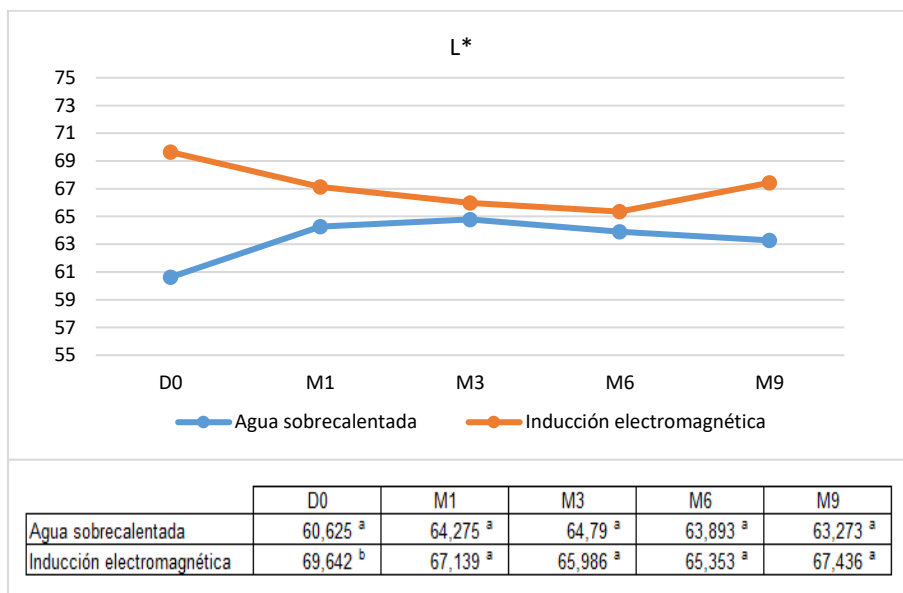


Figura 82. Evolución de la luminosidad de las muestras de alubia blanca durante el almacenamiento.

En cuanto a la coordenada a^* , explica la tendencia verde-rojo de la muestra. En la Figura 83 se puede observar cómo la alubia blanca tratada mediante lluvia de agua sobrecalentada presenta un valor de a^* superior, indicando que tiene tonos más rojizos que la tratada por inducción electromagnética. Este aspecto indica que el tratamiento de esterilización mediante inducción electromagnética pardea menos el producto blanco, manteniendo mejor el color inicial del producto.

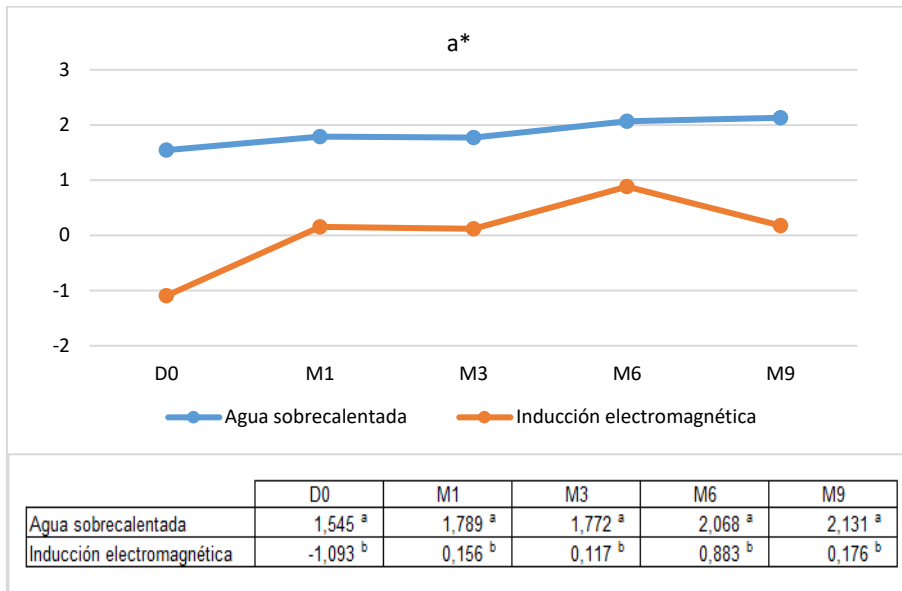


Figura 83. Evolución de la coordenada a^* de las muestras de alubia blanca durante los 9 meses de almacenamiento.

Por último, la coordenada b^* (Figura 84) explica la tendencia azul-amarillo. En este caso, la alubia blanca tratada por el método convencional presenta valores superiores de b^* , indicando así tonos más amarillentos que las tratadas por inducción electromagnética. Al realizar el tratamiento estadístico de los datos, se ha comprobado que existen diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% durante los 9 meses, excepto en el MES 6.

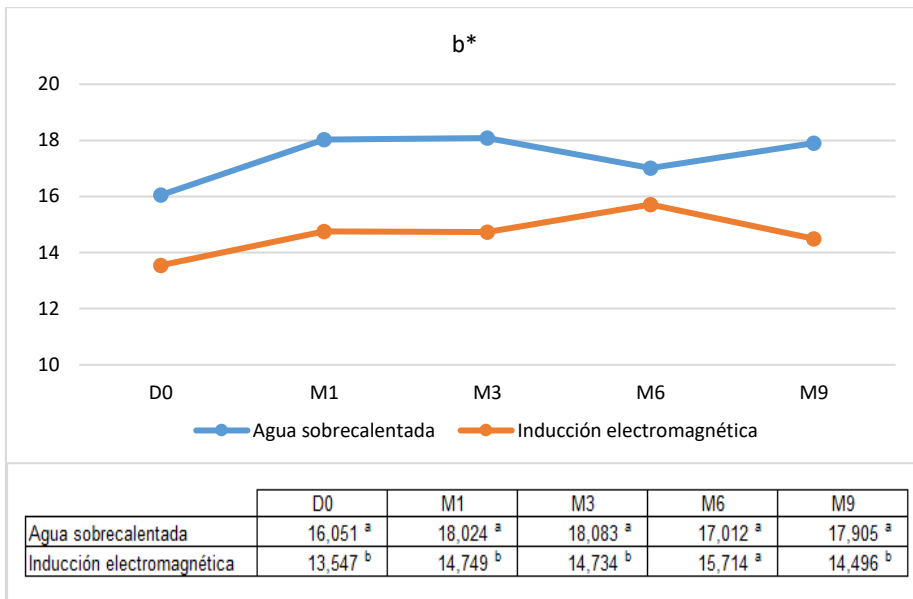


Figura 84. Evolución de la coordenada b^* de las muestras de alubia blanca durante los 9 meses de almacenamiento.

Con el objetivo de observar de manera más visual las coordenadas a^* y b^* y su disposición en el espectro de colores, en la Figura 85 se encuentran representados los valores de cada muestra.

Así pues, se puede observar cómo las muestras tratadas por lluvia de agua sobrecalentada se encuentran colocadas más cercanas al origen que las tratadas por agua sobrecalentada, es decir, más cerca al color blanco como se podrá comprobar a continuación con el CHROMA. Esta disposición explica las diferencias significativas mencionadas anteriormente para la coordenada b^* .

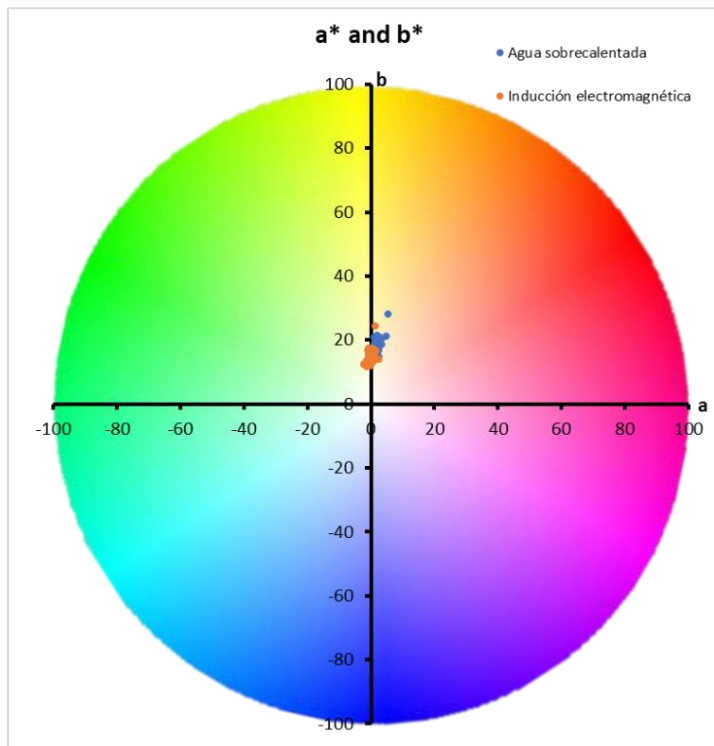


Figura 85. Disposición de las coordenadas a^* y b^* de las muestras de alubia blanca.

Por otro lado, se ha calculado el ángulo HUE, estudiando así la relación de a^* y b^* de las muestras. En la Figura 86 se puede observar cómo la muestra tratada por inducción electromagnética presenta un mayor ángulo que la convencional. Las muestras presentan diferencias significativas en todos los puntos de muestreo excepto en el MES 6 con un nivel de confianza del 95%.

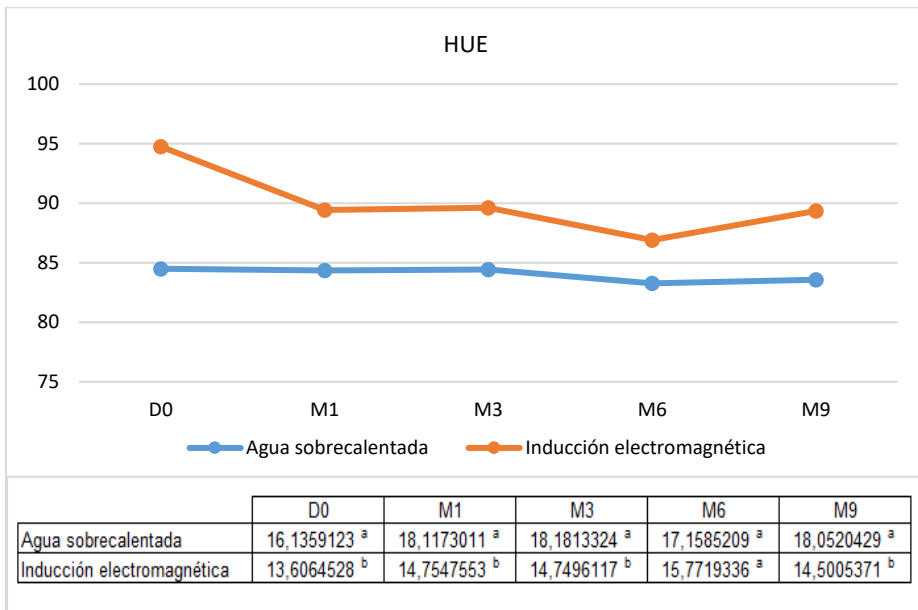


Figura 86. Evolución del tono o ángulo HUE de las muestras de alubia blanca durante el almacenamiento.

En este caso, al tratarse de un producto en el que predomina el color blanco, es importante analizar la intensidad de color o CHROMA, es decir, la distancia del color respecto al origen (blanco absoluto). Así pues, en la Figura 87 se puede observar cómo la intensidad de color de la alubia blanca tratada por inducción electromagnética es menor que la de la convencional, es decir, la distancia a origen es menor. En este caso, es un aspecto positivo para la tecnología de inducción electromagnética, ya que cuanto menos distancia haya al origen, más cercano al color blanco está.

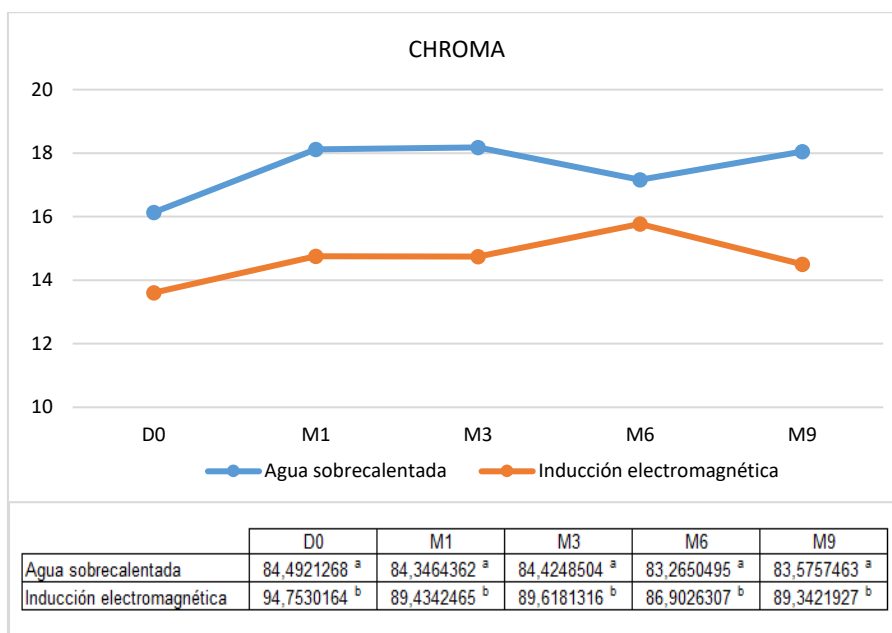


Figura 87. Evolución de la intensidad de color o CHROMA de las muestras de alubia blanca durante el almacenamiento.

Por último, otro parámetro calculado para medir el nivel de color blanco es el índice de blanqueamiento (IB), a través del cual se representa numéricamente cuánto de blanca es una muestra o no. Así pues, en la Figura 88 se puede observar dicho parámetro, donde la alubia blanca tratada por inducción electromagnética presenta mayor índice de blanqueamiento que la convencional, por lo que es más blanquecina. Durante los 9 meses de almacenamiento, las muestras presentan diferencias significativas en todos los puntos de análisis, con un nivel de confianza del 95%.

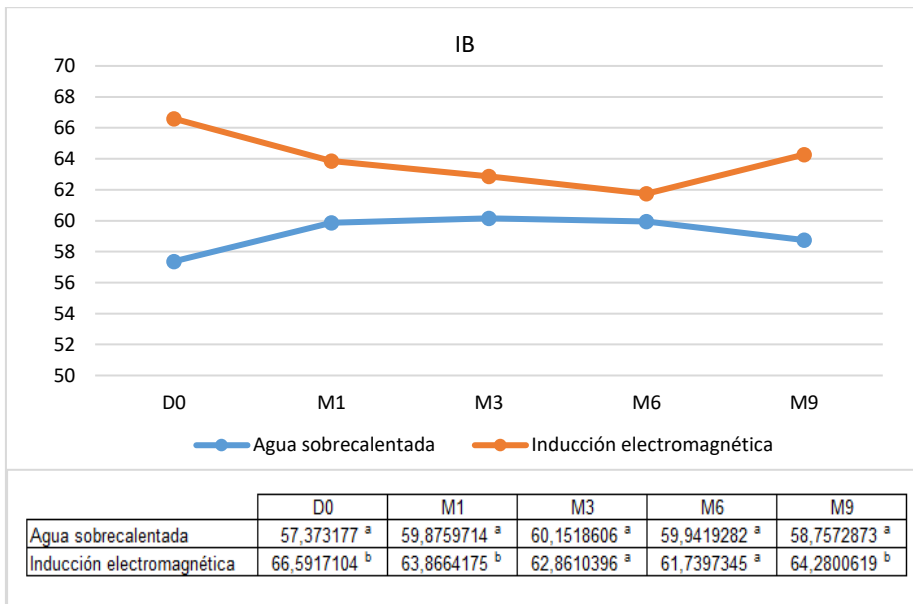


Figura 88. Evolución del Índice de Blanqueamiento de las muestras de alubia blanca esterilizadas.

En resumen, a través del análisis instrumental del color se ha comprobado cómo las muestras esterilizadas por inducción electromagnética presentan tonos más blancos que las tratadas por inducción electromagnética.

Composición de antinutrientes

Una vez esterilizadas las muestras se analizó la cantidad de antinutrientes existentes en cada muestra. En la Figura 89 se puede apreciar cómo las muestras presentan valores similares en los 4 compuestos estudiados, sin encontrar diferencias significativas entre los tratamientos.

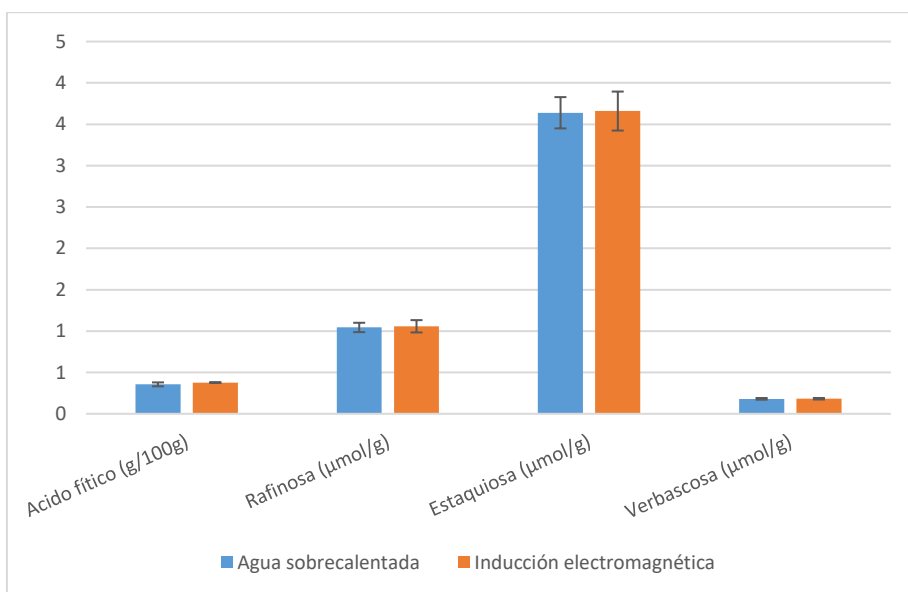


Figura 89. Valores medios obtenidos en los análisis de antinutrientes de las muestras esterilizadas de alubia blanca.

6.4.4 Análisis sensorial

Las muestras de alubia blanca a analizar fueron codificadas con números de 3 dígitos al azar. En este caso, la muestra tratada por lluvia de agua sobrecalentada (convencional) fue la 350 y la tratada mediante inducción electromagnética la 475.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos resumidos en gráficos y tablas. En la figura 90 se presentan las medias obtenidas para cada uno de los atributos valorados por los catadores expertos en un gráfico de arañas.

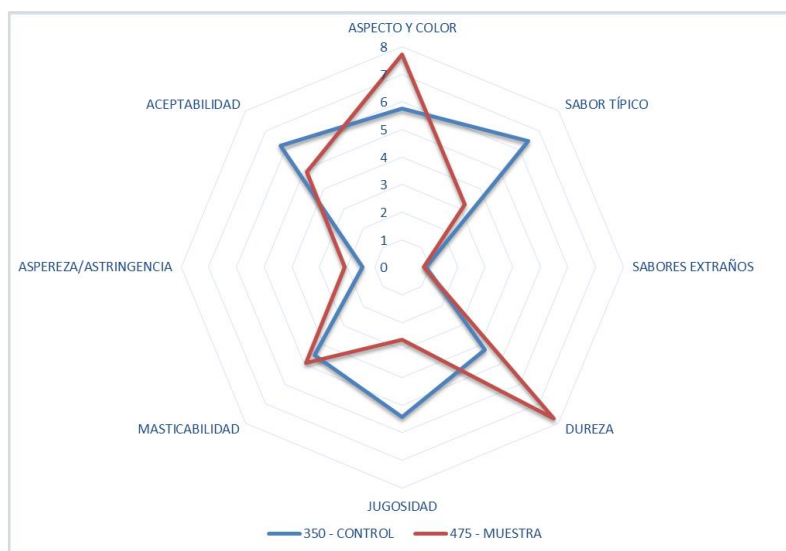


Figura 90. Puntuación media de los atributos de la alubia blanca valorados por los catadores.

En el caso de la alubia blanca, como ya se ha visto en los anteriores apartados, las diferencias entre las muestras son bastante claras. Así pues, en la Figura 89 se puede apreciar cómo las valoraciones son bastante dispares. Principalmente, hay diferencias en el aspecto, dureza, jugosidad y sabor. En este caso, la muestra tratada por inducción electromagnética tiene peores valoraciones en los atributos relacionados con la textura y sabor debido a que el producto, al recibir un tratamiento térmico tan rápido, no se ha cocinado suficiente. Sin embargo, en los atributos de aspecto presenta mejor puntuación.

Tras realizar el tratamiento de datos y analizar estadísticamente los resultados, el estudio muestra que existen diferencias significativas en los atributos “aspecto y color”, “sabor típico”, “dureza” y “jugosidad” (Tabla 17). Este aspecto es favorable para la tecnología de inducción electromagnética ya que se mantienen los atributos sensoriales del producto convencional, mejorando el aspecto y el color, haciéndolo así un producto con más aceptabilidad.

Tabla 17. Valores medios de los atributos valorados de la alubia blanca. Diferente letra en la misma fila indica diferencias significativas al 95% de confianza.

	350 - CONTROL	475 - MUESTRA	Significativo
ASPECTO Y COLOR	5,750 a	7,713 a	Sí
SABOR TÍPICO	6,459 a	3,205 b	Sí
SABORES EXTRAÑOS	0,874 a	0,788 a	No
DUREZA	4,243 b	7,753 a	Sí
JUGOSIDAD	5,420 a	2,633 b	Sí
MASTICABILIDAD	4,503 a	4,923 a	No
ASPEREZA/ASTRINGENCIA	1,445 a	2,080 a	No
ACEPTABILIDAD	6,250 a	4,875 a	No

De igual modo, en la parte comparativa de la cata donde se hace elegir al catador por una de las dos muestras en función del atributo a estudiar (Figura 91), se puede observar cómo la mayoría de los catadores prefieren el color de la muestra tratada por inducción electromagnética, pero el sabor y textura de la convencional.

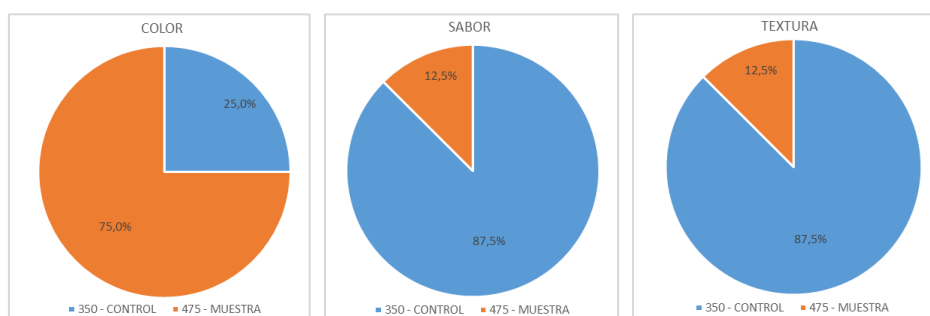


Figura 91. Resultados del análisis comparativo entre las muestras de alubia blanca.

En definitiva, el tratamiento térmico de esterilización por inducción electromagnética mejora el aspecto del producto, pero no consigue cocer el

producto lo suficiente como para agradar al consumidor, por lo que el sabor y textura no son los óptimos.

Así pues, el siguiente paso a trabajar es conseguir una cocción del producto suficiente para satisfacer las necesidades del consumidor. Para ello, se puede alargar el tiempo de mantenimiento del producto, ya que, aunque se consiga una mayor intensidad de esterilización, lo que se busca es cocinar el producto y que quede listo para el consumo.

Si recordamos el tratamiento térmico realizado, comparado con el convencional, queda mucho margen para ajustar el tiempo de procesado y seguir acortando el proceso tradicional (Figura 77).

6.5 Simulación del tratamiento térmico de esterilización por inducción electromagnética

La simulación numérica en el área de alimentos ha sido utilizada ampliamente en diferentes procesos. En 1977, Scott GM presento un estudio del flujo de fluidos no newtoniano en alimentos utilizando técnicas de dinámica de fluidos computacional. Más recientemente, en el estudio de Ghani y Farid (2007) realizaron un análisis de la dinámica de fluidos computacional aplicada a la esterilización térmica de una mezcla sólido-líquido en una lata de conserva. La lata fue rellena con rodajas de piña y fue calentada mediante vapor a 121°C en todos sus contornos. Se realizo un análisis simulando un producto permeable e impermeable a la convección natural observando pequeñas diferencias entre ambos modelos. También mostró la importancia de la convección natural en una lata con solo líquido, gobernando fuertemente el proceso de transferencia de calor. En este caso, es un proceso diferente al tener un producto en su interior que afecta al ratio de transferencia de calor y la dinámica de fluidos (efectos que también fueron observados en este trabajo). Este estudio fue realizado mediante el método de volúmenes finitos utilizando el software comercial Phoenics.

Otro estudio numérico computacional de esterilización de grandes partículas en una lata de conservas fue realizado por Rabiey et al., (2007) quienes realizaron un análisis de la evolución de temperatura y del flujo debido a la convección natural impulsada por el calentamiento de la lata de conserva conteniendo grandes partículas de aproximadamente 45 mm de diámetro en 3D mediante el método de volúmenes finitos. Este estudio fue realizado con el software Ansys Fluent.

Otro de los estudios aplicados a latas de conserva es el de Tutar y Erdogan (2012). Este estudio también se centra en la evolución de la temperatura y los perfiles de velocidad del fluido en una lata horizontal con giro sobre su eje axial a diferentes velocidades (10-160 rpm). En este caso, se definieron dos dominios en el interior de la lata, uno para el agua y otro para aire (espacio de cabeza). Debido a esto, pasa a ser multifásico y es estudiado mediante el método VOF (Volume of Fluid) acoplado con un método de volúmenes finitos. Este estudio muestra la dinámica de las dos fases a distintas velocidades y principalmente los efectos de flotación (gravitational bouyancy) para distintas densidades de fluido.

En primer lugar, se procedió a realizar una simulación del tratamiento térmico de una lata con agua. Para ello, se comprobaron los datos obtenidos con diferentes mallados con el objetivo de trabajar con la malla que menores errores aporte.

En la Figura 92 se pueden observar 4 simulaciones realizadas con las mallas “extremelly coarse”, “extra coarse”, “coarser” y “coarse”. El objetivo principal de realizar la simulación con mallas más finas de manera progresiva es comprobar la convergencia de los resultados y minimizar los errores que existan entre una simulación y la siguiente. Los errores deben ir disminuyendo a medida que se refina la malla hasta llegar a un error aceptable para el problema propuesto. Por ello, en este caso se realizan simulaciones solo hasta una malla “coarse”, pues los valores ya convergen con un error bajo y un costo computacional medio, sin embargo, si se continuara con mallas más finas los errores podrían ser menores, pero a un costo computacional muy alto o excesivo. Como se puede observar, todas las curvas son prácticamente iguales con pequeñas diferencias que son cada vez menores.

La medición de la temperatura se realizó en el centro de la lata y debido a la rotación de esta (6 rpm) se observaron ondulaciones. Estas mismas ondulaciones fueron detectadas en la simulación.

Por otra parte, la pendiente de la recta en todas las simulaciones del gráfico 92 tienen prácticamente la misma pendiente de los resultados realizados en el prototipo de laboratorio.

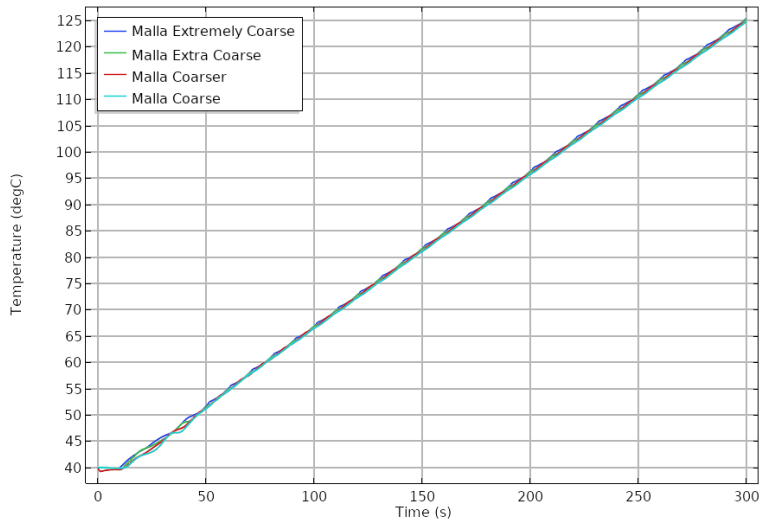


Figura 92. Simulación del calentamiento por inducción electromagnética de una lata de agua.

En los ensayos con el prototipo se observaron pendientes de calentamiento de $16,47^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (potencia lata, velocidad media) mientras que en esta simulación se obtuvieron $17^{\circ}\text{C}/\text{min}$, esta diferencia se podría deber a que el prototipo pierde calor por convección natural hacia el exterior y también por una convección forzada debido a la velocidad relativa entre la superficie exterior de la lata y el ambiente, siendo esta última, una pérdida de energía adicional y en consecuencia, un menor aumento de temperatura por cada minuto. En el modelo de Comsol propuesto, se ha modelado una pérdida de energía hacia el

exterior debido a radiación y a convección natural, pero no se ha considerado la velocidad relativa de la lata respecto al ambiente, pues se habría tenido que modelar el ambiente externo aumentando los tiempos de cálculo.

A continuación, en la Figura 93 se puede observar el calentamiento del agua por inducción electromagnética a tiempo 0, 100s, 200s y 300s, donde se puede apreciar como la temperatura penetra rápidamente en el dominio del fluido.

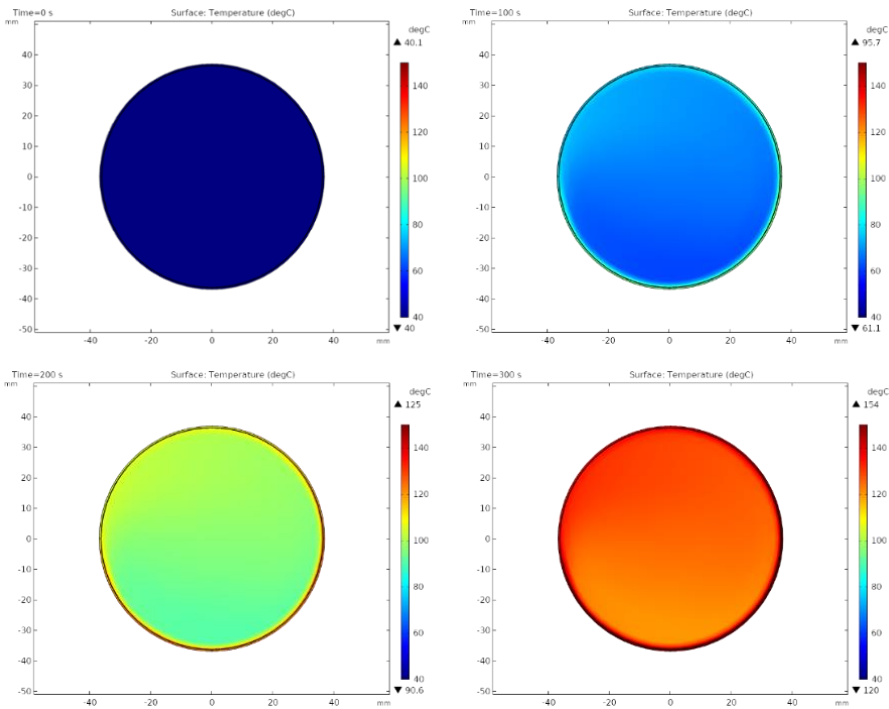


Figura 93. Simulación de la evolución de temperatura del calentamiento de agua por inducción electromagnética al inicio y tras 100, 200 y 300s.

En la Figura 94 se muestra que esto se debe a la velocidad de giro de la lata, la cual a través de la fricción de las paredes transfiere movimiento al fluido impulsándolo en la dirección de la velocidad de giro (2), y por otro lado, a la fuerza de flotación que hace subir al fluido que se calienta en la parte inferior de la lata. Por efecto de la flotación, el fluido tiende a subir tanto por el lado

izquierdo de la lata como por el lado derecho (1), pero se puede observar como por el lado derecho se suman las velocidades ascendentes tanto por flotación como por el giro de la lata, mientras que en el lado izquierdo el fluido tiende a bajar por el giro de la lata y en contraposición, tiende a subir producto de la fuerza de flotación. Esto hace que se encuentren dos movimientos y compitan por cual gobierna. Finalmente, el encuentro de estas dos corrientes hace que el flujo tome la dirección hacia el centro de la lata en dirección derecha (3) generando un flujo circular tanto en la parte superior de la lata como en la parte inferior. Debido a todo lo anterior tiende a haber una leve diferencia de temperatura en la parte superior e inferior de la lata. Esto se puede apreciar en las imágenes de Figura 93. Esta diferencia de temperatura se ve beneficiada por el hecho de que el fluido caliente tiende a permanecer en la zona superior debido a las fuerzas de flotación.

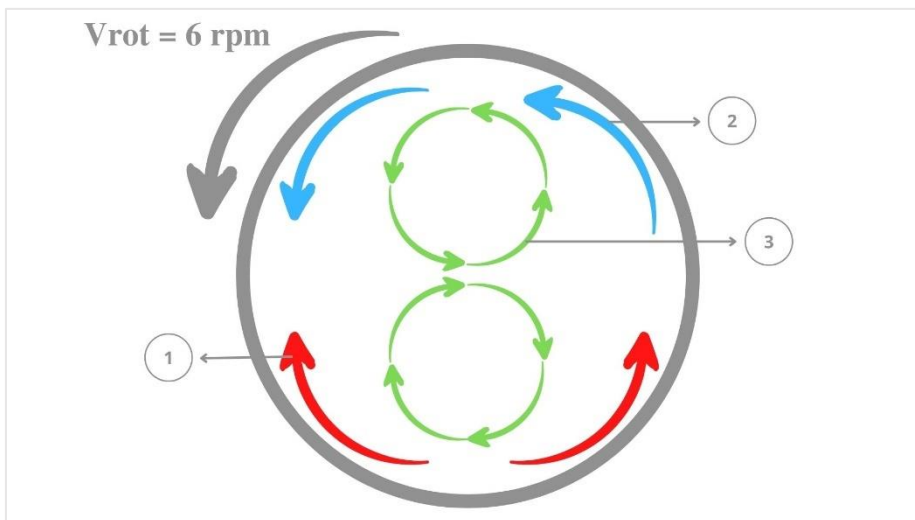


Figura 94. Esquema de las corrientes producidas en el interior de la lata, provocadas por la rotación de la lata y por la diferencia de temperaturas (densidades).

La dinámica de fluidos observada en la lata con agua muestra que la convección es muy importante para la transferencia de temperatura desde la

superficie de la lata hacia el líquido y posteriormente al producto. Conocer en detalle esta dinámica ayuda a comprender los fenómenos involucrados y usar ese conocimiento en beneficio del desarrollo de un mejor producto.

La simulación con aceite y silicona no se ha realizado en Comsol, pero se podría ya adelantar que, al tener una viscosidad mayor, los flujos convectivos debido a la rotación de la lata y a las fuerzas de flotación son menores y es por eso que la transferencia de calor por conducción toma mayor importancia, lo que no ayuda a una buena distribución de la temperatura en el dominio.

Por otro lado, una vez estudiado y simulado el calentamiento por inducción electromagnética de agua, se procede a simular el tratamiento de uno de los alimentos estudiados. En este caso, se ha escogido el cardo, por ser el producto más heterogéneo y variado en cuanto a forma y tamaño.

En primer lugar, se realizó el modelo con la conductividad térmica del cardo teórica (0.65W/mK), pero la temperatura alcanzada no se correspondía con la real. Así pues, se observó que el cardo dibujado para el modelo actuaba como un sólido compacto, mientras que, en realidad, el cardo es un alimento poroso que con el tratamiento térmico se abre y deja fluir el agua por su interior.

Para combatir esta porosidad se realizó una simulación del calentamiento de cardo en busca de la “conductividad térmica efectiva”, de manera que el calentamiento concordara con la realidad.

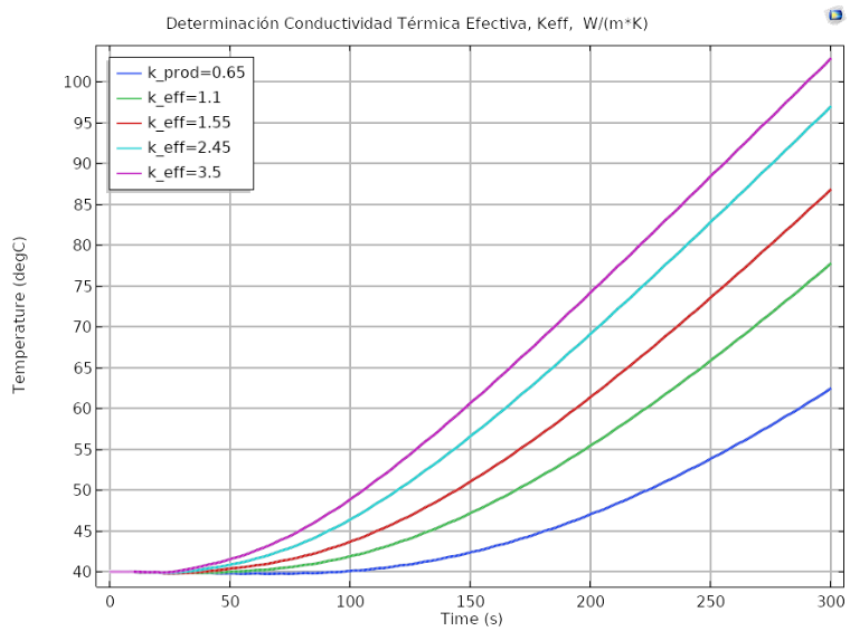


Figura 95. Ajuste de la conductividad térmica efectiva del cardo.

Dicha simulación se puede observar en la Figura 94, donde se puede apreciar el calentamiento del interior del cardo con diferentes conductividades térmicas comprendidas entre 0,65 y 3,5W/mK. Tras analizar dicha simulación, se concretó una conductividad térmica efectiva de 2,45W/mK.

Una vez concretada la conductividad térmica efectiva del cardo, se procedió a simular el calentamiento de cardo por inducción electromagnética. A continuación, en la Figura 96 se muestra la simulación de la evolución de la temperatura del cardo mediante conducción (imágenes de la izquierda) y del líquido de gobierno por convección (imágenes de la derecha) a lo largo del tratamiento térmico (tiempo 0, 100s, 200s y 300s).

Como se puede apreciar la temperatura en el líquido se mantiene a una temperatura más homogénea que en el cardo, debido al movimiento del fluido

provocado por el giro de la lata, las fuerzas de flotación y al movimiento del producto en el interior de la lata.

Por otra parte, la distribución de temperatura en el cardo es más heterogénea (como se esperaba), pues en la parte externa del cardo la temperatura es mayor ya que es por donde ingresa la energía térmica y la temperatura es menor en el centro. Este punto central es muy crítico ya que es la última parte del cardo que recibe la energía suficiente para la esterilización. En consecuencia, el tamaño del cardo u otro producto es muy importante para determinar el tiempo de calentamiento y posterior mantenimiento a una temperatura de determinada para lograr la correcta esterilización y un F_0 adecuada.

Considerando todo lo anterior, se podría deducir que para productos de menor tamaño y en un fluido líquido se necesitara un menor tiempo para lograr la temperatura adecuada en el centro del producto, aunque como se pudo observar en el cardo otras propiedades térmicas del producto y del líquido también definen la evolución final de la temperatura tales como la viscosidad (a mayor viscosidad, menores son los flujos convectivos y por lo tanto la transferencia de energía en el líquido que permita la homogeneización de la temperatura) o la conductividad térmica (a mayor conductividad termina menor será el tiempo de penetración de calor por conductividad en el producto sólido).

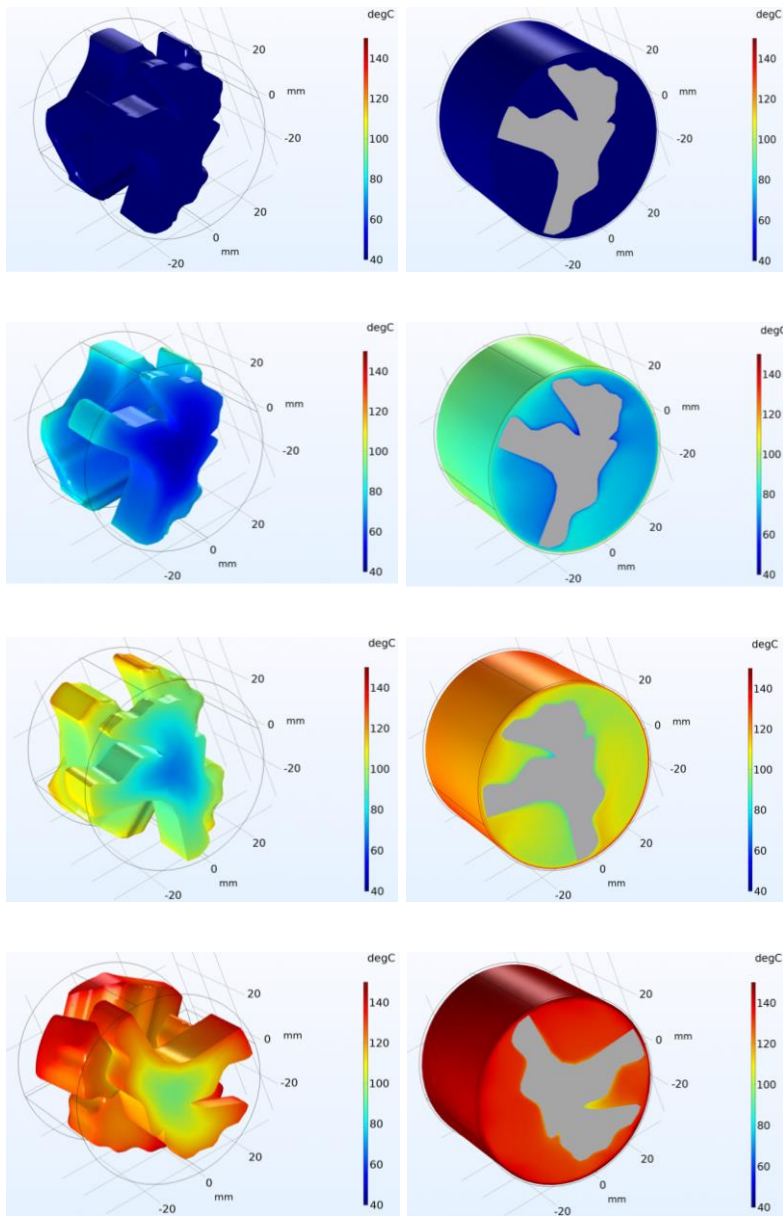


Figura 96. Simulación del calentamiento de una lata de cardo mediante inducción electromagnética.

De igual modo, se ha simulado la velocidad (movimiento) del líquido de gobierno durante el calentamiento (Figura 95). Todas las simulaciones han sido realizadas con una velocidad de rotación de 6rpm.

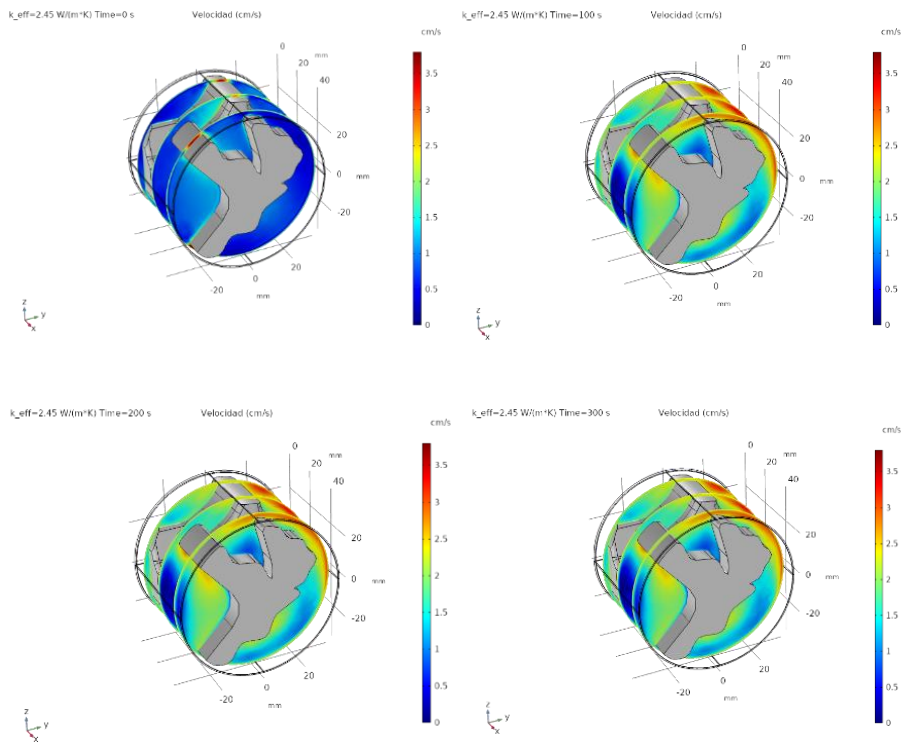


Figura 97. Simulación de la velocidad del líquido de gobierno de la lata de caldo.

En la Figura 97 se puede observar como la velocidad varía entre 0 cm/s en las paredes de la lata y en la pared del sólido hasta 3,8 cm/s en otras zonas, lo cual, genera una mayor velocidad de transferencia de temperatura desde las paredes de la lata. Estas velocidades de convección son positivas para la esterilización de este producto, y se debe principalmente a que el medio líquido es agua. Las fuerzas que impulsan el flujo convectivo son la velocidad de giro de la lata y del producto y a las fuerzas de flotación.

Como se pudo comprobar en varios ensayos experimentales realizados con el prototipo, al utilizar fluidos más viscosos los resultados no fueron positivos debido a que no se consigue una buena transferencia de temperatura dentro de la lata, llegando incluso a fundir la lata en algunas pruebas, debido a que el calor se acumuló en la lata y no “penetro” en el producto con la suficiente rapidez.

Además, a mayores velocidades de giro la convección podría verse beneficiada como se pudo observar en los resultados anteriormente comentados, pero en los casos de producto acuoso no fue así, pues el flujo estaría impulsado principalmente por las fuerzas de flotación.

En consecuencia, la simulación numérica mediante Comsol Multiphysics a logrado demostrar la potencialidad de esta metodología de simulación logrando valores que concuerdan con los logrados en ensayos de prototipo. Una vez calibrado el modelo permite simular distintas situaciones, por ejemplo: diferentes velocidades de rotación, geometrías, viscosidades, productos, aplicación de energía externa, etc. La simulación permite visualizar, por ejemplo, el campo de velocidades, lo cual es prácticamente imposible de realizar en los ensayos y conocer la temperatura en cada uno de los puntos que uno requiera, es decir tenemos la posibilidad de colocar decenas de sensores en los lugares que se requiera para obtener los datos necesarios y su posterior análisis. Futuros trabajos podrían considerar realizar un link entre Comsol Multiphysics y Matlab lo que permitiría utilizar las potencialidades de Matlab en aspectos tales como: optimización, analítica de datos e inteligencia artificial logrando las condiciones de operación ideales logrando un mejor producto y un uso eficiente de la energía.

Por todo ello, como ha sido explicado en los párrafos anteriores, las técnicas de modelamiento matemático con resolución computacional han sido ampliamente utilizadas en los procesos alimenticios y específicamente en el calentamiento de latas de conserva como las estudiadas en este trabajo. Sin embargo, no se ha encontrado ningún estudio de esterilización de latas mediante calentamiento electromagnético y menos aún, su validación mediante ensayos experimentales. Así pues, es difícil comparar los resultados obtenidos con estudios anteriores descritos en la literatura. Además, como se demostró en estos estudios, la dinámica de fluidos está fuertemente gobernada por la convección natural producida por la flotación debido a diferentes de

temperatura, por el movimiento de giro de la lata, por la distribución de producto en su interior y además por la forma de calentamiento, pues el perfil de flujo es distinto si la lata es calentada en todos los contornos o si es solamente calentada en la parte inferior como sucede con el calentamiento por inducción electromagnética.

7 CONCLUSIONES

En primer lugar, podemos concluir que en el presente trabajo se ha validado la tecnología de inducción electromagnética como alternativa al proceso de esterilización convencional, reduciendo los tiempos de procesado y mejorando la calidad final del producto.

A continuación, se describen las conclusiones obtenidas de manera más detallada.

Simulantes alimentarios

- La potencia de calentamiento aumenta la velocidad de calentamiento de productos acuosos, viscosidad baja y viscosidad alta.
- La velocidad de rotación no influye en productos acuosos, pero sí en productos de viscosidad media y alta. A velocidades de rotación media (10rpm) mejoramos la penetración del calor respecto a velocidades bajas (6rpm), pero a velocidades de rotación altas (14rpm) se obtiene el efecto contrario, ya que el producto “resbala” sobre las paredes de la lata.
- La inducción electromagnética es una tecnología viable para productos acuosos a potencias de calentamiento bajas, medias y altas. En cuanto a los productos de viscosidad baja o media, la tecnología de inducción solo será viable a potencias y velocidades de rotación bajas, permitiendo así una correcta penetración del calor. En relación a los productos de alta viscosidad, no es la tecnología óptima para aplicar tratamientos térmicos, ya que la difusividad térmica es muy baja.

Productos alimentarios

- La tecnología de inducción electromagnética es una alternativa viable a los procesos térmicos convencionales de productos enlatados.
- El tiempo de procesado del tratamiento de esterilización se ha reducido un 75-90% al realizar el calentamiento por inducción electromagnética en vez de por lluvia de agua sobrecalentada.
- Se ha conseguido mejorar la calidad del cardo, obteniendo diferencias significativas en cuanto a textura, color y parámetros sensoriales, obteniendo así un producto más llamativo para el consumidor.
- Se ha conseguido mejorar el color del champiñón esterilizado, respetando la textura convencional y mejorando la aceptabilidad del producto en el consumidor, reduciendo las mermas del producto final.
- El tratamiento de esterilización de la alubia blanca ha mejorado el color y aspecto del producto, pero no se ha conseguido ajustar la textura final del producto para que quede en un estado óptimo para el consumo.

Modelo de simulación

- Se ha verificado la importancia de la dinámica de fluidos en el interior del producto, el cual está gobernado principalmente por las fuerzas de flotación formadas por las diferencias de temperatura y la rotación de la lata.
- El tamaño del producto es relevante para estimar el tiempo de procesado, ya que la temperatura penetra por conducción. De este modo, a mayor tamaño de producto, más tiempo tardará en alcanzar la temperatura objetivo.
- Siguiendo las recomendaciones de otros estudios, se ha construido una malla refinada en los puntos de contacto entre sólido y líquido, ya que son zonas críticas en las que existe mayor gradiente de temperatura y velocidad.
- A través del modelo desarrollado, se ha logrado replicar los datos experimentales obtenidos durante el estudio, consiguiendo pendientes de calentamiento semejantes, tanto para agua como para producto.
- Se ha conseguido desarrollar un modelo de simulación por elementos finitos que permite conocer la evolución de la temperatura en cualquier punto del producto, lo que permite validar la eficacia de la tecnología de inducción electromagnética para cualquier producto alimenticio, permitiendo así optimizar las condiciones de proceso dependiendo de diferentes variables: características del producto a tratar, tamaño, potencia de calentamiento, velocidad de rotación de la lata, etc.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Abril, J., & Casp, A. (2010). *Estudio de la penetración de calor en alimentos procesados en sistemas de esterilización rotatorios*.
- Abril Requena, J., & Casp Vanaclocha, A. (2006). *Estudio del efecto de la agitación en el tratamiento térmico de simuladores de alimentos*.
- Acevedo Picon, A., Barrero Perez, J., & Gelvez Figueredo, J. (2007). Calentamiento por inducción electromagnética: diseño y construcción de un prototipo. *Revista UIS Ingenierías*, 6(1), 69–76.
- Alcívar, A., & Castillo, P. (2012). *Estudio de penetración de calor en proceso de esterilización en la elaboración de frejol Cajanus cajan enlatado* (Issue 1). Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
- Ali, A. A., Sudhir, B., & Gopal, T. K. S. (2006). Effect of rotation on the heat penetration characteristics of thermally processed tuna in oil in retort pouches. *International Journal of Food Science and Technology*, 41, 215–219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.01051.x>
- Andrade Acosta, L. G., & Masabanda Narváez, M. D. (2012). *Diseño y construcción de un equipo para el análisis de transferencia de calor por radiación y convección combinadas para el laboratorio de transferencia de calor*. Escuela Politécnica Nacional.
- Ates, M. B., Skipnes, D., Rode, T. M., & Lekand, O. (2014). Comparison of bacterial inactivation with novel agitating retort and static retort after mild heat treatments. *Food Control*, 43, 15–154.
- Berry, M. R. J., & Bradshaw, J. G. (1980). Heating characteristics of condensed cream of celery soup in a steritort: Heat penetration and spore

- count reduction. *Journal of Food Science*, 45, 569–874, 879.
- Berry, M. R. J., & Bradshaw, J. G. (1982). Heat Penetration for Sliced Mushrooms in Brine Processed in Still and Agitating Retorts with Comparisons to Spore Count Reduction. *Journal of Food Science*, 47, 1698–1704.
- Berry, M. R. J., & Bradshaw, J. G. (1986). Comparison of Sterilization Values from Heat Penetration and Spore Count Reduction in Agitating Retorts. *Journal of Food Science*, 51, 477–479.
- Berry, M. R. J., Bradshaw, J. G., & Kohnhorst, A. L. (1985). Heating characteristics of ravioli in brine and in tomato sauce processed in agitating retorts. *Journal of Food Science*, 50, 815–822.
- Berry, M. R. J., & Dickerson, R. W. (1981). Heating characteristics of whole kernel corn processed in a Steritort. *Journal of Food Science*, 46, 889–895.
- Berry, M. R. J., & Kohnhorst, A. L. (1985). Heating characteristics of homogeneous milk-based formulas in cans processed in an agitating retort. *Journal of Food Science*, 50, 209–214, 253.
- Berry, M. R. J., Savage, R. A., & Pflug, I. J. (1979). Heating characteristics of cream-style corn processed in a Steriort. *Journal of Food Science*, 44, 831–835.
- Bichier, J. G., Balaban, M. O., & Heyliger, T. L. (1995). Thermal process simulation of canned foods under mechanical agitation. *Journal of Food Process Engineering*, 18, 17–40.

- Cabanillas Mendoza, C., Valdez, L. A., Cabrera, C. A., Merino, C. A., Bentz, E. N., & Provasi, P. F. (2019). Ley de Faraday y Ley de Biot y Savart: campo magnético de una espira circular en un punto fuera del eje. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica. Claves Para El Desarrollo*, 5(26), 240–252. <https://doi.org/10.30972/eitt.503758>
- Calix Lara, T. F. (2005). *Desarrollo de un enlatado de champiñones en la Escuela Agrícola Panamericana*. Zamorano (Honduras).
- Canjura, F. L., Schwartz, S. J., & Nunes, R. V. (1991). Degradation Kinetics of Chlorophylls and Chlorophyllides. *Journal of Food Science*, 56, 1639–1643.
- Casp, A., & Abril, J. (2003). *Procesos de conservación de alimentos* (2nd ed.). A. Madrid Vicente Ediciones/Ediciones Mundi-Prensa.
- Chirinos Garcia, F. J. A., & Gargurevich Villaizan, D. G. (2021). *Efecto del tratamiento térmico en la degradación de los carotenoides en conserva de pimiento piquillo (Capsicum annunn) en salmuera*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Díaz Hellín Martínez del Rey, J. A. (2003). Michael Faraday: El encuadernador que revolucionó la ciencia. *Anales de La Real Sociedad Española de Química, Segunda ép*, 36–43.
- Dwivedi, M., & Ramaswamy, H. S. (2010a). An empirical methodology for evaluating the fluid to particle heat transfer coefficient in bi-axially rotating cans using liquid temperature data. *Food Bioprocess Technology*, 3(716–731).
- Dwivedi, M., & Ramaswamy, H. S. (2010b). Comparison of heat transfer rates

- during thermal processing under end-over-end and axial modes of rotation. *LWT - Food Science and Technology*, 43, 350–360.
- El-Mashad, H. M., & Pan, Z. (2016). Application of Induction Heating in Food Processing and Cooking. *Food Engineering Reviews*, 9(2), 82–90. <https://doi.org/10.1007/s12393-016-9156-0>
- Erdogdu, F., & Tutar, M. (2012). A computational study for axial rotation effects on heat transfer in rotating cans containing liquid water, semi-fluid food system and headspace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(13–14), 3774–3788. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.031>
- Ghani, A. G. A., & Farid, M. M. (2007). Thermal sterilization of food using CFD. *Computational Fluid Dynamics in Food Processing, January 2007*, 331–346. <https://doi.org/10.1201/9781420009217.ch13>
- Huamán Martínez, R. J., & Monja Jimenez, M. K. (2019). *Diseño de un pasteurizador de leche utilizando corrientes de Foucault para la empresa Derivados Lácteos Barreto S.R.L.* Universidad Señor de Sipán.
- Knap, R. P., & Durance, T. D. (1998). Thermal processing of suspended food particles in cans with end-over-end agitation. *Food Research International*, 31(9), 635–643. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(99\)00037-X](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00037-X)
- Lespinaud, A. R. (2012). Simulación y optimización del tratamiento térmico de Alimentos envasados en recipientes de vidrio. In *Journal of Chemical Information and Modeling*. Universidad Nacional de La Plata.
- Lespinaud, A. R., & Mascheroni, R. H. (2010). Simulación numérica de la

transferencia de calor y materia durante la esterilización de conservas de champiñón. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, *Noviembre*, 5587–5597.

Llerena Danza, T. E., & Tejada Atahualpa, L. E. (2017). *Evaluación de la influencia por variación del líquido de gobierno en el tiempo de esterilizado de conservas de anchoveta (Engraulis ringens) en envase ¼ club*. 78(1), 43–49.

Lucia, O., Maussion, P., Dede, E. J., & Burdio, J. M. (2014). Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(5), 2509–2520. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>

Molina Amaya, C., Mantilla Quijano, G., Restrepo, D., Losada Páramo, C., & Motivar, A. (1985). La Ley De Joule. Instalaciones eléctricas. In *SENA, Servicio Nacional de Aprendizaje* (Vol. 8).

Muñoz Martin, S. (2012). *Efecto del tratamiento térmico sobre diferentes parámetros de calidad de la patata (Solanum tuberosum): textura y almidón*. Universitat Politecnica de Catalunya.

Naveh, D., & Kopelman, I. J. (1980). Effect of some processing parameters on the heat transfer coefficients in a rotating autoclave. *Journal of Food Processing and Preservation*, 4(1–2), 66–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1980.tb00596.x>

Pacheco, C., & Soto, J. A. (2009). *Corrientes de Foucault . Medida de conductividad eléctrica por inducción electromagnética*. 1–15.

Pérez Reyes, M. E., & Sosa Morales, M. E. (2013). Mecanismos de

transferencia de calor que ocurren en tratamientos térmicos de alimentos. *Temas Selectos de Ingenieria de Alimentos*, 7(1), 37–47. <https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2009/02/guia-tecnica-electiva1.pdf>

Price, R. B., & Bhowmik, S. R. (1994). Heat transfer in canned foods undergoing agitation. *Journal of Food Engineering*, 23, 621–629.

Rabiey, L., Flick, D., & Duquenoy, A. (2007). 3D simulations of heat transfer and liquid flow during sterilisation of large particles in a cylindrical vertical can. *Journal of Food Engineering*, 82(4), 409–417. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.011>

Rudnev, V. (2002). Handbook of Induction Heating. *Handbook of Induction Heating*. <https://doi.org/10.1201/9781420028904>

Sánchez Moreno, A., Jaimes Gómez, O., & Aguilera Terrats, J. R. (2020). La enseñanza basada en preguntas: La ley de Ampère y el término de Maxwell. *Didáctica de Las Ciencias Experimentales y Sociales*, 38, 115. <https://doi.org/10.7203/dces.38.15427>

Sarghini, F., & Erdogdu, F. (2016). A computational study on heat transfer characteristics of particulate canned foods during end-over-end rotational agitation: Effect of rotation rate and viscosity. *Food and Bioproducts Processing*, 100, 496–511. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.07.009>

Tucker, G. S. (2005). Improving rotary thermal processing. In *Improving the thermal processing of foods* (pp. 124–137). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1533/9781855739079.2.124>

Tutar, M., & Erdogdu, F. (2012). Numerical simulation for heat transfer and

velocity field characteristics of two-phase flow systems in axially rotating horizontal cans. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 366–385. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.02.008>

Urtasun Pascual, A. (2016). *Optimización del tratamiento térmico en autoclave para conservas esterilizadas. Influencia de la velocidad de rotación y del sistema de penetración de calor*. [Universidad Pública de Navarra]. [https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/22333/Urtasun Pascual Ainara_TFG.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/22333/Urtasun_Pascual_Ainara_TFG.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Van Loey, A., Fransis, A., Hendrickx, M., Maesmans, G., de Noronha, J., & TobbackOBBACK, P. (1994). Optimizing Thermal Process for Canned White Beans in Water Cascading Retorts. *Journal of Food Science*, 59(4), 828–832. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb08138.x>

Wang, G., Wan, Z., & Yang, X. (2020). Induction heating by magnetic microbeads for pasteurization of liquid whole eggs. *Journal of Food Engineering*, 284(June 2019), 110079. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110079>

Weemaes, C. A., Ooms, V., Van Loey, A. M., & Hendrickx, M. E. (1999). Kinetics of Chlorophyll degradation and color loss in heated broccoli juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 2404–2409.

Welti-Chanes, J., Gómez-Palomares, O., Vergara-Balderas, F., & Maris-Alzamora, S. (2005). Aplicaciones De Ingenieria Y Fenomenos De Transporte Al Estudio De La Transferencia Convectiva De Calor En Alimentos Envasados. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 4, 89–

106.

https://www.researchgate.net/publication/237037751_Aplicaciones_de_ingenieria_y_fenomenos_de_transporte_al_estudio_de_la_transferencia_convectiva_de_calor_en_alimentos_envasados

ANEXO 1. HOJAS DE CATA

PR-929 SIMUCALIN

* Nombre

* Fecha

Fecha

Fecha

DD/MM/AAAA



Parte 1. Análisis descriptivo

PR-929 SIMUCALIN

MUESTRA

ANÁLISIS VISUAL

* ASPECTO Y COLOR

* COMENTARIOS

SABOR

* SABOR TÍPICO

Nada

Mucho

* SABORES EXTRAÑOS

Nada

Mucho

* COMENTARIOS

TEXTURA

* DUREZA

Nada duro

Muy duro

*** JUGOSIDAD**

Nada Mucho

*** MASTICABILIDAD**

Nada Mucho

*** ASPEREZA/ASTRINGENCIA**

Nada Mucho

ACEPTABILIDAD

*** ACEPTABILIDAD**

*** COMENTARIOS**

Dicha parte se realizaría dos veces en cada producto, una por cada muestra.

La ficha de cata es la misma para los 3 productos.

Parte 2. Parte comparativa



PR-929 SIMUCALIN

COMPARATIVA

* ¿Qué muestra te ha gusta más para cada uno de los aspectos evaluados ?

	MUESTRA	MUESTRA
COLOR	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
SABOR	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
TEXTURA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

* COMENTARIOS

¡¡MUCHAS GRACIAS POR PARTICIPAR EN ESTE PROYECTO!!