



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Exactas

Maestría en Tecnología e Higiene de Alimentos.

Modelado y Simulación de la Cocción -Pasteurización *Sous vide* de Músculos *Semitendinosus* bovino Aplicando Ciclos de Temperatura Constante de Autoclave (CRT) y Ciclos de Temperatura Variable de Autoclave (VRT).

Tesis presentada para optar al título de Magíster en Tecnología e Higiene de Alimentos.

Lic. Paula Ormando

Director: Dr. Axel Eduardo Larreteguy
Co-Director: Dr. Sergio Ramón Vaudagna

Instituto Tecnología de Alimentos, **CIA, CNIA, INTA.**
Facultad de Ingeniería, **FAIN, UADE.**

Buenos Aires, 2010

*A mis viejos, "Marta" y "Norman"
y a mi hermana María Laura.*

Agradecimientos

“Ver es creer, pero sentir es estar seguro ”....

Si hay algo de lo que estoy segura es que esta Tesis formó, forma y formará parte de mi vida. También estoy convencida que de aquí en más nuevos desafíos me esperan. Por esto y más deseo agradecer a varias personas que participaron en esta Tesis leyendo, compilando, corrigiendo, trabajando a la par, teniéndome paciencia, dándome ánimo, acompañando en momentos difíciles y en momentos de felicidad.

- A Axel Larretguy, mi director, por haber confiado en mi, por su infinita paciencia y por la dirección de este trabajo. Gracias Axel, por hacerme crecer en conocimiento y porque aprendí cuál es la pregunta que tengo que responder.
- A Sergio Vaudagna, mi co-director y director de beca, gracias por permitirme ser parte del grupo de trabajo del Área de Procesamiento Industrial. Gracias por tu gran ayuda, por tus consejos y seguimiento durante el desarrollo de esta Tesis. Gracias Sergio, por ser tan *auditivamente* paciente conmigo.
- Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y al Instituto Tecnología de Alimentos (ITA), quienes financiaron mis estudios de Maestría y mis ensayos en Planta Piloto.
- A mis profesores de la Maestría y al coordinador Leonardo Sechi.
- A mis compañeros del Área de Procesamiento Industrial: Celia Benitez, María Laura Vranic, Natalia Szerman, Gabriela Denoya, Yanina Barrio, Claudio Sanow, y Roberto Cóppola, gracias por los momentos compartidos.
- A mis compañeros de ITA y del INTA y en especial a Silvina “Thelma” Guidi

por su afecto, Lourdes del Castillo, Mariana Nanni, Anita Sancho, Viviana Spotorno, René Fortunato, Fernando Carduza, Claudia González, Gustavo Polenta, Seba Cunzolo, Darío Pighín, Adriana Pazos, Adriana Descalzo, Luciana Rossetti, Sergio Rizzo, Adriana Fernández Suárez, Cecilia Barreto, Dante Rojas, Gabriela Grigioni y Claudia Lamberto, muchas gracias por estar siempre.

- Mención especial para Luis Sanow y Ernesto Miranda por su gran ayuda preparando los músculos. A Juan Carlos Fernández y Juan Manual Rojas por tener siempre listo el vapor de caldera y el aire comprimido para que “el Barri” funcionara.
- A Leandro Langman, mi compañero de Maestría, a quien le agradezco su enorme esfuerzo y predisposición para manejar largas horas ida y vuelta hasta La Plata. A sus Padres, Betina y Mario por tan lindos almuerzos compartidos.
- A los estudiantes de Ingeniería de Alimentos de la Universidad de Morón, quienes colaboraron conmigo en los ensayos de Planta Piloto: Natalia Rossi y Cristian Ourille.
- A la Universidad Argentina de la Empresa por brindarme las herramientas necesarias para el desarrollo de esta Tesis. A a las personas que allí trabajan, en especial Irene Vasallo, Aldo Cesario, Humberto Molina, Mitzy Handel y Grace “Coneja” Rivolta por su cariño. Al *Modelling Group* del último piso, especialmente a Pablón Caron por salvarme siempre la notebook, Débora Tanonni, Francisco Barceló, Luciano Arrieta y Nachi.
- A la Cátedra de Microbiología, gracias por permitirme crecer como docente y formar parte de su equipo de profesores. A la memoria de Inés Cereiyo y Ruth Fridman a quienes dedico esta Tesis. Siempre van a estar en mi corazón. Mi agradecimiento para Ricardo Sobol, Horacio Frade, Adriana Fernández, Silvia Rafellini, Marta López Barrio, Verónica Berges Soubies, Silvio Maurutto y Carlos De Lorenzini y reconocimiento para el personal de laboratorio: Norberto, Elsa, Nacho, Pablo y Fernando.

-
- A mis amigas María Corradini por su valiosa amistad y palabras de aliento, a María Pinciroli y a sus hijos por tantos viernes de mates y charlas luego de la Maestría, a Valeria Gessaghi y a sus hijas por su afecto, y a Clarisa mi gran amiga “cósmica”. A mis amigos, Milton De Herrera, Scott Sorongon y Gonzalo Castello por su gran apoyo y amistad en todos estos años.
 - A mis profesores: Susana Garde gracias por abrirme a la biodanza; a Shaquille Galdós de danzas árabes gracias confiar en mí; a Damián gracias por ayudarme a escalar el Lanín; a Gerard de yoga gracias porque aprendí que lo importante y enriquecedor también se logra durante el proceso y no solo en el objetivo final y al profe Rodrigo Mazzola, por alentarme a más.
 - A mis amigos de Astronomía de Espacio Profundo (Epianitos), especialmente a Clarisa, Winter, Ricky, Karina, ACB, Marcos, Crazy22 y Marcela, y a sus hijas Kayla y Belu, Meteoro y JuanCa, Baxter, Chuli, Grandegor, Di Tata, Maxi, Rigatuzzo, Nelson, Ernesto. A Bubamara por no dejar que se me pierda el color violeta.... Gracias por compartir esta profunda pasión de contemplar el Cielo.
 - A mis amigos de fly fishing, especialmente a Silvia y Sergio, Juan Ma, Daniel711, Ferbora, Pato, Andrea, Lagarto, Marcelo Ranea, Mariano, Dr. Peloncha, Franco, Peterinvisible, Mario, Chelo, Chapa y Eduardo Cesar. Al Enzo “tano” Ceravolo, maestro de maestros, Walter Plomer y Alfred. Gracias por compartir la pasión de disfrutar de la pesca con mosca y un poco más....
 - A mis amigos de entrenamiento de montaña: Marta ... compañera de aventuras, Cecilia, María, Chagui, Yamil, Charly, Pablo, Diego, Luis y Marcelo. Gracias por mantener el espíritu de la montaña aún cuando nos queda un poco lejos.
 - A la banda de MiGUi, especialmente a GM a quien le debo el formato de esta Tesis, Gato Cuántico, GusX, MiGUi, Freyi, Maeglin-rol, Lain, Talía, Ontu, Anakyn, JWolf, Nexus7.
 - Finalmente, a mis padres, Mirta y Miguel, por su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi carrera y de esta Tesis. A mi hermana, María Laura por acompañarme y hacerme descubrir que todo lo que me proponga lo puedo lograr y que solo depende de mi. Los quiero mucho.

Resumen

El desarrollo del presente Trabajo de Tesis se dividió en dos partes, una de modelado numérico y otra experimental. La primera incluyó la generación de modelos geométricos de músculos *Semitendinosus* bovino proponiendo una geometría simple controlada por seis parámetros (LX, LY, LZ, a, b, c), de los cuáles los tres primeros representaron las dimensiones de la pieza mientras que los tres restantes caracterizaron a la asimetría propia del músculo. A fin de obtener una geometría simple de un músculo *Semitendinosus* bovino, se comenzó por la generación de una geometría esférica dentro del entorno gráfico del software Abaqus CAE v.6.7-1. Se creó un cuerpo sólido 3D de revolución deformable. Se generó entonces un músculo *Semitendinosus* bovino patrón de peso promedio (1.800 g), con dimensiones iguales a 10 cm, 7 cm y 30 cm, correspondientes a las dimensiones LX, LY y LZ, respectivamente. Estas dimensiones fueron afectadas por 3 coeficientes de asimetría, cuyos valores 1, 2,5 y 1,5, correspondieron a los coeficientes a, b y c respectivamente. Además de esta geometría patrón, se obtuvieron seis casos más, modificando solamente los parámetros LX, LY y LZ en $\pm 20\%$ en relación a las dimensiones del primer modelo obtenido (músculo patrón).

La primera parte del Trabajo de Tesis también incluyó la etapa de modelado y simulación de ciclos de cocción-pasteurización *Sous vide* a Temperatura Constante de Autoclave (CRT) a 75 °C y Temperatura Variable de Autoclave (VRT) con escalonamiento de temperatura (Delta T) hasta llegar a 75 °C. Los modelos generados (músculo patrón y geometrías de los casos del 1 al 6) fueron utilizados en las simulaciones de los procesos de cocción-pasteurización CRT y VRT dentro del entorno del software Abaqus CAE v.6.7-1. Esas simulaciones se realizaron en forma adimensional y en dos instancias independientes como procesos de calentamiento

y enfriamiento, aprovechando la linealidad del problema térmico, para luego ser ensambladas mediante rutinas en lenguaje MATLAB. Este ensamble se ejecutó de forma de optimizar el proceso de cocción-pasteurización al utilizar la condición establecida en el Protocolo “F” de la Unión Europea, es decir alcanzar el Valor de Pasteurización VP_{70}^{10} de 40 min en el punto de mínimo tratamiento (PMT) de cada geometría modelada.

Otro de los objetivos a propuestos en la primera etapa del Trabajo de Tesis, fue la ubicación del PMT de todas los casos modelados, una vez alcanzado VP_{70}^{10} de 40 min. Asimismo, se evaluó el Valor de Cocción (CV_{100}^{33}) y el tiempo de procesamiento necesario para alcanzar el $VP_{70}^{10} = 40$ min aplicando tratamientos de cocción-pasteurización *Sous vide* de tipo CRT y VRT.

En la parte experimental del presente Trabajo de Tesis, se planteó el estudio de la distribución de parámetros característicos de la penetración de calor (tiempo de calentamiento Δt_{10}^{70} y factor de velocidad de calentamiento f_h). Este estudio se llevó a cabo utilizando cilindros de músculos *Semitendinosus* bovino cocidos-pasteurizados *Sous vide* los cuales fueron procesados en un autoclave con ducha de agua de escala piloto (Steriflow Barriquand modelo Microflow, Roanne, Francia). Este estudio permitió identificar la zona del canasto del autoclave más retrasada en relación al calentamiento y enfriamiento de los músculos.

A su vez, en la etapa experimental se realizó la validación de los tratamientos CRT y VTR simulados en la primera etapa, utilizando el autoclave indicado en el párrafo precedente. Se calcularon los valores de VP_{70}^{10} , CV_{100}^{33} y tiempo de procesamiento y se determinaron las coordenadas del PMT de cada músculo procesado. Finalmente se realizaron mediciones de parámetros fisicoquímicos y tecnológicos como pH del músculo crudo y del músculo cocido, diferencia de pH y pérdida de peso. A su vez, se realizaron mediciones de la resistencia al corte evaluada mediante Celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida y Cizalla de Warner-Bratzler con cuchilla triangular. También se realizó un análisis de apreciación visual de los músculos cocidos a través de un panel sensorial entrenado. Además se midieron los parámetros cromáticos en los espacios X, Y, Z y CIELAB (L^* , a^* , b^*), los cuales fueron determinados en la zona central de rodajas de músculos cocidos-pasteurizados en condiciones CRT y VRT.

La generación de la geometría de músculos *Semitendinosus* bovino a través de un modelo simplificado controlado por seis parámetros (LX, LY, LZ, a, b, c), constituyó un método simple, sencillo y de bajo costo computacional. Este modelo permitió capturar las asimetrías que el músculo presenta en sus ejes x, y, z. Asimismo, se aprovechó la linealidad del problema térmico, para realizar en forma eficiente las simulaciones de los procesos de cocción-pasteurización CRT y VRT para cada geometría generada. Al analizar el efecto de ambos tratamientos, se obtuvieron en todos los casos simulados Valores de Cocción (CV_{100}^{33}) mayores para el tratamiento CRT que para el VRT. A su vez, los casos que más se diferenciaron del músculo patrón fueron aquellos en los que se modificó en forma directa (Caso 2) o indirecta (Caso 6), el parámetro LY que caracterizó a la altura de los músculos.

Respecto al tiempo de procesamiento para alcanzar el $VP_{70}^{10} = 40$ min en el PMT, se concluyó que los tratamientos CRT en los distintos casos simulados (patrón y 1 a 6) presentaron menor tiempo de procesamiento que los mismos casos tratados mediante VRT. A su vez, el análisis de sensibilidad a la variación en las dimensiones del músculo ($\pm 20\%$ respecto a las dimensiones del músculo patrón) demostró que la posición del PMT no se modificó en forma marcada, excepto en el caso correspondiente al aumento de la dimensión LZ. En relación al estudio de la distribución de calor de parámetros característicos de la penetración de calor en cilindros de músculos *Semitendinosus* se pudo establecer como conclusión general que los procesos de cocción-pasteurización *Sous vide* de piezas cárnicas realizados en autoclaves marca Steriflow Barriquand modelo Microflow, deberían ser controlados monitoreando las curvas de penetración de calor en el centro térmico de piezas ubicadas en la zona central de la cámara del autoclave.

En la validación de los procesos de cocción-pasteurización CRT y VRT simulados se observaron algunas diferencias entre las curvas experimentales y las simuladas. Estas pudieron deberse a distintos factores experimentales como la dificultad de insertar correctamente el sensor de temperatura, diferencias entre las difusividades térmicas del alimento y del termopar, y el efecto intermitente de la lluvia de agua de la cámara del autoclave.

En el modelo postulado no se contempló la pérdida de agua por el efecto del tratamiento térmico ni la reducción de la geometría del músculo *Semitendinosus*

bovino. La malla de elementos finitos utilizada para representar a los diferentes modelos de músculos bovinos permaneció inmóvil durante la etapa de simulación de los tratamientos de cocción-pasteurización. La pieza se redujo de tamaño y peso y eso determinaría que el PMT se calentase más rápido en el caso real que en el caso modelado. En consecuencia para igual tiempo de procesamiento se alcanzó mayor temperatura en el PMT del músculo real que en el del simulado

El efecto positivo del tratamiento VRT se debería a la mejora de los atributos sensoriales y parámetros tecnológicos aún cuando el tiempo de procesamiento resultase mayor que para el tratamiento CRT. Este efecto se vio reflejado en la pérdida de peso por cocción debido a que los músculos procesados mediante el tratamiento CRT presentaron valores significativamente mayores de ese parámetro respecto a los músculos procesados mediante el tratamiento VRT. Se destaca la importancia de la diferencia observada (aproximadamente 5,5%) en los valores de pérdida de peso, particularmente si se consideran los volúmenes que se procesan diariamente en una planta procesadora de carne.

No se observó efecto significativo del tipo de tratamiento térmico (CRT y VRT) sobre la resistencia al corte de los músculos *Semitendinosus* cocidos-pasteurizados, aunque las muestras tratadas mediante VRT presentaron una tendencia a valores menores de ese parámetro.

En el análisis de apreciación visual, las rodajas de los músculos cocidos correspondientes al tratamiento CRT fueron valoradas como significativamente más oscuras (más marrones, menos rojas) que las muestras correspondientes al tratamiento VRT. Con respecto a la distribución del color en la superficie de las rodajas de los músculos cocidos, las muestras correspondientes al tratamiento VRT resultaron significativamente más homogéneas que las correspondientes a CRT.

A su vez, se observó que las muestras correspondientes al tratamiento VRT resultaron más homogéneas que las correspondientes al tratamiento CRT, en relación a la distribución de los parámetros cromáticos (X, Y, Z) en la rodaja del músculo cocido.

Publicaciones

Los resultados presentados en la presente Tesis están parcialmente incluidos en los trabajos publicados en los siguientes Congresos Internacionales y Nacionales.

Validación de simulaciones de procesos de cocción-pasteurización CRT-VRT en músculos *Semitendinosus* bovino. *Autores:* ORMANDO Paula., SANCHO Ana M., SANOW Claudio, LANGMAN Leandro E., CARDUZA Fernando, LARRETEGUY Axel E., VAUDAGNA Sergio R. *Congreso Internacional de Ingeniería, 17 al 20 de Octubre de 2010, La Rural, Buenos Aires*

Evaluación del efecto de diferentes protocolos de cocción-pasteurización sobre propiedades físicas y atributos sensoriales de carne bovina cocida mediante el sistema *Sous vide*. *Autores:* ROSSI Natalia, OURILLE Cristian, ORMANDO Paula, SANCHO Ana M., CARDUZA Fernando, VAUDAGNA Sergio R. *Congreso Internacional de Ingeniería, 17 al 20 de Octubre de 2010, La Rural, Buenos Aires, Argentina*

Influencia de la geometría de músculos *Semitendinosus* bovino en la calidad sensorial del producto en procesos de cocción-pasteurización *Sous vide* en autoclave a temperatura variable. *Autores:* ORMANDO Paula, VAUDAGNA Sergio R., LARRETEGUY Axel E. *XVII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones 10 al 13 de noviembre de 2008, San Luis - Argentina*

Estudio de sensibilidad a la forma del músculo por medio de la simulación de procesos de cocción-pasteurización *Sous vide* de músculos *Semitendinosus* bovino. *Autores:* ORMANDO Paula, VAUDAGNA Sergio R., LARRETEGUY Axel E. *XII Congreso CyTAL-Congreso Argentino de Ciencia*

Y Tecnología de Alimentos 30 Simposio Internacional de Nuevas Tecnologías Alimentación y energía: globalización y desafíos, 7 al 9 de Octubre de 2009, Concordia, Argentina.

Distribution of Heat Penetration Parameters in a Single Basket Water Cascade Retort: Effect on Effective Pasteurization of Sous Vide Cooked Beef Pieces. *Autores:* ORMANDO Paula, OURILLE Cristian, ROSSI Natalia, VAUDAGNA Sergio R. *EFFoST Congress: First European Food Congress, 4 al 9 de Noviembre de 2008, Ljubljana, Eslovenia.*

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.	1
1.1.1. Producción Mundial de Ganado Vacuno.	1
1.1.2. Producción Mundial de Carnes y Proyecciones de la Demanda.	1
1.2. Innovación Tecnológica e Industrialización del Sector Cárnico.	4
1.3. Tecnología <i>Sous vide</i>	8
1.3.1. Categorización de los Productos <i>Sous vide</i>	10
1.3.2. Efecto del Sistema <i>Sous vide</i> sobre Atributos Sensoriales y Propiedades Nutricionales. Efecto sobre Vida Útil.	18
1.4. Protocolos de Cocción-Pasteurización.	21
1.4.1. Tratamientos Térmicos a Temperatura Constante (CRT) y a Temperatura Variable (VRT) de Autoclave.	23
1.4.2. Uniformidad en el Calentamiento y Enfriamiento de Alimentos Envasados en Equipos de Tratamiento Térmico.	28
1.5. Modelado y Simulación de Procesos Térmicos en Alimentos.	29
1.5.1. Diferencias Finitas	31
1.5.2. Elementos Finitos	37

1.5.3. Generación de Dominios Regulares e Irregulares en el Modelado y Simulación de Procesos Térmicos de Carnes y Productos Cárnicos.	43
1.6. Naturaleza del Aporte Original.	45
1.6.1. Hipótesis Correspondiente al Trabajo de Investigación Planteado.	47
1.7. Objetivo General.	47
1.8. Objetivos Específicos.	47
2. Materiales y Métodos	49
2.1. Modelo Matemático-Numérico	49
2.1.1. Generación de la Geometrías Músculos <i>Semitendinosus</i> bovino a partir de la Deformación de una Esfera.	51
2.1.2. Simulación de los Tratamientos de Cocción-Pasteurización <i>Sous vide</i> Aplicando Ciclos (CRT) y (VRT) de Autoclave.	56
2.2. Etapa Experimental.	65
2.2.1. Estudio de la Distribución de Parámetros Característicos de la Penetración de Calor en Músculos <i>Semitendinosus</i> bovino Cocidos-Pasteurizados <i>Sous vide</i> en un Autoclave con Ducha de Agua de Escala Piloto.	65
2.2.1.1. Diseño Experimental.	66
2.2.1.2. Materia Prima.	66
2.2.1.3. Calibración de Termocuplas.	67
2.2.1.4. Preparación de Muestras para Monitoreo de Curvas de Penetración de Calor.	67
2.2.1.5. Aplicación de los Tratamientos Térmicos.	69
2.2.1.6. Condiciones Operativas Aplicadas.	70

2.2.1.7.	Controles Post-Proceso de los Cilindros de Carne Cocidos.	71
2.2.1.8.	Cálculo de los Parámetros de Penetración de Calor.	72
2.2.1.9.	Análisis Estadístico.	73
2.2.2.	Validación de los Resultados de la Etapa de Modelado y Simulación de los Ciclos CRT y VRT Aplicados en la Cocción-Pasteurización <i>Sous vide</i> de músculo <i>Semitendinosus</i> bovino.	74
2.2.2.1.	Diseño Experimental.	74
2.2.2.2.	Materia Prima.	75
2.2.2.3.	Preparación de los Músculos.	78
2.2.2.4.	Aplicación de los Tratamientos Térmicos.	81
2.2.2.5.	Análisis de las muestras.	82
2.2.2.5.1.	Pérdida de Peso.	83
2.2.2.5.2.	Medición del pH.	85
2.2.2.5.3.	Resistencia al Corte.	85
2.2.2.5.4.	Análisis de Apreciación Visual.	88
2.2.2.5.5.	Parámetros Cromáticos.	92
2.2.2.6.	Análisis Estadístico.	93
2.2.2.6.1.	pH del Músculo Cocido, Diferencia de pH, Peso del Músculo Cocido y Pérdida de Peso.	93
2.2.2.6.2.	Resistencia al Corte Evaluada Mediante Cizalla de Warner-Bratzler (Cuchilla Triangular) y Celda de Warner-Bratzler (elemento de corte tipo “V” invertida).	94

2.2.2.6.3.	Resistencia al Corte Evaluada Mediante Celda de Warner-Bratzler (Elemento de Corte tipo “V” invertida). Estudio Comparativo de las Mediciones Realizadas en la Periferia de la Rodaja del Músculo <i>Semitendinosus</i> bovino Respecto de las Mediciones en Toda la Rodaja con Celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida.	95
2.2.2.6.4.	Parámetros Cromáticos.	96
3.	Resultados y Discusión	97
3.1.	Resultados de la Etapa de Modelado y Simulación.	97
3.1.1.	Validación del Modelo Térmico Aplicado en la Esfera.	97
3.1.2.	Obtención de Geometrías de Músculos <i>Semitendinosus</i> bovino a partir de la Deformación de la Esfera.	98
3.1.3.	Modelado y Simulación de Ciclos de Cocción-Pasteurización a Temperatura Constante de Autoclave (CRT) y Temperatura Variable de Autoclave (VRT).	103
3.1.4.	Análisis de la Evolución Térmica, Obtención del Punto de Mínimo Tratamiento (PMT), Tiempo de Procesamiento y Valor de Cocción (CV) para Alcanzar el Valor de Pasteurización (VP)	106
3.2.	Resultados de la Etapa Experimental.	112
3.2.1.	Estudio de la Distribución de Parámetros Característicos de la Penetración de Calor en Músculos <i>Semitendinosus</i> bovino Cocidos-Pasteurizados al Vacío en un Autoclave con Ducha de Agua de Escala Piloto.	112
3.2.1.1.	Obtención de los Parámetros de Penetración de Calor. 112	

3.2.1.2.	Resultados del Análisis Estadístico del Estudio de la Distribución de Parámetros Característicos de la Penetración de Calor en Músculos <i>Semitendinosus</i> bovino Cocidos-Pasteurizados <i>Sous vide</i> en un Autoclave con Ducha de Agua de Escala Piloto.	119
3.2.2.	Validación de los Resultados de la Etapa de Modelado y Simulación de los Ciclos CRT y VRT Aplicados en la Cocción-Pasteurización <i>Sous vide</i> del Músculo <i>Semitendinosus</i> bovino.	121
3.2.2.1.	Comparación entre los Resultados de la Etapa de Modelado y Simulación y la de Experimentación en la Obtención del Valor de Pasteurización (VP), Valor de Cocción (CV) y Punto Mínimo de Tratamiento (PMT).	121
3.2.2.2.	Resultados Correspondientes a pH del Músculo Cocido, Diferencia de pH y Porcentaje de Pérdida de Peso.	133
3.2.2.3.	Resistencia al Corte: Estudio Comparativo entre Dos Elementos de Corte Diferentes (Celda de Warner-Bratzler y Cizalla de Warner-Bratzler) y entre los Tratamientos CRT y VRT.	135
3.2.2.4.	Resistencia al Corte medida con Celda de Warner-Bratzler: Estudio Comparativo entre las Mediciones Realizadas en la Periferia de la Rodaja de Músculos <i>Semitendinosus</i> Cocidos-Pasteurizados y de las Mediciones en Toda la Rodaja.	137
3.2.2.5.	Análisis de Apreciación Visual.	140
3.2.2.6.	Resultados de Parámetros Cromáticos.	142
4.	Conclusiones	145

Indice de Tablas

1.1. Valores límites de temperatura, aw, pH, concentración de sal y demanda de O ₂ respecto al crecimiento de microorganismos relevantes en productos mínimamente procesados y refrigerados.	14
1.2. Requerimientos mínimos para el crecimiento y resistencia térmica del <i>C. botulinum</i>	15
1.3. Tratamientos térmicos recomendados para productos <i>Sous vide</i> aplicados en el punto mínimo de tratamiento (PMT).	16
1.4. Aplicación del Método de Diferencias Finitas en el modelado y simulación de procesos térmicos en alimentos.	35
1.5. Aplicación del Método de Diferencias Finitas en el modelado y simulación de procesos de enfriamiento en alimentos.	36
1.6. Aplicación del Método de Elementos Finitos en el modelado y simulación de procesos térmicos en alimentos.	41
1.7. Aplicación del Método de Elementos Finitos en procesos de enfriamiento en alimentos.	42
2.1. Ejemplo de dimensiones experimentales correspondientes a un músculo <i>Semitendinosus</i> bovino	80
2.2. Ejemplo de planilla utilizada en la prueba pareada simple.	89
2.3. Ejemplo de planilla utilizada en la prueba triangular.	91

3.1. Dimensiones de geometrías de los músculos <i>Semitendinosus</i> bovino generadas considerando la modificación del $\pm 20\%$ de cada una de las dimensiones del músculo patrón.	100
3.2. Resultados del ANOVA correspondientes a los parámetros Δt_{10}^{70} y f_h	119
3.3. Valores medios y desvío estándar de los parámetros Δt_{10}^{70} y f_h correspondientes a diferentes estantes del autoclave con ducha de agua Steriflow Barriquand Modelo Microflow.	119
3.4. Diferencia de tiempo (Δt) entre el Δt_{10}^{70} del estante medio y los tiempos de calentamiento del Δt_{10}^{70} correspondientes a los estantes superior e inferior.	120
3.5. Resultados experimentales para el Bloque 1 y 2 de tiempos de procesamiento (min) para los diferentes procesos de cocción-pasteurización CRT y VRT.	123
3.6. Valores simulados y experimentales de VP_{70}^{10} , PMT y CV_{100}^{33} correspondientes a los Bloques 1 y 2 de los músculos <i>Semitendinosus</i> bovino cocidos-pasteurizados bajo condiciones CRT.	131
3.7. Valores simulados y experimentales de VP_{70}^{10} , PMT y CV_{100}^{33} correspondientes a los Bloques 1 y 2 de los músculos <i>Semitendinosus</i> bovino cocidos-pasteurizados bajo condiciones VRT.	132
3.8. Resultados del ANOVA para el efecto del tratamiento y valores promedio y desvíos estándar (DS) para cada uno de los parámetros evaluados en los músculos <i>Semitendinosus</i> cocidos.	133
3.9. Resultados del ANOVA para el efecto del tratamiento y los valores medios y desvíos estándar (DS) para la resistencia al corte evaluada mediante dos elementos de corte diferentes.	136
3.10. Resultados del ANOVA para el efecto del tratamiento y los valores medios y desvíos estándar (DS) para la resistencia al corte medida en la periferia y en toda la rodaja del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino cocido-pasteurizado y su diferencia por zona de medición.	138

3.11. Resultados del análisis estadístico de los parámetros cromáticos X, Y, Z medidos en una rodaja de la zona central del músculo <i>Semitendinosus</i> cocido-pasteurizado.	142
3.12. Resultados del análisis estadístico de los parámetros cromáticos L*, a*, b* medidos en una rodaja de la zona central del músculo <i>Semitendinosus</i> cocido-pasteurizado.	142
3.13. Valores medios y errores estándar correspondientes a los parámetros cromáticos X, Y, Z medidos en una rodaja de la zona central del músculo <i>Semitendinosus</i> cocido-pasteurizado.	143
3.14. Valores medios y error estándar correspondientes a los parámetros cromáticos L*, a* y b* medidos en una rodaja de la zona central del músculo <i>Semitendinosus</i> cocido-pasteurizado.	144

Indice de Figuras

1.1. Producción mundial de ganado vacuno.	2
1.2. Exportaciones de carne vacuna a nivel mundial.	2
1.3. Principales etapas de las tecnologías <i>Cook-Chill</i>	7
1.4. Cocción de camarones mediante el método <i>Sous vide</i>	9
1.5. Cocción de pollo mediante el método <i>Sous vide</i>	10
1.6. Etapas del sistema de cocción-pasteurización <i>Sous vide</i>	11
1.7. Autoclave horizontal con ducha de agua en escala piloto.	23
1.8. Ciclo a Temperatura Constante de Autoclave (CRT).	24
1.9. Ciclo a Temperatura Variable de Autoclave (VRT).	25
1.10. Discretización de un dominio unidimensional mediante Diferencias Finitas.	31
1.11. Discretización de un dominio unidimensional mediante Elementos Finitos.	37
2.1. Asimetrías del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino.	52
2.2. Utilización de programas comerciales para el diseño y generación de geometrías 3D.	53
2.3. Generación de una pieza esférica.	54

2.4. Transformación de pieza esférica en músculo <i>Semitendinosus</i> bovino.	55
2.5. Etapas de transformación y relajación de la malla interna de elementos finitos del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino.	56
2.6. Simulación del proceso CRT aplicado al músculo <i>Semitendinosus</i> patrón.	62
2.7. Simulación del proceso VRT aplicado al músculo <i>Semitendinosus</i> patrón.	63
2.8. Ensamble y verificación de las curvas de calentamiento y enfriamiento adimensionales del medio de intercambio de calor obtenidas para el sistema de cocción- pasteurización CRT, VRT y del nodo interno 81303 del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino patrón.	64
2.9. Músculos <i>Semitendinosus</i> bovino utilizados para el ensayo de distribución de calor.	67
2.10. Inserción de termocupla tipo T dentro de la pieza cilíndrica de carne envasada.	68
2.11. Esquema operativo del autoclave Sterilflow Barriquand Modelo Microflow.	69
2.12. Autoclave Sterilflow Barriquand Modelo Microflow instalado en planta piloto del ITA, CIA, CNIA, INTA.	69
2.13. Ubicación de los cilindros dentro del canasto del autoclave marca Steriflow Barriquand modelo Microflow.	71
2.14. Verificación de la posición correcta de la termocupla en el centro térmico del cilindro.	72
2.15. Músculos <i>Semitendinosus</i> bovino en los estantes del canasto del autoclave con ducha de agua marca Steriflow Barriquand Modelo Microflow.	75
2.16. Esquema de ubicación de los músculos <i>Semitendinosus</i> bovino en los estantes dentro del canasto del autoclave Steriflow Barriquand Modelo Microflow.	76

2.17. Músculos <i>Semitendinosus</i> bovinos ha ser utilizados en tratamientos térmicos aplicados (CRT-VRT).	77
2.18. Diferentes vistas de un músculo <i>Semitendinosus</i> bovino a ser procesado mediante el ciclo CRT.	77
2.19. Diferentes vistas de un músculo <i>Semitendinosus</i> bovino a ser procesado mediante ciclo VRT.	78
2.20. Etapas de la medición de las dimensiones del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino.	79
2.21. Termocupla flexible tipo T insertada en el músculo <i>Semitendinosus</i> bovino envasado al vacío.	79
2.22. Curvas experimentales correspondientes ala temperatura del agua de la cámara del autoclave y de un músculo <i>Semitendinosus</i> bovino sometido a tratamientos de cocción-pasteurización <i>Sous vide</i> CRT y VRT.	82
2.23. Músculos <i>Semitendinosus</i> bovino cocidos-pasteurizados bajo sistema CRT y VRT utilizados para análisis de apreciación visual y determinación de parámetros cromáticos.	83
2.24. Diferentes vistas del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino cocido-pasteurizado mediante ciclo CRT.	84
2.25. Diferentes vistas del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino cocido-pasteurizado mediante ciclo VRT.	84
2.26. Determinación de peso y pH en músculos <i>Semitendinosus</i> bovino crudos.	85
2.27. Medición de la resistencia al corte de la carne cocida evaluada mediante la técnica de Warner Bratzler, utilizando una cuchilla triangular.	86
2.28. Medición de la resistencia al corte de la carne cocida utilizando una Celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V”invertida.	87
2.29. Extracción de muestras cilíndricas mediante sacabocado.	88

2.30. Gráfico de la Fuerza de corte (N) vs. tiempo (min) obtenida para un cilindro de carne cocido utilizando una Celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida.	88
2.31. Realización de la prueba pareada simple.	90
2.32. Realización de la prueba triangular.	91
2.33. Ubicación de las posiciones dentro de la parte interna del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino cocido para realizar la evaluación de color.	92
2.34. Medición de parámetros cromáticos mediante el colorímetro marca Kónica Minolta Modelo Cr-400.	93
3.1. Validación de la conducción de calor en estado transiente en el modelo esférico.	98
3.2. Vistas LX, LY, LZ del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino patrón modelado.	100
3.3. Vista LX de 3 geometrías del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino correspondientes a Caso patrón, Caso 1 y Caso 4.	101
3.4. Vista LY de 3 geometrías del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino caso patrón, Caso 2 y Caso 5.	101
3.5. Vista LZ de las 3 geometrías del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino Caso patrón, Caso 3 y Caso 6.	102
3.6. Evolución de la temperatura interna del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino patrón durante la fase del <i>CUT</i> del tratamiento de cocción-pasteurización tipo CRT a tiempo adimensional.	103
3.7. Evolución de la temperatura interna del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino patrón durante la etapa de mantenimiento del tratamiento de cocción-pasteurización tipo CRT a tiempo adimensional.	104
3.8. Evolución de la temperatura interna del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino patrón durante la etapa de enfriamiento del tratamiento de cocción-pasteurización tipo CRT a tiempo adimensional.	104

3.9. Evoluciones térmicas adimensionales correspondientes al medio de intercambio de calor (agua, Autoclave CRT y VRT) y al nodo interno (nodo 81303) del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino patrón.	105
3.10. Evoluciones térmicas en tiempo reales correspondientes al medio de intercambio de calor (agua) y el PMT del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino patrón.	107
3.11. Ubicación del punto de mínimo tratamiento (PMT) de todos los Casos de geometrías de músculos <i>Semitendinosus</i> bovinos simulados.	108
3.12. Valor de Cocción superficial (CV_{100}^{33} , min) obtenidos para cada una de las geometrías del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino en la simulación de los tratamientos de cocción-pasteurización CRT y VRT.	110
3.13. Tiempo de procesamiento (min) necesario para alcanzar el Valor de Pasteurización (VP_{70}^{10}) para las geometrías del músculo <i>Semitendinosus</i> bovino en en la simulación de los tratamientos de cocción-pasteurización CRT y VRT.	111
3.14. Curvas de penetración de calor correspondientes al centro térmico de cilindros de músculos <i>Semitendinosus</i> bovino ubicados en el estante medio del canasto del autoclave y evolución de la temperatura del agua en la cámara del autoclave Steriflow Barriquand Modelo Microflow.	113
3.15. Curvas semilogarítmicas de calentamiento en el centro térmico de cilindros de músculos <i>Semitendinosus</i> bovino ubicados en el estante del medio del canasto del autoclave.	114
3.16. Regresión de la parte lineal de una curva semilogarítmica de calentamiento utilizada para el cálculo del parámetro f_h	114
3.17. Gráficos radiales para el parámetro Δt_{10}^{70} , correspondientes a las distintas posiciones dentro de cada estante del canasto para las 3 repeticiones realizadas.	115

3.18. Gráficos radiales para el parámetro f_h , correspondientes a las distintas posiciones dentro de cada estante del canasto para las 3 repeticiones realizadas.	116
3.19. Valores promedio del parámetro Δt_{10}^{70}	118
3.20. Vistas de las dimensiones LY y LZ de diferentes músculos <i>Semitendinosus</i> bovino reales y simulados.	123
3.21. Evoluciones térmicas experimentales correspondientes al bloque 1: PMT de músculos <i>Semitendinosus</i> bovino y agua de la cámara del autoclave bajo condiciones de cocción-pasteurización CRT y VRT. . .	124
3.22. Evoluciones térmicas experimentales correspondientes al bloque 2: PMT de músculos <i>Semitendinosus</i> bovino y agua de la cámara del autoclave bajo condiciones de cocción-pasteurización CRT y VRT. . .	125
3.23. Evoluciones térmicas experimentales y simuladas correspondientes al PMT de un músculo <i>Semitendinosus</i> bovino y agua de la cámara del autoclave bajo condiciones de cocción-pasteurización tipo CRT. . . .	128
3.24. Evoluciones térmicas experimentales y simuladas correspondientes al PMT de un músculo <i>Semitendinosus</i> bovino y agua de la cámara del autoclave bajo condiciones de cocción-pasteurización tipo VRT. . . .	129
3.25. Regresión lineal entre los valores de las resistencias al corte medidas con la Celda de Warner-Bratzler (N) y con la Cizalla de Warner-Bratzler (N).	136
3.26. Regresión lineal entre los valores de resistencia al corte medidos en la periferia de la rodaja vs. los valores correspondientes a toda la rodaja del músculo <i>Semitendinosus</i> cocido-pasteurizado.	138

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes.

1.1.1. Producción Mundial de Ganado Vacuno.

Si bien India es el país con el mayor stock de ganado vacuno, tanto Brasil como China en los últimos años han experimentado un crecimiento importante en cabezas de ganado vacuno mientras que otros países, como Argentina, se presentan estables respecto a su stock, (?). En la **Figura ??** se observa la ubicación de Argentina en un sexto lugar a nivel mundial, con 54 millones de cabezas, luego de India, Brasil, China, Estados Unidos y Unión Europea (UE).

1.1.2. Producción Mundial de Carnes y Proyecciones de la Demanda.

La producción mundial de carnes ha tenido en los últimos años un crecimiento firme y sostenido, alcanzando en el año 2007 los 220 millones de toneladas en sus 3 variantes de carnes más importantes como vacuna, porcina y aviar.

Se estima que hacia el año 2017, la producción mundial de carne vacuna será de

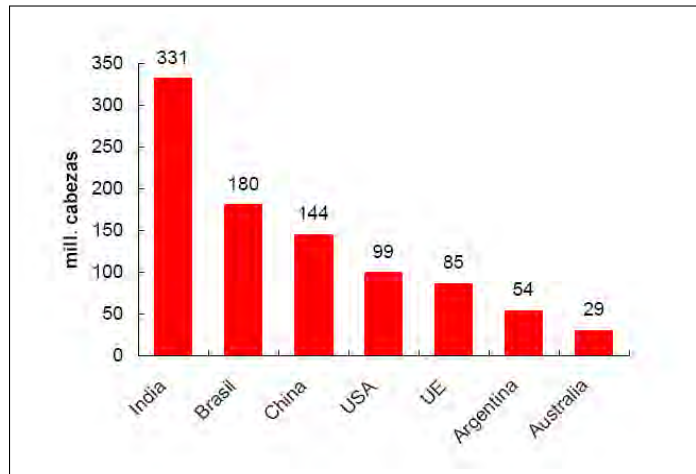
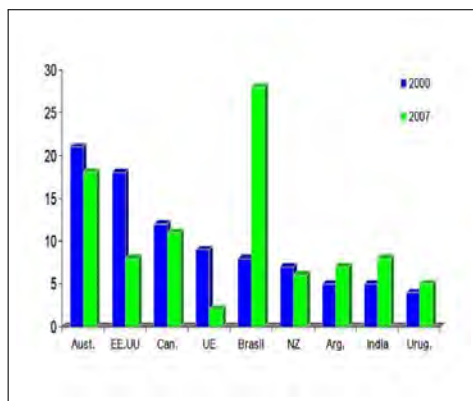


Figura 1.1: Producción mundial de ganado vacuno. Fuente: Rearte, 2007.

63 millones de toneladas. El volumen de comercio internacional se proyecta en 7,6 millones de toneladas, equivalente al 12 % de la producción mundial. El crecimiento de la producción presenta una tasa efectiva anual de 1,4 %, mientras que el comercio lo hace a una tasa de 2,3 %. En las **Figura ??** a y b, se presentan los principales países exportadores de carne vacuna, con el 74 % de las exportaciones mundiales.



(a)



(b)

Figura 1.2: Exportaciones de carne vacuna a nivel mundial. (a) Países exportadores. (b) Ranking de exportadores a nivel mundial. Fuente: Rearte, 2007.

El incremento del ingreso per-cápita combinado con el aumento de la población explicarían el crecimiento proyectado de la demanda mundial de carne. Tradicional-

mente, los países con altos niveles de ingresos se correpondían con los principales importadores de carne. Sin embargo se presentan excepciones como el caso de Brasil, que en los últimos años ha desarrollado mercados para carnes de menor calidad en países con menor nivel de ingreso. Contribuye también a esto la sustitución y cambio de hábitos alimentarios, y el aumento del consumo de carne porcina y aviar. A su vez en el comercio influyen factores climáticos (sequías ó inundaciones), sanitarios (Encefalopatía Espongiforme Bovina, (*BSE*), y Fiebre Aftosa) y factores político-comerciales (cupos, aranceles y subsidios).

Según informes de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (*FAO*) mercados atractivos como China-Hong Kong, Corea del Sur, Egipto y Filipinas (con alta tasa de población), aumentarían sus importaciones de carne un 29 %, 42 %, 54 % y 51 % respectivamente. Se considera además que China hacia el año 2017, se convertiría en un importador neto de carne vacuna con compras por 666 mil toneladas.

Sin embargo en los últimos años, el consumo de carne de vacuna ha experimentado un descenso, tanto en Estados Unidos (44 kg. por habitante y por año), como en la UE (21 kg. por habitante y por año). Entre de las principales causas en el cambio de consumo de carne vacuna se destacan:

- El estilo de vida actual induce a los consumidores a elegir dentro de una gama variada de productos, por ejemplo productos listos para el consumo preparados en base de carne bovina (*Ready to Eat*). También a la hora de enfrentar la góndola del supermercado, los consumidores pueden simplemente elegir y seleccionar platos a base en carnes. Si bien esta última elección es momentánea, se fundamenta en la practicidad de esos productos a un precio razonable.

Actualmente, la mujer cumple el rol de madre y profesional, surgiendo también la necesidad de practicidad, conveniencia en precio, calidad, conservación y nutrición a la hora de elaborar platos preparados para su familia.

- El envejecimiento de la población, como otro factor de cambio en el consumo, con necesidad de una alimentación reducida tanto en colesterol como en grasas, baja en calorías y de fácil digestión.

- En los consumidores más exigentes se observa una nueva tendencia por la comida étnica, tanto en el seno de las colectividades como entre los que desean imitar en sus hogares los platos típicos de cada cocina nacional/regional ofrecida en los restaurantes. Otra tendencia en los nuevos consumidores, es el surgimiento de carnes vacunas orgánicas y el consumo de comida vegetariana (sustentada desde el punto de vista de la protección de los animales a faenar y del medio ambiente).
- El deterioro de la imagen de la carne vacuna también se debe al uso de sustancias prohibidas (por ejemplo hormonas) y problemas sanitarios (*BSE* y Fiebre aftosa).
- El aumento del precio de la carne vacuna respecto a otras carnes, como por ejemplo la carne porcina o aviar. En este sentido, la industria aviar ha puesto su mayor esfuerzo en ganar mercado, atrayendo a los consumidores con ofertas e innovaciones de sus productos con valor agregado y envasados en envases multilaminados (?).

La carne vacuna es un producto no reconocido por su marca como indica ?, quien la define como *unbranded ó commoditty*, debido a que los consumidores de carne en general no poseen el concepto de asociación marca y producto. Entonces se presenta un amplio campo de acción y estrategias de mercado con el fin de atraer a los consumidores, considerando las demandas referente a practicidad (listo para usar o consumir), calidad y costo.

1.2. Innovación Tecnológica e Industrialización del Sector Cárnico.

El procesamiento de la carne se originó con la necesidad de preservarla a lo largo del tiempo. Es sabido que unos de los primeros pueblos en implementar métodos de conservación fueron los romanos, quienes debían recorrer largos trayectos en busca de nuevos territorios a conquistar.

Los métodos de preservación a partir del descenso del valor de a_w , (por adición de sal) y la fermentación son los más antiguos. El conocimiento de estas técnicas es

considerado un arte culinario, (?).

Se consideran 3 períodos que engloban el conocimiento del procesamiento de carnes desde hace 25 años hasta la actualidad. Desde el punto de vista tecnológico, los mismos se encuentran segmentados de la siguiente manera:

1. Período de Calidad.
2. Periodo de Calidad e Inocuidad.
3. Periodo de Calidad, Inocuidad y Nutrición.

- Período de Calidad:

Este período comprende una etapa de 10 años, entre 1980 y 1990. En ese período, la industria cárnica implementó normas de calidad con el objetivo de estandarizar los sistemas de calidad, como por ejemplo las normas Japonesas basadas en las normas ISO 9000. Desde el punto de la conveniencia comercial, los beneficios marcaron la diferencia al solicitar ciertos requerimientos por parte de los compradores hacia los vendedores, además de la obtención de certificados de calidad. El aspecto negativo fue la devaluación de los estándares en pos de la adquisición comercial de los certificados de calidad. En este sentido se estableció una independencia del nivel de calidad elegido con respecto al tipo y grado de certificación que se desea alcanzar. Sin embargo, es importante destacar la evolución que se dio en este período al procesamiento de la carne, siendo inicialmente una actividad artesanal que se convirtió en una ciencia con bases científicas y tecnológicas. Ejemplos de ello, son la utilización de starters para la producción de salchichas fermentadas, la estandarización de materias primas y el aprovechamiento de subproductos de faena de animales (plasma), etc.

- Período de Calidad e Inocuidad:

En 1990 se logró la introducción del sistema *HACCP*, siglas en inglés correspondientes a *Hazard Analysis of Critical Control Points*, luego de una lenta transición entre este período y el anterior. Este sistema de aseguramiento de la calidad ha sido universalmente aceptado y aplicado para garantizar la inocuidad, particularmente en la preparación de productos listos para el

consumo y el comercio internacional de alimentos. Una mayor estandarización de calidad en el procesamiento en productos cárnicos, permitió alcanzar mejores conocimientos tecnológicos, convirtiéndose en un nuevo producto a comercializar y un nuevo desafío para ser controlado desde la visión de la inocuidad. Los sistemas de calidad son considerados la base fundamental de todo sistema que asegure la inocuidad.

■ Periodo de Calidad, Inocuidad y Nutrición:

La carne es uno de los alimentos más apreciados por los consumidores, con niveles de consumo superiores a los del resto de los grupos alimentarios. La cantidad de grasa en la carne vacuna varía según el tipo de pieza, y se sitúa entre el 2,5% y el 5%. La relación entre carne y salud es un tema que plantea controversias. Existe un debate sobre los efectos negativos en la salud humana de una dieta rica en carne, debido a que la carne no contiene fibra y en su grasa predominan ácidos grasos saturados. El consumo elevado de grasas saturadas se ha relacionado con el alto nivel de las lipoproteínas sanguíneas LDL, el llamado *colesterol malo*, mientras que el consumo de grasas insaturadas, especialmente las monoinsaturadas (ácido graso oleico) se ha relacionado con su reducción. Por ello, se ha sugerido que un elevado consumo de carne puede asociarse con la aparición de enfermedades cardiovasculares, hipertensión e incluso con algunos tipos de cáncer. Sin embargo, esta relación no es directa ya que suele darse en casos de consumo excesivo en los que la carne sustituye a otros grupos alimentarios como las legumbres, las verduras y las hortalizas. Las recomendaciones nutricionales indican que como máximo la ingesta de carne ha de ser el 15% del total energético consumido.

Una reciente innovación en la producción y desarrollo de alimentos, orientada a los distintos componentes del circuito HORECA (Hoteles, Restaurants y Catering), la constituye el grupo de tecnologías denominadas *Cook-Chill*. En éstas, los alimentos listos para el consumo, son generalmente elaborados en porciones individuales envasadas al vacío, las cuales son conservadas bajo refrigeración ó congelación, presentando la conveniencia de poder ser calentados en microondas antes de su consumo, **Figura ??**. Entre los productos procesados mediante estas tecnologías, se pueden mencionar: productos preparados en base a carne vacuna, aviar, pescado

así como también productos frutihortícolas (brócoli, choclo, mango, etc).

Las tecnologías *Cook-Chill*, ofrecen la posibilidad de realizar la cocción de alimentos en condiciones controladas de tiempo y temperatura, disociando la etapa de elaboración de la etapa de distribución del producto. Esto es posible debido a que los alimentos se conservan en condiciones de refrigeración ó congelación por períodos de tiempo mayores a los que permiten los sistemas convencionales de cocción.

Tanto el flujo de la producción como la eficiencia son incrementadas al organizar en forma anticipada y centralizada las tareas en una cocina central (en la cual se realiza la preparación, cocción, enfriamiento y almacenamiento de los productos), reduciendo la mano de obra y el uso de insumos. El tiempo disponible se utiliza para efectuar las separaciones en porciones estandarizadas y distribución de las mismas. La mejora de la eficiencia también se ve reflejada en la optimización de equipos e infraestructura disponible. El sistema *Sous vide* es una de las tecnologías *Cook-Chill* más utilizada, siendo antecesores de la misma, el sistema Nacka desarrollado en Suecia y el sistema A.G.S. en Estados Unidos, implementados para la producción de comidas preparadas como papas, carnes, etc. (?).

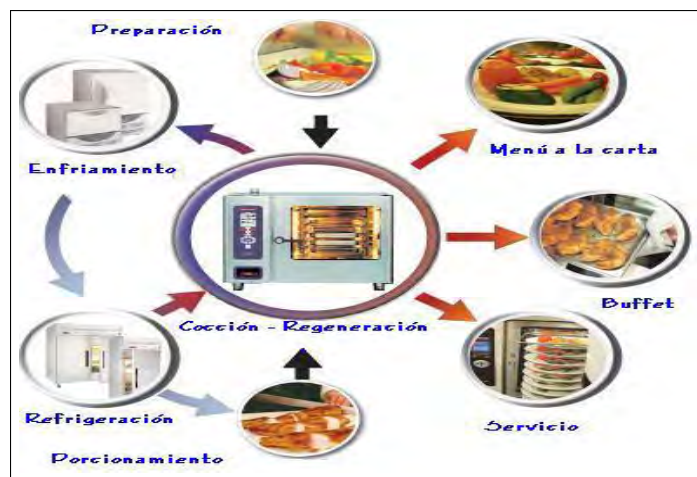


Figura 1.3: Principales etapas de las tecnologías *Cook-Chill*.

1.3. Tecnología *Sous vide*.

En los últimos 30 años, se ha desarrollado y estudiado el sistema de cocción-parteurización de origen francés denominado *Sous vide* (bajo vacío, en francés). Su desarrollo constituyó un esfuerzo por considerar las demandas del consumidor por alimentos libres o con bajo contenido de conservantes, de alta calidad sensorial, vida útil extendida y conveniencia (productos listos para consumir ó productos tipo *Ready to Eat*). Los productos *Sous vide*, incluyen también a los alimentos *REFPED*'s (sigla en inglés correspondiente a *Refrigerated Processed Food of Extended Durability*).

El sistema de cocción *Sous vide*, es considerado una tecnología emergente. Se originó en la cocina francesa, con la denominación *Cuison en papillote*, incluyendo a los alimentos cocidos envueltos en papel. El Chef Georges Parlus de Briennon (Francia) implementó por primera vez esta metodología de cocción en el año 1974, para minimizar la reducción de uno de los platos típicos de la cocina francesa, el *foie grass*. Para ello introdujo el producto en una bolsa plástica realizando posteriormente una cocción controlada en baño de agua. Con este tratamiento, Pralus logró reducir la merma del producto de un 40 a 5 %, consiguiendo además realzar las propiedades sensoriales. Sin embargo, algunos años antes esta técnica culinaria había sido patentada por W. R. Grace. Esta empresa envasaba al vacío alimentos crudos utilizando recipientes de plástico laminado cook in, (?)

La tecnología *Sous vide* permitió a las empresas de catering y foodservices industrializar la producción de platos preparados, debido a la posibilidad de separar en el tiempo y en el espacio las etapas de preparación y cocción de la de consumo. Esto permitió planificar el trabajo y evitar las fluctuaciones típicas del oficio, como las variaciones de consumo durante el día o en días diferentes de la semana, en períodos de vacaciones y por demanda inesperada de clientes (?). En cambio, en la metodología tradicional, se realiza la cocción y luego se sirve, existiendo variables que resultan difíciles de controlar, en particular el tiempo y el mantenimiento del producto en caliente a temperaturas superiores a 65 °C.

Si bien el sistema *Sous vide* fue originalmente implementado a nivel de cocinas centralizadas como por ejemplo las de restaurantes, hoteles u hospitales posteriormente, ese sistema se adaptó a plantas de procesamiento (?). El sistema *Sous*

vide implica la cocción-pasteurización de alimentos frescos o precocidos, envasados al vacío en bolsas de material de plástico termorresistente, como por ejemplo Cloruro de polivinilideno (*PVdC*), Etilvinilalcohol (*EVOH*) o Poliamida (*PA*). El producto se somete a un tratamiento de cocción pasteurización aplicando temperaturas entre 65 °C y 95 °C, (?). Una vez finalizado el tratamiento térmico, el producto es enfriado rápidamente y conservado a temperaturas de refrigeración (0 a 3 °C) ó congelación (-1 °C). Para ser consumido el alimento debe ser recalentado al menos 30 min siendo necesario que la temperatura del centro térmico del alimento mantenida a 70 °C durante 2 min. En servicios de catering se debe garantizar que el plato sea servido a los 15 min posteriores al recalentamiento, siendo la temperatura del centro de 63 °C. En las **Figuras ??** y **??**, se presentan ejemplos de alimentos *Sous vide*: camarones (**Figura ??**) y una pieza de pollo (**Figura ??**) tanto envasados al vacío en bolsa como servidos en plato en la mesa de los consumidores. Asimismo en la **Figura ??** se presentan las etapas del sistema *Sous vide*.



Figura 1.4: Cocción de camarones mediante el método *Sous vide*. (a) Camarones envasados al vacío. (b) Presentación en plato. Fuente: ?.

De acuerdo a lo informado por (??), en el sistema *Sous vide* la aplicación de temperaturas moderadas permite inactivar células vegetativas bacterianas, pero no las formas esporuladas ni las células de los microorganismos termofílicos. A su vez, debido a la baja disponibilidad de oxígeno, las reacciones de oxidación se ven disminuidas así como también el crecimiento de microorganismos aerobios (generalmente alteradores). Estos productos, presentan en general valores de actividad de agua, a_w , y pH elevados y son formulados con pocos o ningún aditivo. Debido a estas condiciones y a la ausencia de microorganismos competidores, se establecen las condiciones para el desarrollo de microorganismos patógenos (??).



Figura 1.5: Cocción de pollo mediante el método *Sous vide*. (a) Pieza de pollo envasada al vacío. (b) Presentación en plato. Fuente: ?.

1.3.1. Categorización de los Productos *Sous vide*.

Los productos *Sous vide* pueden ser categorizados en función de las condiciones de almacenamiento ó de la escala de producción (?), según se indica a continuación:

- Productos tipo *Cook-chill* - Con posterior almacenamiento entre 0 y 3 °C.
- Productos tipo *Cook-Freeze* - Con posterior almacenamiento a -18 °C.
- Realizados *en el hogar* - Pequeña escala de producción.
- Realizados *en industrias* - Gran escala de producción.

A continuación se detallan los principales factores que influyen sobre la inocuidad, la calidad sensorial, nutricional, y la extensión de la vida útil de los productos *Sous vide*:

- Calidad Microbiológica de la Materia Prima.

Uno de los principales factores que afectan la vida útil de los productos *Sous vide* es la calidad microbiológica de la materia prima, siendo crítico su control para asegurar la inocuidad y extender la estabilidad de los productos. Para lograr un producto final de óptima calidad, la materia prima a procesar debe ser controlada desde su provisión, estableciendo especificaciones técnicas relativas a su calidad y



Figura 1.6: Etapas del sistema de cocción-pasteurización *Sous vide*

almacenamiento. La aplicación de las normas HACCP contribuye a controlar el proceso a partir de los puntos críticos de control.

- Formulaciones: Efecto de pH, Sales y a_w .

Otro factor relevante es la formulación, en el caso que el alimento se deba preparar previamente mediante formulaciones específicas. (?), recomienda aplicar un tratamiento térmico de 90 °C durante 10 min en el centro térmico o letalidad equivalente, asegurando además la vida útil del producto mediante una formulación que contemple un $\text{pH} \leq 5$, ó un contenido de sal $\geq 3,5$ %, ó una actividad acuosa,

$a_w, \leq 0,97$.

?, evaluaron las ventajas de incorporar NaCl solo o combinado con concentrado de proteínas de suero nativas, modificadas y tripolifosfato de sodio a músculos *Semitendinosus* bovinos procesados mediante el sistema *Sous vide*. En estos productos la pérdida de jugos durante la cocción, afectó la presentación final del producto e implicó una reducción del rendimiento del proceso. Los autores consideraron que la incorporación de salmueras formuladas con tripolifosfato de sodio y NaCl incrementaron el rendimiento total de los músculos cocidos mediante el sistema *Sous vide*. Dicho incremento fue de un 22 % y 34 %, respecto de los músculos tratados solamente con NaCl y de los músculos de control (sin inyectar) respectivamente.

- Envasado y Aplicación de Vacío.

El fundamento teórico de la cocción bajo vacío, consiste en que la disminución de la presión en el entorno del alimento durante el proceso térmico, permite generar mayor vapor de agua a menor temperatura. Otro factor importante es el llenado del envase y el control de la integridad del sellado de las películas plásticas. Una elevada temperatura del producto a envasar puede producir un efecto adverso ante la aplicación de vacío, debido a la producción de condensación, lo que limita la intensidad del vacío a alcanzar. El envasado al vacío consiste en la eliminación total del aire dentro del envase, sin que sea remplazado por otro gas. Si el proceso se realiza de forma adecuada la cantidad de oxígeno residual resultará inferior al 1 %. En este caso, el material de envasado se pliega en torno al alimento como resultado del descenso de la presión interna frente a la atmosférica. Dicho material debe presentar una permeabilidad muy baja a los gases, incluido el vapor de agua. El nivel requerido de vacío, determina en cierta medida la vida útil del producto. En caso de un tratamiento térmico insuficiente, la intensidad de vacío permitirá reducir el crecimiento de microorganismos aerobios. En el sistema de cocción *Sous vide* resulta indispensable utilizar envases que presenten resistencia térmica (a temperatura de pasteurización) y efecto de barrera al oxígeno (disminución de oxidaciones tanto de lípidos como de proteínas, además de minimizar el desarrollo de microorganismos aerobios alteradores). Además este tipo de envasado evita la pérdida de peso por

evaporación, como sucede con alimentos cocidos por otros métodos. A su vez, impide la volatilización de compuestos aromáticos que realzan la calidad sensorial, así como también evita la recontaminación postproceso al permanecer intacto el sellado del envase plástico, (?).

- Tratamiento de Cocción-pasteurización.

La tecnología *Sous vide* se destaca por extender la vida útil del producto, realzar las propiedades sensoriales y preservar las propiedades nutricionales del mismo, (?). Sin embargo, esta tecnología presenta un riesgo microbiológico importante, asociado a la condición de anaerobiosis que existe en el interior del envase, debido a la evacuación del aire. A su vez, la ausencia de microorganismos competidores y los valores de a_w , pH y de temperaturas de almacenamiento que normalmente presentan los productos *Sous vide*. Los microorganismos patógenos que resultan relevantes para los productos *Sous vide*, son aquellos que siendo anaerobios (estrictos o facultativos) presentan una elevada resistencia térmica y crecimiento a temperatura de refrigeración. En la **Tabla ??** se indican los límites de crecimiento de microorganismos vegetativos y esporulados patógenos relevantes en productos mínimamente procesados y refrigerados, considerando los principales factores que afectan el desarrollo de los mismos (a_w , pH, temperatura, concentración de NaCl y demanda de O_2).

La mayoría de los estudios microbiológicos realizados en productos *Sous vide* se focalizan en 2 patógenos relevantes: *Clostridium botulinum* psicrótrofo y *Listeria monocytogenes*. Los distintos serotipos *Clostridium botulinum*, (proteolítico y no-proteolítico) se caracterizan por su forma bacilar, por ser anaerobios estrictos y Gram positivos. Se encuentran ampliamente distribuidas en el ambiente, suelo, sedimentos y tracto intestinal de animales. Bajo su forma esporulada sobrevive en estado latente hasta ser expuesto a condiciones que puedan sostener su crecimiento. Se conocen 7 tipos de toxinas botulínicas designadas por las letras A hasta la G; sólo los tipos A, B, E y F pueden causar enfermedad (botulismo) en los seres humanos. En la **Tabla ??**, se presentan las principales características y diferencias entre *Clostridium botulinum* proteolítico y *Clostridium botulinum* no proteolítico. En particular, el *Clostridium botulinum* proteolítico se caracteriza por su comportamiento mesófilo con producción

Tabla 1.1: Valores límites de temperatura, a_w , pH, concentración de sal y demanda de O_2 respecto al crecimiento de microorganismos relevantes en productos mínimamente procesados y refrigerados.

Microorganismo	Temperatura Mínima (°C)	a_w Mínimo	pH Mínimo	NaCl Mínimo (%v/v)	Demanda de O_2
<i>Salmonella</i> spp.	4,0	0,94	4,5	4,0	Facultativo
<i>L. monocytogenes</i>	-0,4	0,92	4,3	12,0	Facultativo
<i>A. hydrophila</i>	-0,1	^b	4,0	4,0	Facultativo
<i>Y. enterocolitica</i>	-1,0	0,96	4,2	7,0	Facultativo
<i>S. aureus</i>	6,7 ^a	0,86	4,0	7,5	Facultativo
<i>V. parahaemolyticus</i>	5,0	0,94	4,8	8,0	Facultativo
<i>B. cereus</i>	4,0	0,91	4,3	^b	Facultativo
<i>C. botulinum</i> (B, E, F) psicrótrofo	3,3	0,97	4	5,0	Anaerobio
<i>E. coli</i> O157:H7 y otras VTEC	7,0	0,95	4,0	^b	Facultativo

Fuente: ?.

^a. Sin evidencia de producción de toxina a esta temperatura.

^b. Valor no disponible.

de esporas de alta resistencia térmica. Sin embargo en la esterilización de productos enlatados de baja acidez, las esporas de estos microorganismos son inactivadas, y en caso de ocurrencia de algún brote se corresponde con un inadecuado proceso térmico. Las esporas del *Clostridium botulinum* no-proteolítico (B, E, F), de carácter psicrótrofo y sin producción de cápsula, poseen una resistencia térmica menor a las esporas de *Clostridium botulinum* proteolítico. El serotipo B no proteolítico en particular tiene la capacidad de poder regenerarse y manifestar crecimiento con formación de toxina a 3 °C. El efecto de la neurotoxina es letal, tan sólo 30 ng. de toxina pueden causar la muerte a un ser humano. En general, los casos de botulismo asociado a *Clostridium botulinum* psicrótrofo se han vinculado a pescado ahumado y envasado al vacío, en países como Alemania y Suecia (?). Es por ello que desde el punto de vista de la inocuidad y riesgo microbiológico, este patógeno esporulado es un microorganismo target en la formulación, envasado y procesamiento térmico de productos (?).

La *Listeria monocytogenes* es el microorganismo target en el caso de los microorganismos vegetativos patógenos. Este bacilo Gram positivo, no esporulado, anaerobio facultativo y con movilidad, presenta también una amplia distribución en el ambiente. Se ha aislado a partir de diversas fuentes incluyendo suelo, productos frutihortícolas, ensilados, materia fecal, agua de consumo y aguas residuales entre

Tabla 1.2: Requerimientos mínimos para el crecimiento y resistencia térmica del *C. botulinum*.

	<i>C. botulinum</i> proteolítico	<i>C. botulinum</i> no-proteolítico
Neurotoxina	A, B, F	B, E, F
pH mínimo	4,6	5
Temperatura mínima	10-12°C	3,3°C
NaCl mínimo	10%	5%
Resistencia térmica de la espora ($D_{100^{\circ}\text{C}}$)	> 15 min	< 0,1 min
Alimentos vinculados en brotes de botulismo	Enlatados/Conservas caseras con procesamiento insuficiente	Productos de mar fermentados, pescado desecado, pescado envasado al vacío
Alimentos potencialmente peligrosos	Enlatados	Productos pasteurizados envasados al vacío y refrigerados

Fuente: ?.

otras. Es una bacteria capaz de resistir y crecer en condiciones ambientales adversas como bajo pH (4,3), elevada concentración de NaCl (12%) y temperaturas de refrigeración (-0,4 °C). Debido a su amplia distribución, este microorganismo puede contaminar los alimentos en distintos pasos del proceso de elaboración, siendo ésta la vía más frecuente por la que el ser humano se infecta con el mismo. Los cuadros de listeriosis son causados en su mayoría por la ingesta de alimentos contaminados, destacándose los productos listos para consumir que presentan un tiempo de conservación prolongado en condiciones de refrigeración. Bajo estas condiciones, se produce un elevado recuento de este microorganismo. ?, informaron que los recuentos de este microorganismo en productos tipo *Sous vide* ascendían a 10^6 UFC/g en un lapso de 2 semanas a 3 °C. A nivel internacional se han sugerido distintos protocolos de cocción-pasteurización basados en ambos microorganismos target (*Clostridium botulinum* psicrótrofo y *Listeria monocytogenes*), según se indica en la **Tabla ??**.

El tratamiento térmico a aplicar será seleccionado en función de la vida útil (corta o extensa) deseada para el producto. Para productos con vida útil reducida (5 a 10 días) se debe diseñar el proceso de cocción-pasteurización para alcanzar 6 reducciones decimales de *L. monocytogenes*, ello se consigue con el tratamiento 70 °C - 2 minutos, o equivalentes, aplicados en el punto de mínimo de tratamiento (PMT) del producto. Sin embargo, estos tratamientos resultan insuficientes para

inactivar esporas de *Clostridium botulinum* no proteolítico. En este caso y para productos de vida útil extendida (mayor a 10 días), varios organismos como (?), (sigla en inglés de Advisory Committee on the Microbiological Safety of Food) del Reino Unido, Campden Chorleywood Food Research Association (?) y la European Chilled Food Federation Association (?) recomiendan aplicar una combinación de temperatura y tiempo de 90 °C durante 10 min, ó letalidad equivalente, en el punto de mínimo tratamiento del producto, de este modo es posible alcanzar 6 reducciones decimales de *C. botulinum* tipo B no proteolítico. En el caso de Francia, los tratamientos se han establecido en base al microorganismo *Streptococcus faecalis*. Este microorganismo, Gram positivo habita el tracto gastrointestinal de humanos y col. mamíferos. Como otras especies del género Enterococos, *Streptococcus faecalis* puede causar infecciones comprometidas en humanos, especialmente en ambiente intrahospitalario. Es indicador de contaminación fecal, por lo que su presencia en alimentos indica falta de higiene o condiciones de conservación defectuosas. Esta situación se exceptua en alimentos en los que interviene como flora bacteriana natural de procesos fermentativos, como es el caso de quesos y embutidos crudos. La legislación de Francia (*Note de Service du 31 Mai*, 1988 y su modificación de 1992; (?)) establece para productos preparados-refrigerados un Valor de Pasteurización

Tabla 1.3: Tratamientos térmicos recomendados para productos *Sous vide* aplicados en el punto mínimo de tratamiento (PMT).

Pasteurización	Vida Útil (días)	Referencia	Microorganismo Target
70°C - 40 minutos 70°C - 100 minutos 70°C - 1000 minutos	6 días en refrigeración 21 días en refrigeración 42 días en refrigeración	Ministère de l'Agriculture (1974, 1988-Francia)	<i>Streptococcus faecalis</i>
70°C - 2 minutos	5 días en refrigeración	DoH(1989)	<i>Listeria monocytogenes</i>
80°C - 26 minutos 90°C - 4,5 minutos	> 8 días en refrigeración	SVAC (1991)	<i>Clostridium botulinum</i> tipo E
90°C - 10 minutos	> 10 días en refrigeración	ICMSF (1992)	<i>C. botulinum</i> tipo B no proteolítico
70°C - 2 minutos	corta	Gould (1996)	<i>Listeria monocytogenes</i>
90°C - 10 minutos	extendida	(ECFF Botulinum Working Party)	<i>C. botulinum</i> tipo B no proteolítico

Fuente: (?).

(VP_{70}^{10}) de 100 min con temperatura mínima de 65 °C en el PMT. Para este caso, la vida útil bajo refrigeración será de 21 días, mientras que con temperatura mínima de 70 °C en el PMT y un $(VP_{70}^{10}) = 1000$ min la vida útil bajo refrigeración establecida será de 42 días. A su vez, en 1995 el *SYNAFAP* (Syndicat National des Fabricants des Plats Préparés) estableció que la vida útil de los productos preparados-refrigerados debe ser determinado por la firma procesadora, siguiendo un protocolo de validación de la vida útil (1/3 del tiempo a 4 °C y 2/3 a 8 °C).

- Etapa de Enfriamiento.

Durante el enfriamiento, como complemento del tratamiento térmico aplicado, en productos *Sous vide* se recomienda descender la temperatura interna hasta 3 °C en 90 min. Esta recomendación se orienta a prevenir el crecimiento de esporas de *Clostridium botulinum* que pudieran haber sobrevivido al tratamiento térmico. Sin embargo puede resultar dificultoso aplicar estas condiciones de enfriamiento en piezas grandes como por ejemplo músculos cárnicos. En el caso de no poder cumplir la recomendación antes mencionada, se puede disminuir desde 50 a 10°C alcanzado en 4 h según el requerimiento de la normativa de EE.UU.

- Almacenamiento y Vida Útil.

La *ACMSF* ha recomendado para evitar el desarrollo de *Clostridium botulinum* no proteolítico y extender la vida útil por un período mayor a 10 días las siguientes consideraciones:

1. Almacenamiento a $< 3,3$ °C.
2. Almacenamiento a ≤ 5 °C y vida útil ≤ 10 días.
3. Almacenamiento a 5 - 10 °C y vida útil ≤ 5 días.
4. Almacenamiento a ≤ 10 °C combinado con un tratamiento térmico previo de 90 °C -10 min o letalidad equivalente.
5. Almacenamiento a temperatura de refrigeración combinado con pH del alimento ≤ 5 .

6. Almacenamiento a temperatura de refrigeración combinado con una concentración de NaCl $\leq 3,5$ % en fase acuosa.
7. Almacenamiento a temperatura de refrigeración combinado con actividad de agua $a_w \leq 0,97$.
8. Aplicación de un tratamiento térmico combinado con otros factores de preservación, demostrando la inhibición el crecimiento del *Clostridium botulinum* no proteolítico, como así también la producción de toxina.

Se debe señalar que la limitación de la vida útil de productos *Sous vide*, se establece por razones de inocuidad (limitar el desarrollo de *Clostridium botulinum* no proteolítico) y no por alteración de naturaleza microbológica ó sensorial.

- Recalentamiento.

Antes de ser servidos los alimentos de tipo listo para consumir, como es el caso de los productos *Sous vide*, deben ser recalentados. Para ello se recomienda calentar el alimento durante 30 min siendo necesario que la temperatura interna alcance 70 °C y sea mantenido durante 2 min. En servicios de catering se debe garantizar que los platos sean servidos a los 15 min posteriores al calentamiento, siendo la temperatura del centro de 63 °C.

1.3.2. Efecto del Sistema *Sous vide* sobre Atributos Sensoriales y Propiedades Nutricionales. Efecto sobre Vida Útil.

Se destaca, que es escasa la bibliografía disponible respecto a los atributos sensoriales y características nutricionales de los productos *Sous vide*, debido a que, en general, el énfasis en la investigación se ha puesto en los estudios sobre inocuidad y estabilidad microbológica. Los trabajos científicos referentes a aspectos sensoriales y nutricionales, se basan mayoritariamente en estudios comparativos entre la cocción tradicional y el sistema *Sous vide*.

?, indicó que las modificaciones de las propiedades sensoriales y nutricionales en alimentos procesados mediante el sistema *Sous vide* son consecuencia del propio

proceso térmico, según las condiciones de tiempo y temperatura aplicadas para alcanzar la inocuidad del producto. A su vez, durante el almacenamiento del producto en condiciones de refrigeración también se producen modificaciones de los atributos sensoriales y características nutricionales.

En el caso de carne bovina, la tecnología *Sous vide* a diferencia de las tecnologías convencionales, permite mejorar la terneza debido a la desnaturalización del colágeno y la conversión de éste en gelatina. Además minimiza la reducción de la pieza y la pérdida de jugos cárnicos. Sin embargo, este efecto depende del tratamiento térmico aplicado. [1] evaluaron la aplicación del sistema *Sous vide* en productos cárnicos. Así [2], estudiaron esta tecnología en la preparación de platos listos para el consumo como bifés con salsa criolla, evaluando la calidad sensorial y estabilidad durante su almacenamiento bajo refrigeración (0 - 3 °C). A su vez, [3], estudiaron el efecto de bajas temperaturas (50 a 65 °C) a durante largos tiempos de cocción pasteurización (90 - 360 min) sobre los parámetros tecnológicos, las propiedades fisicoquímicas y la estabilidad durante el almacenamiento refrigerado de músculos *Semitendinosus* bovino. Esos tratamientos fueron eficaces sólo en la inactivación de células vegetativas e insuficiente para la inactivación de esporas de *Clostridium botulinum* no proteolítico. Los autores observaron mejoras tanto en la textura como también en la jugosidad. Además observaron el efecto de los distintos tratamientos térmicos sobre el parámetro a^* de color. En particular, [4] aplicaron una combinación temperatura-tiempo de 70 °C - 2 min en el PMT de músculos *Semitendinosus* bovinos inyectados con aditivos convencionales (NaCl) y concentrados de proteína láctea (nativa o modificada). Se estudió el efecto de estos aditivos sobre parámetros tecnológicos, propiedades fisicoquímicas, atributos sensoriales y microestructura de las piezas cárnicas cocidas bajo sistema *Sous vide*.

Los cambios sensoriales observados en productos *Sous vide*, se deben frecuentemente al desarrollo de off-olores producidos por microorganismos anaerobios. [5], incorporaron especias a carne cocida mediante el método *Sous vide*, con el fin de enmascarar los cambios sensoriales producidos durante el almacenamiento bajo refrigeración (23 días a 2°C) y extender así la calidad sensorial del producto. Sin embargo, los evaluadores entrenados detectaron una progresiva pérdida del sabor, olor y color propios de la carne recién cocida, debido al avance de los procesos oxidativos, junto con la pérdida de líquido de cocción. En carnes cocidas, el desarrollo de

sabores indeseables (denominado sabor a recalentado o *warmed-over-flavour*, *WOF*) se encuentran vinculados con el desarrollo de la oxidación de lípidos (?). El contenido de ciertos nutrientes como por ejemplo, ácidos grasos insaturados, favorecen los procesos de oxidación en el pescado, ocasionando una pérdida de calidad sensorial por el desarrollo de rancidez. ?, observó que la retención de ácidos grasos insaturados en productos *Sous vide* (tratados a 65 °C) fue mayor que en los cocidos en la forma tradicional, utilizando temperaturas altas (superiores a 85 °C). A su vez, fue mínima la diferencia en el contenido de ácidos grasos saturados entre el producto tratado mediante el sistema *Sous vide* y el método tradicional .

?, realizaron estudios con platos preparados a base de carne vacuna y de pollo, los cuales fueron sometidos térmicamente mediante dos tratamientos diferentes (70 °C - 900 min y 90 °C - 45 min), posteriormente, los mismos fueron almacenados a 1,5 °C durante 40 días. Los resultados obtenidos a partir de las pruebas de panel sensorial como las microbiológicas indicaron el nivel de aceptabilidad durante el lapso de almacenamiento, manteniendo la frescura, conveniencia y calidad de un producto refrigerado. Al mismo tiempo, ?, estudió la calidad microbiológica de platos *Sous vide* preparados a base de carne vacuna, pollo, cordero y pescado, cocinados aplicando el tratamiento de 70 °C - 2 min en el PMT, y conservados hasta 5 semanas a 3 y 8 °C. Entre los principales resultados de este estudio, se puede mencionar la aceptabilidad de los productos durante el período de almacenamiento sometidos a una temperatura de 3 °C.

Desde el punto de vista nutricional, la aplicación de tratamientos térmicos moderados y el efecto del envasado a vacío, hacen de la tecnología *Sous vide* un método de cocción adecuado para obtener alimentos con alta calidad (?). Las vitaminas de interés en el sistema *Sous vide* son la Tiamina (Vitamina B1), la Riboflavina (Vitamina B2), y el Ácido Ascórbico (Vitamina C), siendo este último utilizado como indicador del efecto de los procesos térmicos. La temperatura de tratamiento, cantidad de oxígeno, luz, humedad y pH son algunos de los factores que afectan la degradación de las vitaminas durante el tratamiento térmico de los alimentos. (?) y (?), estudiaron la retención de Vitaminas B en bife bourguignon, carne de ternera, cordero y cerdo. También evaluaron la pérdida de Vitamina C, B1 y folatos en hortalizas como papa, zanahoria, arvejas y coliflor. Estos autores concluyeron que el sistema *Sous vide* permitió minimizar la pérdida de vitaminas por

oxidación, respecto a los sistemas de cocción tradicionales. Sin embargo las vitaminas fueron eliminadas durante el almacenamiento y el recalentamiento.

1.4. Protocolos de Cocción-Pasteurización.

En el caso de alimentos líquidos o semilíquidos envasados, donde predomina la transferencia de calor por convección, el tipo de Protocolo de Pasteurización que normalmente se aplica consiste en alcanzar una determinada temperatura en toda la masa del alimento y mantener un tiempo equivalente al tiempo de muerte térmica (a la temperatura especificada) necesario para producir una determinada reducción decimal del recuento del microorganismo indicador. En el caso de alimentos sólidos o semisólidos, en los cuales predomina el mecanismo de transferencia de calor de conducción, el protocolo puede estar basado en la aplicación de una determinada combinación temperatura-tiempo en el PMT (similar al descrito para alimentos líquidos) o bien alcanzar una determinada temperatura y acumular un Valor de Pasteurización Requerido, $(VP_{Tref}^z)_{Requerido}$. Este parámetro indica el tiempo de muerte térmica (a la temperatura de referencia T_{ref}) correspondiente a un número determinado de reducciones decimales del microorganismo indicador (caracterizado por el parámetro z). Las T_{ref} que normalmente se utilizan en pasteurización son 65 °C, 70 °C, 80 °C o 90 °C, (ver **Ecuación ??**). A su vez, el Valor de Pasteurización del Proceso, $(VP_{Tref}^z)_{Proceso}$, equivale al tiempo de calentamiento isotérmico, a la temperatura de referencia T_{ref} , que permite alcanzar la misma letalidad que la acumulada por el conjunto de las combinaciones temperatura-tiempo letales aplicadas en el PMT del alimento durante el proceso.

$$(VP_{Tref}^z)_{Requerido} = D_{Tref} \cdot (\log C_{mo}^o - \log C_{mo}) \quad (1.4.1)$$

donde D_{Tref} es el tiempo de reducción decimal, a la temperatura de referencia y $(\log C_{mo}^o - \log C_{mo})$ representa el número de reducciones decimales del microorganismo indicador. En particular $(\log C_{mo}^o)$, es el logaritmo de la concentración inicial del microorganismo, mientras que $(\log C_{mo})$ es el logaritmo del recuento final del microorganismo indicador.

El $(VP_{T_{ref}}^z)_{Proceso}$ se calcula a partir de la curva de penetración de calor correspondiente al PMT del alimento y el valor z del microorganismo indicador, aplicando la siguiente relación:

$$(VP_{T_{ref}}^z)_{Proceso} = \int 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt \quad (1.4.2)$$

En forma similar al cálculo de la letalidad de proceso en los tratamientos de esterilización dentro del envase (valor $F^z_{T_{ref}}$), el Valor de Pasteurización del Proceso se puede calcular considerando no solo la porción de la curva correspondiente al calentamiento sino también la primera parte de la etapa de enfriamiento, debido a que la misma también aporta letalidad. En este sentido, se puede realizar el cálculo del $(VP^z_{T_{ref}})_{Proceso}$ considerando la porción de la curva de penetración de calor comprendida entre una determinada temperatura en el calentamiento y el mismo valor de temperatura en el enfriamiento. Este valor de temperatura dependerá del microorganismo seleccionado como indicador. La aplicación de un protocolo de cocción-pasteurización en sistemas *Cook- Chill* definido en términos del Valor de Pasteurización, respecto a un protocolo basado en la aplicación de una combinación temperatura-tiempo en el PMT, permitiría reducir el tiempo total del proceso y minimizar el efecto del tratamiento térmico sobre los factores de calidad del alimento (?). Según se indicó en el ítem ??, a nivel internacional existen diferentes criterios para el diseño del tratamiento de cocción-pasteurización de alimentos cocidos al vacío (?). Uno de esos criterios define como microorganismo indicador al serotipo más termorresistente de *Clostridium botulinum* no proteolítico psicrotrofo (B) y otro criterio establece como microorganismo indicador a *Listeria monocytogenes*. El primer criterio es de aplicación en el diseño del tratamiento de cocción-pasteurización de alimentos de vida útil extendida (Refrigerated Processed Foods of Extended Durability, *REPFED's*) mientras que el segundo criterio se orienta al tratamiento de alimentos de vida útil corta. A su vez, Francia ha utilizado tradicionalmente el microorganismo *Streptococcus faecalis* como base del diseño de los tratamientos de cocción-pasteurización (?). En el año 2005, la Comisión de la Unión Europea (UE), estableció para Argentina, entre otros países, la posibilidad de exportar carne bovina cocida a la UE siempre que la materia prima se adecue a los requisitos y la misma haya sido tratada mediante el Protocolo de Pasteurización denominado "F", ?. Este

protocolo establece que el tratamiento térmico debe ser aplicado de modo de asegurar una temperatura de al menos 65 °C en el PMT del producto, durante un tiempo que garantice al menos un Valor de Pasteurización (VP_{70}^{10}) = 40 min. En el caso del Protocolo “F” el Valor de Pasteurización de 40 min equivale al tiempo de muerte térmica a 70 °C necesario para alcanzar 13 reducciones decimales de *Streptococcus faecalis* ($D_{70} = 2,95$ min y $z = 10$ °C; $(VP_{70}^{10}) = 13 D_{70} = 38,35$ min).

1.4.1. Tratamientos Térmicos a Temperatura Constante (CRT) y a Temperatura Variable (VRT) de Autoclave.

El tratamiento de pasteurización de alimentos envasados se puede realizar en sistemas continuos o discontinuos, dependiendo de la cantidad de producto a procesar, tipo de alimento, etc. Los sistemas discontinuos más utilizados consisten en cisternas con agua, hornos convectivos y autoclaves que funcionan con mezclas vapor/aire ó agua/aire. Además, los autoclaves que funcionan con agua pueden ser tipo ducha de agua o baño de agua **Figura ??**. A su vez, estos pueden funcionar en forma estática o con rotación de los canastos de tipo fondo-tapa-fondo (*end-over-end*). Los diseños más avanzados incluyen la mezcla de vapor, ducha de agua y aire.



Figura 1.7: Autoclave horizontal con ducha de agua en escala piloto. Fuente: ?

En las **Figuras ??** y **??**, se presentan ejemplos de tratamientos térmicos de cocción-pasteurización que se pueden aplicar en esos autoclaves. Los mismos suelen ser del tipo Temperatura Constante de Autoclave (CRT, sigla que surge del nombre

en inglés *Constant Retort Temperature*). Estos ciclos incluyen una etapa inicial llamada *come up time* (*CUT*), que se define como el tiempo necesario para que la temperatura del medio calefactor alcance la temperatura de régimen. Luego del *CUT*, un ciclo CRT incluye una etapa de mantenimiento a temperatura constante (*holding time*). La extensión de esta etapa dependerá del Protocolo de Pasteurización que se aplique. Luego comienza la etapa de enfriamiento (*cooling time*), la cual constituye la última etapa del ciclo CRT. Esta también aporta letalidad según se ha indicado en los párrafos precedentes. Para una combinación dada de alimento, envase, temperatura de los medios calefactor y refrigerante, temperatura inicial del alimento y microorganismo indicador, existe una relación biunívoca entre el proceso CRT y la letalidad que este aporta.



Figura 1.8: Ciclo a temperatura constante de autoclave (CRT).

En los últimos años se ha dado un creciente interés por la optimización de los procesos térmicos en autoclave, en este sentido se han aplicado diferentes estrategias como el ciclado térmico, también denominado tratamiento con temperatura variable de autoclave, *VRT* (sigla del nombre en inglés *Variable Retort Temperature*). Aunque también es apropiado el término tiempo variable utilizado para caracterizar a este tipo de procesos.

Debido a que no es posible reducir la cantidad de calor a entregar al alimento (definido por la letalidad que se debe alcanzar), la optimización del tratamiento

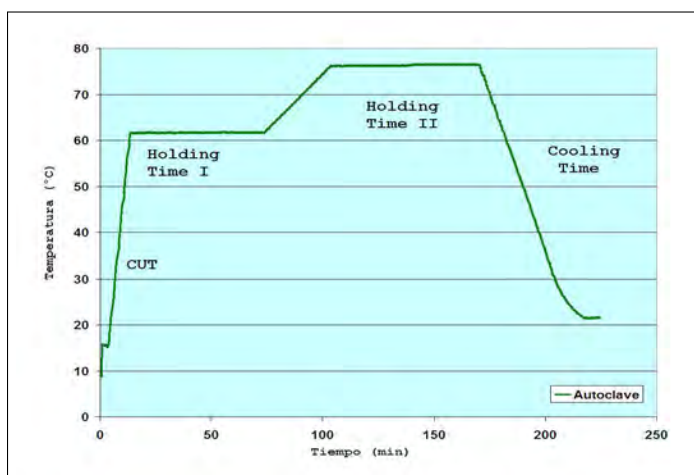


Figura 1.9: Ciclo a temperatura variable de autoclave (VRT).

térmico puede ser abordada fundamentalmente a través de 2 vías. Una de las formas posibles es incrementar la velocidad de transferencia de calor a los puntos críticos del alimento y la otra consiste en mejorar la distribución de calor dentro del alimento. Ambas alternativas han sido exitosas en alimentos fluidos. Así, los tratamientos de alta temperatura-corto tiempo (HTST) y ultra-alta temperatura (UHT) se aplican a alimentos líquidos a semilíquidos en sistemas de flujo continuo que incorporan intercambiadores de calor, donde la transferencia es de naturaleza convectiva (??). Estos tratamientos se fundamentan en que la cinética de inactivación térmica de los microorganismos y enzimas es más sensible a los cambios de temperatura que la cinética de destrucción térmica de los factores de calidad. En estos tratamientos, el alimento es calentado en forma casi instantánea, mantenido a alta temperatura durante el tiempo de mantenimiento necesario para alcanzar la letalidad requerida, rápidamente enfriado y finalmente envasado en forma aséptica. A su vez, el calentamiento dentro del envase de alimentos fluidos o semifluidos puede ser acelerado mediante convección forzada del producto, lo cual se logra por agitación axial o fondo-tapa-fondo del envase (?). Esto permite incrementar la velocidad de penetración de calor, mejorar la renovación superficial del alimento y reducir su sobreprocesamiento en la proximidad de la superficie del envase. Los alimentos sólidos no pueden ser procesados mediante los tratamientos descritos (sistemas de flujo + envasado aséptico y agitación dentro del envase) y poco puede ser realizado para

incrementar la velocidad de transferencia de calor. Sin embargo, si fuese posible mejorar la uniformidad del calentamiento dentro del alimento, se podría mejorar la calidad del producto y reducir el consumo de energía. En este sentido, las estrategias VRT constituyen una aproximación interesante a esa alternativa.

Resulta importante destacar que la mayoría de los estudios VRT informados en la bibliografía corresponden a alimentos esterilizados (?????), siendo escasos los trabajos correspondientes a productos cocidos-pasteurizados. Uno de los primeros trabajos en los que se destacan las ventajas del VRT frente a los tratamientos térmicos tradicionales fue publicado por ?. ? y ?, previamente habían informado la utilización de fórmulas teóricas y derivadas aplicadas a alimentos de formas regulares. Para ello los autores tomaron como punto de partida el teorema de Duhamel's, el cual se centra en la solución analítica de la ecuación general de conducción de un cuerpo en un cuerpo regular, a fin de obtener una respuesta en el tiempo, ante una excitación de temperatura externa o interna del cuerpo utilizando de factores respuesta. Sin embargo, no todas las fórmulas fueron posibles de aplicar a los procesos de esterilización, en consecuencia, los autores utilizaron fórmulas de distribución térmica variable en el tiempo aplicadas comúnmente a tratamientos térmicos de esterilización comercial. A través de estas formulas calcularon los valores f , f_c , j y j_c de las curvas de calentamiento y de enfriamiento respectivamente. Además, otros resultados obtenidos en estos estudios fueron gráficos de respuesta o cartas utilizados en procesamiento térmico de productos enlatados.

?, aplicaron algoritmos ICRS (siglas en inglés de *Integrated Controlled Random Search*), y funciones objetivo para evaluar la retención superficial de nutrientes como tiamina, y los tiempos mínimos de proceso. Estos autores trabajaron en el diseño de procesos térmicos VRT y CRT aplicados a alimentos enlatados (puré de peras y puré a base de carne porcina) obteniendo resultados favorables para las funciones evaluadas en VRT.

Otros autores como ? y ?, han dirigido sus estudios hacia la optimización del proceso esterilización térmica de productos enlatados (productos de mar) utilizando ciclos VRT. Estos autores evaluaron al proceso en relación a la eficiencia energética y el consumo de vapor durante el tratamiento térmico. La utilización de la técnica de optimización a partir de funciones objetivo, mejoró la performance del diseño

térmico permitiendo lograr el menor consumo de energía ó tiempo de proceso ó ambos. Simultáneamente, se cumplió con los requisitos de inactivación microbiana y mejoró la calidad.

? también utilizaron algoritmos matemáticos y funciones objetivo en cuerpos regulares como placas infinitas, cilindros infinitos y esferas, con la ventaja frente a ? de incorporar la variación de parámetro z para caracterizar la retención de factores de calidad, de considerar microorganismos con letalidades target y características del alimento. ? aplicaron también estrategias VRT, en la esterilización de salmón enlatado, confirmando las ventajas de este sistema. En los últimos años, nuevas alternativas en la optimización de tratamientos VRT involucran la innovación en el uso de envases, como los retortables (??). Además se continúa maximizando la calidad de los alimentos y reduciendo los tiempos de procesamiento a partir de la implementación de redes neuronales y algoritmos genéticos (?).

En el caso particular del tratamiento térmico de piezas grandes de carne o músculos completos, resultaría importante reducir la diferencia de temperaturas dentro de ellas, a fin de minimizar diferencias en los factores de calidad (fundamentalmente terneza, jugosidad y color) entre el centro y la superficie de las mismas. Asimismo, la aplicación de un tratamiento térmico en forma escalonada permitiría minimizar el efecto del proceso sobre las proteínas miofibrilares ya que su desnaturalización contribuye al endurecimiento de las piezas, a la vez de posibilitar la solubilización del colágeno, lo cual contribuye a su tiernización. La reducción del perfil interno de temperaturas también permitiría incrementar la capacidad de retención de agua (CRA) del tejido cárnico y disminuir en consecuencia la pérdida de peso por cocción. Las estrategias de ciclado VRT presentan las ventajas descriptas pero no siempre son factibles de aplicar a escala industrial debido a la inercia térmica que presentan los equipos para tratamiento térmico. Los autoclaves de última generación, como los que utilizan ducha de agua, permiten la aplicación de estrategias VRT debido a que responden en forma rápida a los cambios en las variables operativas.

1.4.2. Uniformidad en el Calentamiento y Enfriamiento de Alimentos Envasados en Equipos de Tratamiento Térmico.

En la industria procesadora de alimento *Sous vide* a menudo se controlan los tratamientos de cocción-pasteurización de los productos a través del seguimiento de la combinación temperatura-tiempo aplicada en el equipo de tratamiento térmico. Sin embargo, los protocolos internacionales recomiendan que el control del tratamiento se realice en el PMT del alimento (?). Ello se debe a que los envases de material plástico multilaminado pueden deformarse al ser colocados en los canastos de los equipos como consecuencia de su menor estabilidad mecánica en comparación con otros tipos de envases (latas, frascos de vidrio). Debido a que el ensayo para determinar una curva de penetración de calor es de tipo destructivo, por cada corrida solo se monitorean uno o dos envases. En consecuencia, resulta indispensable conocer la uniformidad en la transferencia de calor que se logra en los equipos de tratamiento térmico, a fin de establecer las posiciones más adecuadas para el monitoreo de la curva de penetración de calor. Ello evitaría que se evalúe un envase ubicado en la zona más favorecida en relación con el calentamiento, lo que podría determinar el subprocesamiento de los productos ubicados en posiciones menos favorecidas (?). Existen antecedentes en relación a importantes variaciones en la velocidad de calentamiento que se presentan en los equipos utilizados para cocción-pasteurización *Sous vide* de alimentos. Así, por ejemplo, ? realizaron un estudio en el cual evaluaron las diferencias en los tiempos de calentamiento para alcanzar una cierta temperatura en el centro térmico de discos de papas cocidas-pasteurizadas *Sous vide* que se presentaron en distintos hornos de convección. En ese trabajo se observaron importantes variaciones en la velocidad de calentamiento entre los envases ubicados en distintos estantes en el interior de los hornos. El envase más lento requirió entre 1,7 y 3 veces (dependiendo de la cantidad de estantes del horno convectivo) más de tiempo en alcanzar la temperatura especificada en comparación con el envase más rápido. A su vez, los autores de ese trabajo concluyeron que ninguno de los hornos evaluados permitió realizar un tratamiento *Sous vide* uniforme, particularmente cuando los equipos operaron al máximo de su capacidad. Además de las características de los equipos, se pueden mencionar otros factores críticos que afectan la distribución y la penetración de calor, ellos son: temperatura del autoclave, temperatura inicial del producto, tipo de producto y envase, configuración (loading pattern o layout) y tamaño (cantidad de

envases) de carga en el canasto, suministro de servicios auxiliares y características de las tuberías de alimentación de fluido calefactor. En virtud de los antecedentes presentados en los párrafos previos, resulta entonces necesario determinar parámetros que nos permitan evaluar la performance del equipo en relación con la uniformidad en la transferencia de calor. Algunos de esos parámetros son el tiempo de calentamiento necesario para alcanzar una temperatura específica ó la inversa de la pendiente de la curva semilogarítmica de calentamiento (normalmente denominado parámetro f_h). Una vez establecida la/s posición/es más desfavorable/s en el equipo de tratamiento térmico, se determinaría la curva de penetración de calor únicamente en las piezas ubicadas en las mismas.

1.5. Modelado y Simulación de Procesos Térmicos en Alimentos.

El procesamiento térmico es uno de los procesos más importantes dentro de la industria de los alimentos. A finales de la década de los '60, comenzaron a desarrollarse los primeros modelos térmicos basados en métodos computacionales aplicados a la ciencia y tecnología de los alimentos a cargo de autores reconocidos como es el caso de ?. El modelado numérico aplicado a tratamientos térmicos constituye una herramienta útil a la hora de realizar cálculos de la letalidad u obtener el tiempo de proceso, así como también para realizar estudios de sensibilidad paramétrica y establecer el efecto de los tratamientos térmicos sobre los atributos sensoriales y propiedades nutricionales de los alimentos. El uso de herramientas de cálculo en el diseño correcto del proceso puede ayudar a interpretar el comportamiento de los alimentos ante condiciones más realistas como la anisotropía, formas irregulares, dependencia temporal de las condiciones de temperatura impuestas. Sin embargo, es preciso validar los modelos mediante ensayos experimentales. De esta manera, se recrea el proceso simulado permitiendo incorporar detalles experimentales como valores reales de temperatura, tiempos de procesos, etc.

Los procesos térmicos implementados en alimentos sólidos se basan, en su gran mayoría, en la transferencia de calor por conducción y agua por difusión de materia. En consecuencia, la transferencia de calor en sólidos, puede ser modelada con la

ley de conducción de calor de Fourier, mientras que la transferencia de masa puede realizarse a partir de la ley de difusión de Fick. Si se tratase de alimentos fluidos, se deben contemplar en conjunto las leyes de conservación de masa, momento y energía dentro del fluido. En este sentido, para describir el comportamiento del fluido se utiliza la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes (?).

En general, los modelos pueden ser resueltos en forma analítica siempre y cuando se trate de una geometría relativamente sencilla, sin embargo no representan adecuadamente el fenómeno térmico y las formas reales de los alimentos. Comúnmente, en la resolución de los modelos térmicos se aplican tanto el Método de Diferencias Finitas (MDF) como el de Elementos Finitos (MEF). En los últimos años, además se ha incorporado el uso del método de los Volúmenes Finitos para la interpretación del comportamiento de alimentos fluidos.

Para ejemplificar los métodos MDF y MEF, se presenta a continuación un problema simple de conducción de calor unidimensional en estado estacionario con fuente interna de calor, con una condición de temperatura especificada en un extremo del dominio y otra de convección hacia un medio ambiente externo en el extremo opuesto.

Consideremos el problema de encontrar el campo de temperaturas $T(x)$ que satisface la siguiente ecuación y condiciones de borde:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + Q = 0 \quad ; \forall x \in (0, L) \\ T|_{x=0} = T_0 \\ q|_{x=L} = h(T_L - T_\infty) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1.5.3) \\ (1.5.4) \\ (1.5.5) \end{array}$$

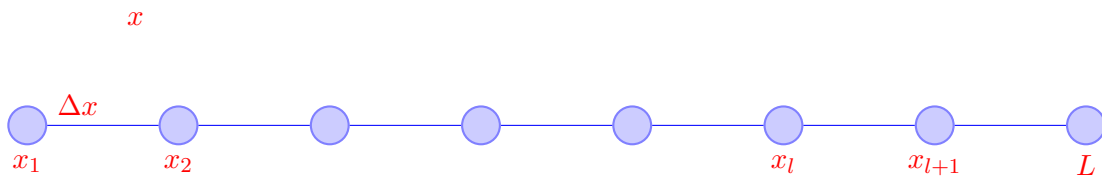
dónde k es la conductividad térmica del material, Q es la fuente de calor, T_0 y T_L son las temperaturas en los extremos del dominio, $q|_{x=L}$ es el flujo de calor en el extremo derecho, T_∞ es la temperatura del ambiente lejos del extremo derecho del dominio, y h es el coeficiente de transferencia de calor por convección.

A continuación, se plantea la solución de este problema por los Métodos MDF y MEF.

1.5.1. Diferencias Finitas

Este método se basa en aproximar los operadores diferenciales de las ecuaciones anteriores por expresiones algebraicas que involucran valores de la variable dependiente, es decir la temperatura T en este ejemplo, en un número de puntos seleccionados del dominio continuo, en este caso $[0, L]$. Estos puntos, llamados nodos x_l , se encuentran en las posiciones $\{x_l\}_{l=1, N+1}$, y componen lo que llamaremos el dominio discreto o “discretizado”. Se buscará aproximar la ecuación diferencial parcial que describe el problema (**Ecuación ??**) por $N + 1$ ecuaciones algebraicas, escritas en términos de los valores $\{T_l\}_{l=1, N+1}$ que toma la variable dependiente en los nodos. Los valores nodales T_l se convierten de esta manera en las incógnitas, que se obtienen resolviendo el sistema algebraico resultante.

Veamos los detalles del proceso. Discretizamos la variable independiente x mediante la construcción de una *grilla* o *malla* de $N + 1$, que para este ejemplo se considerarán equiespaciados una distancia $\Delta x = L/N$, como muestra la **Figura ??**.



Números de Nodos

Figura 1.10: Discretización de un dominio unidimensional mediante Diferencias Finitas.

Aproximando los operadores diferenciales de la Ecuación ?? mediante diferencias centradas, y considerando k constante, se puede escribir la siguiente expresión aproximada para el valor de la segunda derivada de la temperatura en la posición $x = x_l$.

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) \Big|_{x_l} = k \frac{d^2T}{dx^2} \Big|_{x_l} \approx k \frac{T_{l+1} - 2T_l + T_{l-1}}{\Delta x^2} \quad (1.5.6)$$

Aplicando esta aproximación para cada punto interior de la malla $\{x_l\}_{l=2, N}$,

La solución formal de este problema es por supuesto $\mathbf{T} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{f}$. En el caso del ejemplo, puede calcularse en forma eficiente teniendo en cuenta que la matriz \mathbf{K} es simétrica, definida positiva y tridiagonal, utilizando un algoritmo de inversión diseñado para este tipo de sistemas de ecuaciones. En casos más complejos hay que recurrir a técnicas más avanzadas como por ejemplo factorizaciones, gradientes conjugados, etc.

El MDF otorga por lo tanto información acerca de valores de la variable dependiente en los nodos, pero no brinda información acerca de valores de la función entre estos puntos, los cuales deben ser interpolados. Además, debe tenerse siempre presente, que la solución resultante es solo una aproximación a la solución exacta del problema continuo, tanto mejor cuando más fina sea la discretización, es decir, cuanto mayor sea el número de nodos.

Es importante destacar que el MDF es de aplicación relativamente simple en geometrías correspondientes a cuerpos sencillos y regulares, pero su aplicación resulta más complejo sen el caso de geometrías complejas o heterogéneas.

Desde la década del 70 hasta la actualidad, se han publicado un gran número de trabajos aplicando este método para la predicción de temperaturas en procesos de secado, cocción, refrigeración y congelación en el área de alimentos. En numerosos trabajos se ha informado la aplicación del Método de Diferencias Finitas en el modelado de procesos de productos cárnicos (??????). Otros autores también han aplicado este método a diferentes matrices alimenticias y sus procesos de transformación, tales como (????). En procesos de refrigeración y congelación, se destacan los trabajos de autores como (??????).

Es importante reconocer el beneficio de poder articular la resolución de este tipo de problemas con la realidad industrial. En este sentido en el área de procesos de enfriamiento, ?, aplicaron el primer desarrollo a la industria agroalimentaria, utilizando MEF y funciones de transferencia para determinar curvas de tiempo-temperatura de diversos productos agroalimentarios. Luego, ?, utilizaron estas mismas funciones de transferencia con el fin de obtener factores de respuesta, a través de un método experimental de variaciones de temperatura durante el almacenamiento refrigerado de alimentos.

En un extenso trabajo de revisión ?, recopilaron los principales estudios en los cuales se aplicó MDF en el modelado de procesos térmicos de alimentos, a continuación se presenta actualizado.

Tabla 1.4: Aplicación del Método de Diferencias Finitas en el modelado y simulación de procesos térmicos en alimentos.

Procesos	Autores	Afiliación	Modelos		Dimensión	Prop.	Alimento
			Térmico-Másico	Termodependientes			
Secado	Rovedo y otros (1995)	Ciudad Univ., Argentina	si-	si	1D	si	Papas
	Simal y otros (2000)	Univ. de Illes Balears, España	si-	si	3D	si	Aloe Vera
	Ben-Yoshph y otros (2000)	Univ. de Wisconsin Madison, EE.UU.	si-	si	3D	si	Films de azúcar
	Wang y Brennan (1995)	Univ. de Reading, Gran Bretaña	si-si	si	1D	si	Alimentos sólidos
	Thorvaldsson y Janestad (1995)	Inst. de Alim. y Bio., Suecia	si-si	si	1D	si	Pan
	Wang y Chen (1999)	Univ. de Ciencia y Tec, Hong Kong	si-si	si	1D	si	Vegetales
	Erdogdu y otros (1998a, b) (1999)	Univ. de Florida EE.UU.	si-	si	2D-axi	si	Camarón
	Farfak y otros (1996a, b)	Univ. de Carol. Norte, Univ. de Davis, Carolina, EE.UU	si-si	si	1D-axi	si	Papa
	Pan y otros (2000)	Archer Daniels Midland, Cía. Univ. de Davis, Univ. de Carolina, EE.UU	si-si	si	1D-axi	si	Hamburguesa
	Cocción	Akterian (1995) (1997)	Univ. de Alimentos Bulgaria	si	si	1D	si
Ghazala y otros (1995)		Univ. de Newfoundland, Univ. de McGill, Canadá	si-	si	3D	si	Varios
Fasina y Fleming (2000)		Univ. Carol. del Norte, EE.UU	si-	si	2D	si	Pepino
Coulter y otros (1995), Davey y Pham (1997)		Univ. Nueva Escocia Australia	si-	si	1D	si	Carcasas
Evans y otros (1996)		Univ. de Bristol Gran Bretaña	si-	si	1D	si	Salsa
Chau y Gaffney (1990)		Univ. de Florida, EE.UU.	si-	si	1D	si	Tomate
Gowda y otros(1997)		Inst de Ciencia, India	si-	si	2D-axi	si	Vegetales
Califano y otros (1997)		CIDCA,UNLP, Argentina	si-	si	2D	si	Carne Vacuna

Fuente: ??.

Tabla 1.5: Aplicación del Método de Diferencias Finitas en el modelado y simulación de procesos de enfriamiento en alimentos.

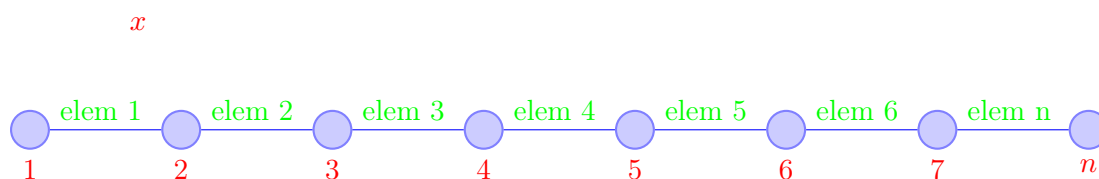
Procesos	Autores	Afilación	Modelos		Dimensión	Prop.		Alimento
			Térmico-Másico	Térmico		Termodependientes	Independientes	
Enfriamiento	De Elvira y col.(1996)	Ciudad Univ., España	si	si	3D	si	si	Alimentos congelados
	Bellara y otros (2000)	Univ. de Birmingham Gran Bretaña	si	si	2D-axi			Varios
	Chuntranuluek y otros (1998a, b, c)	Univ. Kasetsart, Tailandia NZ Ltd. y Univ. Massey, Nueva Zelanda	si	si	1D			Varios
	Ansari (1999)	Univ. Aligarh Muslim, India	si	si	1D-axi			Papas
	Chavez y col. (1997)	Univ. Nac. del Litoral, Ciudad Univ., Argentina	si	si	1D-axi			Papas
Otros	Schmalko y otros (1997)	Univ. Nac. del Litoral, Argentina	si	si	1D-axi	si		
	Sahin y otros (1999)	Univ. Tec. Medio Oriente, Turquía Univ. de Ohio, EE.UU.	si	si	1D	si		Papas
	Salvadori y Mascheroni (1989)	CIDCA UNLP, Argentina	si	si	2D			Carne Vacuna, Pescado, Papas, etc

Fuente: ??.

1.5.2. Elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos (MEF), ofrece una alternativa más compleja pero más adecuada para los problemas de geometría irregular. A diferencia del MDF, esta técnica divide al dominio de la solución en regiones sencillas o “elementos”. También existe en este método el concepto de nodo, entendidos al igual que en MDF como puntos discretos del dominio en donde calculan valores aproximados de la solución. Se puede desarrollar una solución aproximada de la ecuación diferencial parcial para cada uno de los elementos. La solución total se genera uniendo, o “ensamblando”, las soluciones individuales, asegurando la continuidad de las condiciones de borde entre los elementos.

Por simplicidad consideremos a los elementos más sencillos disponibles, que son los elementos unidimensionales lineales (elem dentro de la **Figura ??**) con un nodo en cada extremo de los mismos, como se muestra en la **Figura ??**.



Números Globales

Figura 1.11: Discretización de un dominio unidimensional mediante Elementos Finitos.

Dentro de cada elemento e se utiliza en sistema local de coordenadas ξ , mientras que los dos nodos reciben la numeración local 1 y 2. Las posiciones de ambos nodos locales en el sistema local son $\xi_1 = -1$ y $\xi_2 = 1$. La relación entre estas coordenadas locales y las coordenadas globales originales se obtiene a través de la relación lineal siguiente:

$$\xi = \frac{2}{x_2^e - x_1^e}(x - x_1^e) - 1 \tag{1.5.15}$$

donde x_1^e y x_2^e son las coordenadas globales de los nodos extremos del elemento e . En forma diferencial, la misma puede ser puesta como:

$$d\xi = \frac{2}{x_2^e - x_1^e} dx \tag{1.5.16}$$

Suponiendo conocidos los valores T_1^e y T_2^e en los nodos 1 y 2 del elemento e , se puede interpolar linealmente la temperatura en todo punto interior del elemento utilizando la siguiente combinación lineal de funciones:

$$T^e(\xi) = N_1(\xi)T_1^e + N_2(\xi)T_2^e = \mathbf{N}^e(\xi) \cdot \mathbf{T}^e \quad (1.5.17)$$

donde las $\mathbf{N}^e = [N_1(\xi), N_2(\xi)]$ son las llamadas funciones de forma o interpolantes, y donde $\mathbf{T}^e = [T_1^e, T_2^e]^T$ es el vector elemental de incógnitas. En el caso de los elementos lineales que hemos elegido, las funciones interpolantes están definidas por $N_1 = (1 - \xi)/2$ y $N_2 = (1 + \xi)/2$.

Estas funciones lineales son fácilmente diferenciables e integrables. Utilizando estas definiciones, podemos obtener una aproximación del gradiente de temperaturas dentro de cada elemento de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \left. \frac{dT}{dx} \right|^e &= \frac{dT^e}{d\xi} \frac{d\xi}{dx} \\ &= \frac{2}{x_2^e - x_1^e} \frac{d\mathbf{N}}{d\xi} \cdot \mathbf{T}^e \\ &= \frac{1}{x_2^e - x_1^e} [-1, 1] \cdot \mathbf{T}^e \\ &= \mathbf{B}^e \cdot \mathbf{T}^e \end{aligned} \quad (1.5.18)$$

donde

$$\mathbf{B}^e = \frac{1}{x_2^e - x_1^e} [-1, 1] \quad (1.5.19)$$

En el MEF existen varios enfoques para obtener las ecuaciones aproximadas algebraicas a partir del problema diferencial original. Entre los más utilizados se encuentran el *método directo*, el *método de los residuos ponderados*, el *método variacional*, el *método de colocación*, el *método del subdominio*, el *método de los cuadrados mínimos* y el *método de Galerkin*.

El enfoque de Galerkin, consiste en este ejemplo en encontrar $T(x)$ que satisfaga:

$$\int_0^L \phi \left[k \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q \right] = 0 \quad (1.5.20)$$

para toda *función de prueba* $\phi(x)$ construida a partir de las mismas funciones

utilizadas para interpolar T a partir de sus valores nodales, pero sujeta a la restricción adicional de que $\phi(0) = 0$ (restricción que se impone en general en toda la frontera del dominio en donde la temperatura sea un dato).

En palabras sencillas, dado que es imposible lograr que la ecuación diferencial original se cumpla en todo punto del dominio, se pide que lo haga en forma aproximada en un sentido integral.

Al integrar por partes el primer término de la **Ecuación ??** se obtiene la siguiente relación:

$$\phi k \frac{dT}{dx} \Big|_0^L - \int_0^L \frac{d\phi}{dx} \frac{dT}{dx} dx + \int_0^L \phi Q dx = 0 \quad (1.5.21)$$

Como $\phi(0) = 0$ y $-k(dT(L)/dx) = h(T_L - T_\infty)$, se obtiene:

$$-\phi(L)h(T_L - T_\infty) - \int_0^L \frac{d\phi}{dx} \frac{dT}{dx} dx + \int_0^L \phi Q dx = 0 \quad (1.5.22)$$

Dentro de cada elemento, la función de prueba $\phi(x)$ se interpola como

$$\phi^e = \mathbf{N}^e \cdot \mathbf{\Psi}^e \quad (1.5.23)$$

donde $\mathbf{\Psi}^e = [\Psi_1^e, \Psi_2^e]^T$. Análogamente a lo visto para dT/dx , se tiene

$$\frac{d\phi^e}{dx} = \mathbf{B}^e \cdot \mathbf{\Psi}^e \quad (1.5.24)$$

Reemplazando en la Ec.(??), entonces:

$$-\Psi_L h(T_L - T_\infty) - \sum_e \mathbf{\Psi}^{eT} \left(\frac{kl^e}{2} \int_{-1}^1 \mathbf{B}^{eT} \cdot \mathbf{B}^e d\xi \right) \mathbf{T}^e + \sum_e \mathbf{\Psi}^{eT} \frac{Q^e l^e}{2} \int_{-1}^1 \mathbf{N}^{eT} d\xi = 0 \quad (1.5.25)$$

donde l^e es la longitud del elemento e .

Reescribiendo esta relación en términos de los vectores nodales globales $\mathbf{T} = [T_1, T_2, \dots, T_M]^T$ y $\mathbf{\Psi} = [\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_M]^T$, donde M es el número total de nodos, queda

$$-\Psi_L h T_L + \Psi_L h T_\infty - \mathbf{\Psi}^T \mathbf{K} \mathbf{T} + \mathbf{\Psi}^T \mathbf{f} = 0 \quad (1.5.26)$$

que debe satisfacerse para todo vector $\mathbf{\Psi}$ con $\Psi_1 = 0$, donde se puede identificar la

matriz de *conductividad* (o de rigidez en la jerga usual del MEF)

$$\mathbf{K} = \sum_e \frac{kl^e}{2} \int_{-1}^1 \mathbf{B}^{eT} \cdot \mathbf{B}^e d\xi \quad (1.5.27)$$

y el vector fuente térmica

$$\mathbf{f} = \sum_e \frac{Q^e l^e}{2} \int_{-1}^1 \mathbf{N}^{eT} d\xi = 0 \quad (1.5.28)$$

los que son armados elemento a elemento en un proceso conocido como "ensamblaje".

Eligiendo sucesivamente valores de Ψ $[0, 1, 0, \dots, 0]^T$ $[0, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$, $\dots, [0, 0, \dots, 0, 1]^T$, la **Ecuación ??** es expresada en forma matricial del siguiente modo:

$$\begin{bmatrix} K_{22} & K_{23} & \dots & K_{2M} \\ K_{32} & K_{33} & \dots & K_{3M} \\ \vdots & & & \\ K_{M2} & K_{M3} & \dots & K_{MM} + h \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ T_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_M + hT_\infty \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{21}T_0 \\ K_{31}T_0 \\ \vdots \\ K_{M1}T_0 \end{bmatrix} \quad (1.5.29)$$

Resolviendo la **Ecuación ??**, se obtienen finalmente los valores de temperatura nodales buscados (?).

En las **Tablas ??** y ?? se presentan referencias correspondientes a los trabajos en los cuales se aplicó MEF en el modelado y simulación de procesos térmicos y de enfriamiento en alimentos según lo informado por ?.

Tabla 1.6: Aplicación del Método de Elementos Finitos en el modelado y simulación de procesos térmicos en alimentos.

Procesos	Autores	Afilici3n	Modelos		Dimensi3n	Prop. Termodependientes	Alimento	
			T3rmico-M3sico	si-si				
Secado	Wu y Irudayaraj (1996)	Univ. de Saskatchewan, Canad3	si-si	si	2D	si	Almid3n	
	Jia y otros (2000a,b,c,d) (2001)	Univ. de Utah, EE.UU. Univ. Dublin, Irlanda Univ. Agr., China	si-si	si	2D-axi	si	Grano	
	Almad y otros (2001)	Univ. Purdue, EE.UU.	si-si	si	2D-axi	si	Galletitas	
	Chen y otros (1999)	Univ. de Arkansas, EE.UU.	si-si	si	2D-axi	si	Pollo	
	Ikediala y otros (1996)	Univ. Tec. Nueva Escocia, Canad3	si-si	si	2D-axi	si	Carne	
	Yang y Rao (1998)	Univ. de Cornell, EE.UU.	si-si	si	2D-axi	si	Almid3n	
	Zhang y Datta (2000)	Univ. de Cornell, EE.UU.	si-si	si	2D-axi	si	Varios	
	Zhang (2001)							
	Lin y otros (1995), Zhou y otros (1995), Vilayannur y otros (1998a,b)	Univ. de Pennsylvannia, EE.UU.	si-si	si	2D-3D			Alimentos S3lidos
	Nicolai y De Baerdemaeker (1996), Verboven y otros (2001) Nicolai y otros (1998a,b,2000) Zhang y Fryer (1995)	Univ. Cat3lica de Leuven, B3gica	si-si	si	2D-axi			Varios
Cocc3n	Martens y otros (1996)	Univ. de Cambridge, Gran Bretaia	si-si	si	2D		Varios	
	Varga y otros (2000a, b)	Univ. Cat3lica de Leuven, B3gica	si-si	si	1D-axi	si	Brocoli	
	Oliveira (2000)	Univ. Cat3lica Portuguesa, Portugal	si-si	si	2D-axi		Varios	
	Mallikarjuna y Mittal (1995,1996)	Univ. de Cork, Irlanda	si-si	si	2D		Carcasas	
	Carroll y otros (1996)	Univ. de Guelph, Canad3	si-si	si	1D		Manzana y pera	
	Santos y otros (2008)	Univ. de Michigan, EE.UU.	si-si	si	2D		Morcilla	
	Purlis y Salvadori (2009)	CIDCA, UNLP, Argentina CIDCA, UNLP, Argentina	si-si	si	2D		Panificados	

Fuente: ???

Tabla 1.7: Aplicación del Método de Elementos Finitos en procesos de enfriamiento en alimentos.

Procesos	Autores	Afiliación	Modelos Térmico-Másico	Dimensión	Prop. Termodependientes	Alimento
Enfriamiento	Comini y otros(1995)	Univ. de Udine, Italia	si-	2D		Varios
	Wang y Sun (2002a,b)	Univ. de Dublin, Irlanda	si-si	2D-3D	si	Carne cocida
	Zhao y otros (1998)	Univ. de Oregon, EE.UU.	si-	2D	si	Atún
	Van Der Sluis y Rouwen (1994), Van Der Sluis y otros (1999)	TNO-MEP, Países Bajos	si-si	3D	si	Panificados y Carcasas
	Tewkesbury y otros (2000)	Univ. de Birmingham, Gran Bretaña	si-	2D-axi	si	Chocolate
Otros	Hulbert y otros (1997)	Univ. de Tennessee, EE.UU.	si-	2D		Zanahoria
	Nabor y otros (2001)	Univ. Católica de Leuven, Bélgica	si-	3D	si	Varios
	Santos y otros (2010)	CIDCA, UNLP, Argentina	si-si	3D		Panificados

Fuente: ??

1.5.3. Generación de Dominios Regulares e Irregulares en el Modelado y Simulación de Procesos Térmicos de Carnes y Productos Cárnicos.

Muchos alimentos presentan en su forma natural una geometría irregular, siendo habitual utilizar geometrías simples para aproximar a la forma real. Entre las formas comunes y regulares en las que un alimento se puede representar y ser aplicadas en el modelado y simulación de procesos térmicos, se incluyen las geometrías cúbicas, rectangulares o esféricas además de las placas o cilindros infinitos. La ventaja de una fácil caracterización del alimento se basa en sus dimensiones (longitud, espesor, altura, radio) en los ejes principales. A partir de ello, tanto el área como el volumen del producto pueden ser calculados mediante ecuaciones matemáticas conocidas. A su vez, en la resolución de problemas térmicos la aproximación de una geometría de 3 dimensiones como infinita, se fundamenta en la suposición que una de las áreas es mayor respecto de las demás.

A su vez, cuando una geometría irregular es aproximada a la forma real mediante cuerpos 2-D y 3-D, la descripción matemática del problema se simplifica y puede ser resuelta bajo los métodos de diferencias finitas o técnicas analíticas. No obstante, para una geometría irregular con un mayor detalle de la forma y similitud con un alimento real, es posible aplicar el Método de Elementos Finitos para el diseño y construcción de la geometría de la pieza.

Son escasos los trabajos publicados que relacionan en forma integral la geometría irregular del alimento, el efecto del tratamiento térmico sobre la inocuidad (Valor de Esterilización ó valor de de Pasteurización), parámetros tecnológicos, atributos sensoriales y propiedades nutricionales del producto.

?, utilizaron un modelo 2D para simular el procesamiento térmico de pouches, asumiéndolos con una geometría correspondiente a un paralelepípedo. La técnica de resolución se basó en una modificación del Método de Diferencias Finitas (DFM) aplicado en la terminación de los bordes del envase irregular. Simultáneamente, los autores compararon los resultados obtenidos por DFM con los generados través de elementos finitos, hallando una muy buena aproximación entre las 2 técnicas. ?, simularon y validaron la transferencia de calor y materia en albóndigas sometidas a

diferentes procesos de cocción por inmersión en baño de agua caliente (convección forzada o natural). Los autores asumieron una geometría esférica, sin reducción del producto y adimensionalizaron la temperatura, el contenido de agua interna y el radio. Las diferencias observadas entre las simulaciones y los resultados experimentales se debieron al desplazamiento de los sensores de temperaturas (termocuplas) dentro del producto.

?, trabajaron a nivel experimental y de modelado numérico (DFM) evaluando el efecto del procesamiento térmico sobre la terneza de músculos *Semitendinosus* bovino. En este trabajo, simularon diferentes condiciones de cocción en baño de agua (66 a 100 °C) y coeficiente de transferencia térmica (50 a 100 W/m^2C). A su vez, los autores consideraron a las piezas cárnicas como secciones transversales de forma elíptica, sin flujo axial de calor. Las secciones fueron simuladas y caracterizadas a través de sus diámetros equivalentes D_e , tomando como referencia el promedio de sus ejes. El concepto de D_e para una geometría irregular fue considerado como el diámetro hipotético de un cuerpo geométrico perfecto, manteniendo las mismas propiedades que su forma real. Así una sección de 12 x 8 cm, se representó por su D_e de 10 cm, otra sección de 18 x 12 cm con un D_e de 15 cm y finalmente una sección 24 x 16 cm con un D_e de 20 cm. En este trabajo los resultados fueron expresados para cada D_e mediante gráficos de triple entrada en cuyos ejes se representaron los valores de terneza de la piezas cárnicas, temperatura de cocción y coeficiente de transferencia térmica del fluido calefactor.

En los últimos años se han aplicado también otras metodologías para la obtención de las geometrías irregulares en alimentos. Las mismas han utilizado imágenes adquiridas por resonancia magnética, con posterior reconstrucción y postprocesamiento de la información digital. Esta técnica ha sido aplicada por ?, en músculo *Semitendinosus* bovino, carcasas de cerdo y cordero.

Asimismo se ha informado, la aplicación de scanners 3D con extracción posterior de imágenes tridimensionales computarizadas, para obtener la geometría de la mitad de la carcasa de un pollo (?). Otra técnica de captura de formas irregulares del alimento, también aplicada, de menor costo que las mencionadas anteriormente fue la fotografía digital. Autores como ?, han desarrollado técnicas y patrones de reconocimiento de imágenes digitales de papas para una posterior clasificación

del producto. ??, también realizaron trabajos de reconstrucción de imágenes aportando técnicas similares aplicadas a músculo *Semitendinosus* bovino y frutas como manzanas. En otro trabajo de reciente publicación, ?, lograron discriminar zonas y sub regiones del alimento, diferenciando sus componentes, a partir imágenes adquiridas y con posterior procesado. Los autores dieron a conocer ejemplos de muestras cárnicas con y sin hueso interno, con diferenciación de zonas de materia grasa, zona muscular y zona ósea. A su vez, los mismos autores, han evaluado otros alimentos como jamón español, galletitas, embutidos como salchichón y un producto típico argentino como el alfajor.

Esta nueva metodología que captura geometrías irregulares de alimentos a partir de imágenes permite reconstruir objetos escaneados a partir de una nube de puntos en la superficie del objeto en 3D. Estos puntos pueden ser interpretados y convertidos en una expresión matemática que caracterice a una geometría 3 -D. Este procedimiento se basa en describir las formas, curvas y superficies de un objeto en forma matemática sencilla, pero eficiente y precisa. La manera de implementar esta metodología en la forma computacional es la aplicación directa de las NURBS, siglas en inglés de Non Uniform Rational B-Splines, que se han convertido en la herramienta de modelado más eficiente de los programas CAD. Estos modelos generados matemáticamente permiten obtener curvas más precisas y por lo tanto superficies de mayor suavidad. Luego, las imágenes 3-D obtenidas pueden ser exportadas a programas de cálculo para ser utilizadas e implementadas en simulaciones de procesos (??). La obtención de imágenes digitales de un alimento permite obtener una geometría más realista del producto a procesar, sin embargo las mismas contemplan un caso particular, es decir que se trabaja con una geometría única.

1.6. Naturaleza del Aporte Original.

A nivel de la bibliografía abierta, son escasos los trabajos que evalúan el efecto de los protocolos de cocción-pasteurización, particularmente el denominado F, sobre los parámetros tecnológicos, las propiedades físicas y los atributos sensoriales de cortes o piezas de carne bovina. Ello resulta relevante si se considera que algunos protocolos de cocción-pasteurización *Sous vide* pueden afectar en forma severa las

características sensoriales de productos cárnicos (?). A su vez, la pasteurización de alimentos basada en ciclos VRT ha sido escasamente estudiada, a diferencia de la esterilización, sobre la cual existen varias publicaciones. Los ciclos VRT con escalonamiento de temperatura tipo Delta T, constituyen una alternativa interesante en la cocción-pasteurización de cortes o piezas de carne vacuna. Ello se debe a que permiten escalar las temperaturas de tratamiento considerando su efecto sobre la desnaturalización de las proteínas miofibrilares y en consecuencia sobre los principales atributos sensoriales y las propiedades físicas de las piezas de carne, (?). A su vez, en el caso particular del tratamiento térmico de piezas enteras de carne, resulta importante minimizar la diferencia de temperaturas entre el centro y la superficie de las mismas. Esto permite reducir el efecto del tratamiento sobre los factores de calidad (fundamentalmente terneza, jugosidad, color y capacidad de retención de agua). Uno de los aportes originales de este trabajo consistió en proponer una geometría relativamente simple pero que captura las características geométricas principales del músculo *Semitendinosus* bovino. La forma propuesta se obtuvo a partir de la deformación de una esfera transformada y controlada por 6 parámetros, de los cuales 3 caracterizaron la asimetría y 3 las dimensiones de la pieza. Los 3 parámetros de asimetría utilizados, permitieron lograr una forma razonable del músculo, y se modificaron las 3 dimensiones espaciales para generar diferentes geometrías, representativas de la variabilidad natural de la forma de estos músculos. La generación de geometrías simples de músculos *Semitendinosus* bovino, a partir del modelado utilizando un software de Elementos Finitos permitió simular y analizar el efecto de estrategias de ciclado VRT sobre los parámetros tecnológicos, propiedades físicas y atributos sensoriales y búsqueda del PMT, minimizando el trabajo experimental. Posteriormente, se validaron experimentalmente dichas geometrías durante la cocción-pasteurización en autoclave de ducha de agua, utilizando 2 procesos térmicos (CRT-VRT) sujetos a comparación entre sí. En la experimentación de dichos procesos, se alcanzó el Valor de Pasteurización de 40 minutos y el Valor de Cocción.

1.6.1. Hipótesis Correspondiente al Trabajo de Investigación Planteado.

El presente trabajo de tesis se fundamentó sobre la hipótesis que sería posible generar una geometría del músculo *Semitendinosus* bovino a partir de un modelo caracterizado por parámetros relativos a la asimetría y a las dimensiones del mismo. Este modelo resultaría adecuado para simular tratamientos de cocción-pasteurización *Sous vide* de *Semitendinosus* bovino, aplicando ciclos de Temperatura Constante (CRT) y ciclos de Temperatura Variable (VRT) de Autoclave. A su vez, se consideró que los ciclos VRT permitirían minimizar el efecto del tratamiento térmico sobre los factores de calidad y la pérdida de peso por cocción de los músculos cocidos-pasteurizados *Sous vide*, respecto a los tratamientos CRT, para la misma condición de letalidad (Protocolo de Pasteurización “F”, ?).

1.7. Objetivo General.

Modelar la geometría irregular de músculos *Semitendinosus* bovino y simular tratamientos de cocción-pasteurización *Sous vide* aplicando ciclos de Temperatura Constante (CRT) y ciclos de Temperatura Variable (VRT- tipo Delta T) de Autoclave.

1.8. Objetivos Específicos.

1. Modelar una geometría del músculo *Semitendinosus* bovino caracterizada por parámetros relativos a la asimetría y a las dimensiones del mismo.
2. Simular mediante el método de elementos finitos diferentes tratamientos de cocción-pasteurización *Sous vide*, aplicando ciclos CRT y ciclos VRT (tipo Delta T), asegurando en todos los casos el cumplimiento del Protocolo de Pasteurización “F”.
3. Estudiar el efecto de las variaciones de las dimensiones de los músculos *Semitendinosus* bovino sobre la posición del punto de mínimo tratamiento,

el tiempo de procesamiento y el Valor de Cocción, asegurando en todos los casos el cumplimiento del Protocolo de Pasteurización “F”.

4. Estudiar la distribución de parámetros característicos de la penetración de calor en músculos *Semitendinosus* bovino cocidos-pasteurizados *Sous vide* en un autoclave con ducha de agua de escala piloto. Evaluación de la zona de la cámara del autoclave más retrasada en relación al calentamiento y enfriamiento de los músculos.
5. Validar los tratamientos CRT y VRT (tipo Delta T) simulados en los estudios previos, mediante ensayos de cocción-pasteurización *Sous vide* de músculos *Semitendinosus* bovino, utilizando un autoclave con ducha de agua.

Capítulo 2

Materiales y Métodos

2.1. Modelo Matemático-Numérico

La conducción de calor representa uno de los mecanismos fundamentales por los cuales ocurre la transmisión de energía de una región a otra como resultado de una diferencia de temperatura a través del material sin flujo másico. La ecuación diferencial que expresa el flujo de calor en estado transiente para un material con conductividad térmica constante y uniforme en coordenadas cartesianas, es representada a través de la *Ecuación ??*

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{a} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0 \quad \text{en el dominio 3D } \Omega \quad (2.1.1)$$

donde u representa la temperatura, t , es la variable tiempo y a es una función conocida. En general para los problemas de transferencia de calor por conducción, y α (m^2/s) representa el coeficiente de difusividad térmica. A su vez, a se encuentra definida por $\frac{\rho C_p}{k}$, donde k es el coeficiente de transferencia de calor por conducción, ρ la densidad y C_p el calor específico. Aquí, el calor generado internamente es considerado despreciable.

Las condiciones de contorno son impuestas de la siguiente manera:

$$u = \check{u} \quad \text{en } \Gamma_e \quad (2.1.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \check{q} \quad \text{en } \Gamma_n \quad (2.1.3)$$

siendo \check{u} y \check{q} la temperatura y el flujo de calor impuesto en el contorno, y n el vector normal. Aquí, Γ_e y Γ_n corresponden a las zonas del contorno donde se aplican condiciones esenciales y naturales, respectivamente, siendo $\Gamma_e \cup \Gamma_n = \Gamma$ y $\Gamma_e \cap \Gamma_n = \Phi$, donde Γ representa el contorno en el dominio Ω

Recordando lo que se explicó en la Introducción, para resolver el modelo matemático anterior mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) se divide (discretiza) el dominio espacial en *elementos*, que son volúmenes de formas simples, usualmente tetraedros o hexaedros, que en conjunto abarcan todo el dominio sin solapamiento entre ellos. Dependiendo del tipo de elementos elegidos, se definen los *nodos* en posiciones espaciales en los vértices, lados y/o interiores de elementos. Este conjunto de elementos y sus correspondientes nodos recibe el nombre de *mall*a, *red*, o *grilla* de elementos finitos. Se supone que el método numérico deberá proveer como solución los valores de la incógnita, en este caso la temperatura u , en todos los nodos de la malla, y que los valores en el resto del dominio deberán ser encontrados con algún criterio de interpolación.

Esta solución discreta, u_h , será por fuerza una solución aproximada. Por lo tanto, si evaluamos con ella el lado izquierdo de la **Ecuación ??**, no obtendremos en el lado derecho un 0 perfecto sino un campo $r_h(x, y, z, t)$ que llamaremos *residuo*. En su variante de residuos ponderados, el MEF implica multiplicar este residuo por las llamadas *funciones de peso*, y luego integrar este producto en todo el dominio, obteniéndose en este caso la siguiente expresión:

$$\int_{\Omega} w \frac{\partial u}{\partial t} d\Omega + \frac{1}{a} \int_{\Omega} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} \right) d\Omega - \frac{1}{a} \int_{\Gamma_n} w \frac{\partial u}{\partial n} d\Gamma = 0 \quad (2.1.4)$$

donde $w=w(x,y,z)$ son las funciones de peso. El campo incógnita $u_h =$

$u_h(x, y, z, t)$, y las funciones de peso, se interpolan espacialmente usando las llamadas funciones de forma $H_i(x, y, z)$ dentro de cada elemento finito. La solución de elementos finitos será entonces expresada de la siguiente manera

$$u_h(x, y, z, t) = \sum_n^{i=1} H_i(x, y, z) u_i(t) \quad (2.1.5)$$

donde se observa que la dependencia temporal del campo u_h queda reflejada solamente en la dependencia temporal de los valores nodales $u_i(t)$.

Integrando la **Ecuación ??** en todo el dominio, y pidiendo que este valor integral sea mínima respecto de los valores nodales de la incógnita, terminamos con un sistema matricial de ecuaciones con matrices **M** y **K** independientes del tiempo.

$$[M] \dot{u}_h(t) + [K] u_h(t) = [F(t)] \quad (2.1.6)$$

Se destaca entonces que la ecuación diferencial parabólica se ha transformado a través de MEF en un sistema de ecuaciones diferencial ordinarias en el tiempo. Con el fin de resolver la parte temporal de esta última **Ecuación ??** se ha de aplicar, por ejemplo, el Método de las Diferencias Finitas (MDF).

Para el presente Trabajo de Tesis, se utilizó el software Abaqus CAE v.6.7-1 el cual integra explícitamente en el tiempo la **Ecuación ??**.

2.1.1. Generación de la Geometrías Músculos *Semitendinosus* bovino a partir de la Deformación de una Esfera.

El músculo *Semitendinosus* bovino se caracteriza por su forma fusiforme con un extremo denominado porción proximal y el posterior, de menor tamaño llamado distal. A su vez, cada una de sus extremidades presentan asimetrías pronunciadas, ver **Figuras ??** a y b.

Para el diseño y generación de las geometrías 3D de músculos *Semitendinosus* bovino en el presente Trabajo de Tesis se utilizaron los programas comerciales de simulación Abaqus CAE v.6.7-1, (?) y MATLAB v.7., (?) En particular, se trabajó dentro del entorno gráfico de Abaqus CAE, con una interfaz gráfica simple para

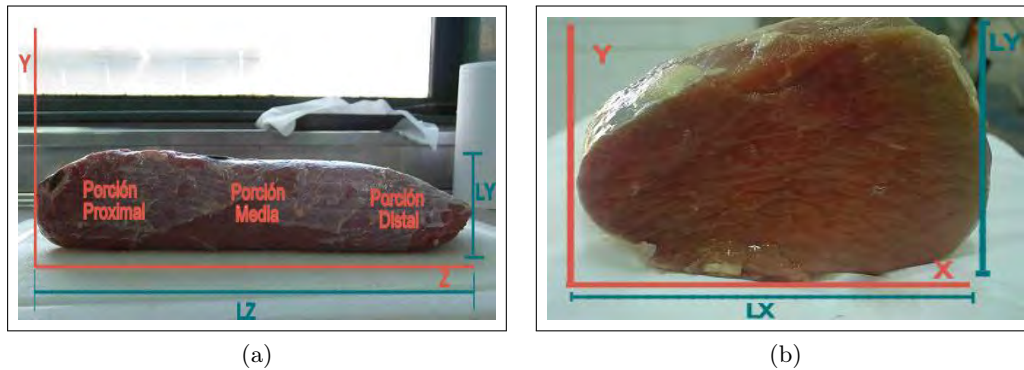


Figura 2.1: Asimetrías del músculo *Semitendinosus* bovino. (a) Perfil y secciones del músculo. (b) Vista interna músculo y asimetría.

crear, monitorear y evaluar resultados de simulaciones. La misma es representada a través de la **Figura ?? a**. En cada módulo del entorno gráfico fueron definidas las propiedades del material de cada una de las piezas creadas, las condiciones de tiempo y de temperatura del proceso térmico, el tipo de malla y el tipo de elementos finitos aplicados. Una vez definidos todos los parámetros fue ejecutada la simulación del proceso térmico.

En conjunto con el software de elementos finitos, se utilizó el otro software comercial, MATLAB v.7. -**Figura ?? b** -, dentro del cual se utilizaron rutinas programadas en lenguaje de programación MATLAB. Dichas rutinas tuvieron como fin la implementación de algoritmos como los de relajación de mallas internas de elementos finitos entre otros, además de la exportación de geometrías y la comunicación con programas como Abaqus CAE v.6.7-1. Estas tareas fueron realizadas en una computadora personal, notebook marca Toshiba-Tecra A 19 (c9) que cuenta con un procesador Intel cetrino, capacidad de 4GB RAM, y 320 GB de disco rígido y bajo sistema operativo Windows[®].

A fin de obtener una geometría simple de un músculo *Semitendinosus* bovino, se comenzó por construcción de una geometría esférica dentro del entorno gráfico del software Abaqus CAE v.6.7-1. Se creó un cuerpo sólido 3D de revolución y deformable. Inicialmente, se generaron 6 piezas iguales para la construcción de una semiesfera de centro cúbico. Este paso fue necesario, a fin de lograr una mayor eficiencia en el manejo de información de los nodos de la malla de elementos finitos aplicada. De igual manera, se construyó e insertó una pieza cúbica en el sitio central.

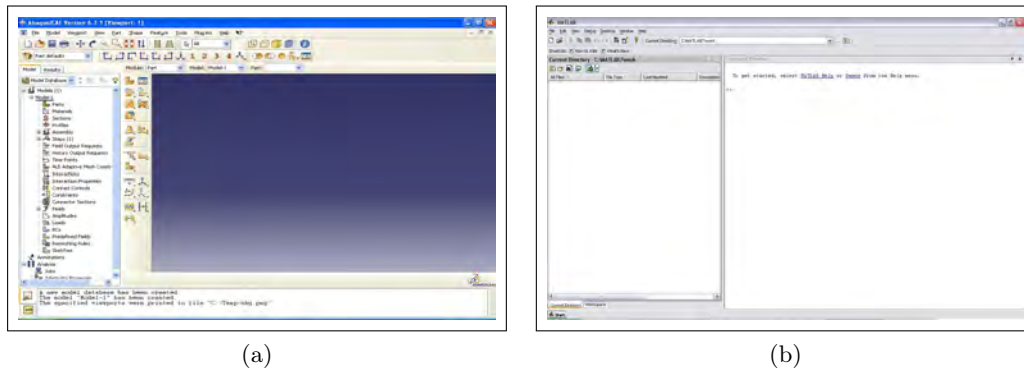


Figura 2.2: Utilización de programas comerciales para el diseño y generación de geometrías 3D. (a) Entorno gráfico de Abaqus CAE v.6.7-1. (b) Entorno gráfico de MATLAB v.7.

Por último, fue diseñada la otra mitad de la esfera a partir de otras 6 piezas iguales a la inicial. A cada una de las 13 piezas, se le asignaron las propiedades termofísicas de valores unitarios para conductividad térmica ($W/m^2\text{°C}$), densidad (kg/m^3) y calor específico ($J/kg\text{°C}$). Estos parámetros conforman el coeficiente de difusividad térmica, α , (m^2/s). Dado que se trató de un modelo adimensional, posteriormente se realizó un escaleo de dichas unidades.

La malla obtenida fue generada en forma independiente para cada pieza y luego las 13 piezas malladas fueron fusionadas garantizando así la conectividad dentro de la malla de elementos finitos. De este modo se finalizó con la construcción y diseño de la esfera cuya malla alcanzó un de total 131.671 nodos y 32.000 elementos cuadráticos hexaédricos. En la **Figura ??** se presentan las etapas de construcción y ensamble de las piezas de mallas independientes para así fusionarse dentro de la esfera. Para corroborar la conducción de calor en forma radial dentro del modelo de la esfera, se ejecutó un análisis térmico adimensional colocando un valor de 1 correspondiente a la temperatura del medio de intercambio de calor del autoclave (agua en forma de ducha) a 75 °C.

Es importante señalar que las condiciones externas necesarias para la simulación de las cocciones-pasteurizaciones (CRT y VRT) de tratamientos térmicos se inscribieron a posteriori diferenciando mediante agrupamientos los elementos. De este modo, se pudo manipular elementos superficiales e internos de la esfera, como también su conectividad.

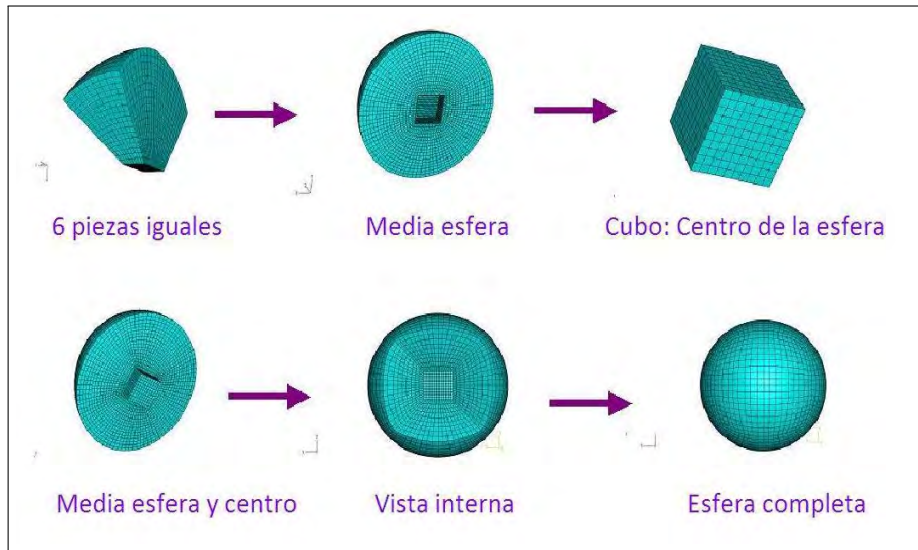


Figura 2.3: Generación de una pieza esférica.

Para lograr una geometría simple de un músculo *Semitendinosus* bovino (**Figura ??**), se realizó la deformación de la esfera, implementando sólo 6 parámetros influyentes en las 3 dimensiones del músculo LX, LY, LZ. A su vez las mismas fueron afectadas por 3 coeficientes de asimetría, a, b y c. La transformación realizada para cada dimensión se obtuvo tomando como base a un músculo *Semitendinosus* bovino patrón de peso igual a 1.800 g y de dimensiones 10, 7 y 30 cm para LX, LY, LZ, respectivamente. Los coeficientes de asimetría se mantuvieron siempre constantes, tomando los siguientes valores: $a = 1$; $b = 2,5$ y $c = 1,5$. Estos valores fueron elegidos ya que conservaban la forma fusiforme típica del músculo bovino.

A continuación se muestra las **Ecuaciones ??**, **??** y **??** utilizadas en la deformación de la esfera de radio unitario en músculo *Semitendinosus* bovino:

$$X = \left(\frac{x}{2}\right)^a * LX \quad (2.1.7)$$

$$Y = \left(\frac{y}{2}\right)^b * LY \quad (2.1.8)$$

$$Z = \left(\frac{z}{2}\right)^c * LZ \tag{2.1.9}$$

Para llevar a cabo la deformación de la esfera y transformación hacia la geometría de un músculo *Semitendinosus* bovino, se desarrollaron 5 rutinas (*P0*, *transform*, *P1*, *rlx* y *P2*) dentro del entorno de trabajo de MATLAB v.7. Las rutinas programadas incluyeron las **Ecuaciones ??**, **??** y **??** además de la modificación de la malla de elementos finitos. En particular, no se modificaron la cantidad de elementos sino la densificación que presentaron los nodos pertenecientes en un principio al cubo original de la esfera. Es decir, se aplicó como objetivo un smoothing o relajación de la red de elementos finitos para la reubicación de los nodos centrales de la esfera, precisamente en la zona del cubo, hacia una posición promedio entre los nodos vecinos. La relajación de la malla de elementos finitos fue implementada solamente a los nodos centrales luego de iterarse 900 veces con un coeficiente de relajación de 1. En la **Figura ??** se presenta las etapas de deformación de la esfera y transformación en músculo *Semitendinosus* bovino además de la vista interna de la malla luego de la relajación. Simultáneamente se mencionan en dicha figura los nombres y tareas que cada rutina llevo a cabo. Para más detalle de la programación en lenguaje MATLAB de las rutinas (*P0*, *transform*, *P1*, *rlx* y *P2*) véase **Apéndice**.

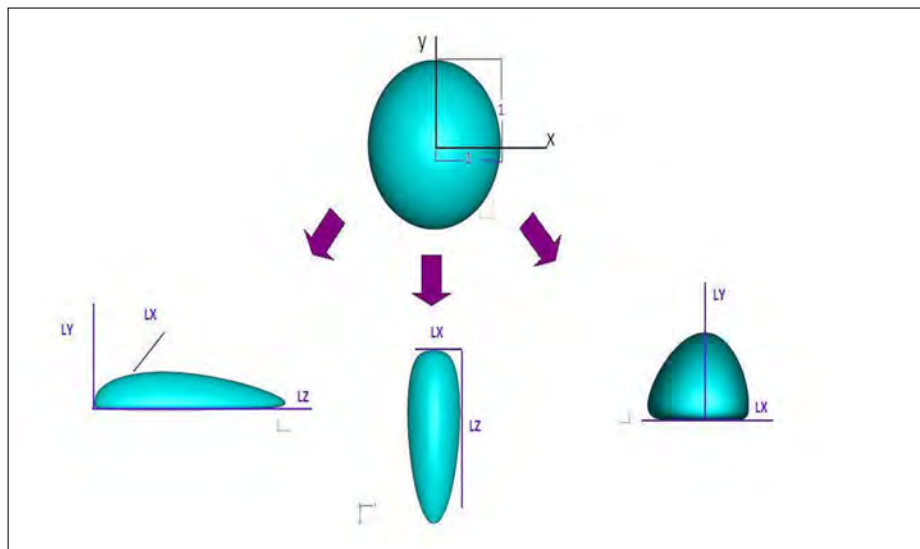


Figura 2.4: Transformación de pieza esférica en músculo *Semitendinosus* bovino.

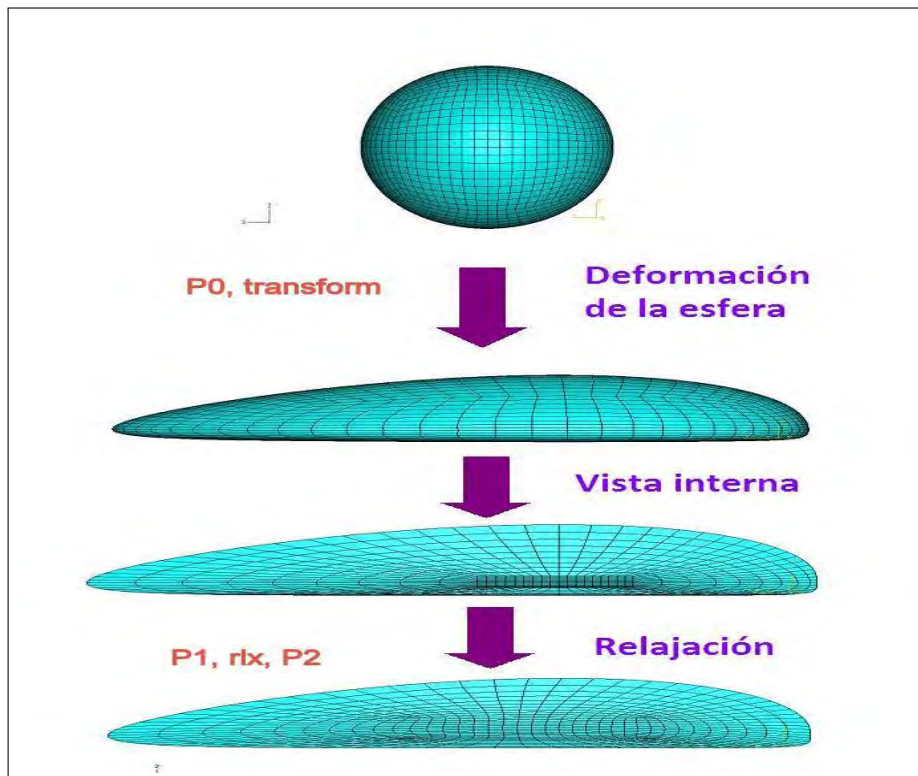


Figura 2.5: Etapas de transformación y relajación de la malla interna de elementos finitos del músculo *Semitendinosus* bovino.

A fin de realizar un estudio de sensibilidad a la forma simple del músculo *Semitendinosus* bovino obtenido, se ejecutaron las mismas 5 rutinas modificando solamente los parámetros LX, LY, LZ en $\pm 20\%$. De esta manera además del músculo *Semitendinosus* bovino patrón, se obtuvieron 6 casos más de geometrías de músculos bovinos.

2.1.2. Simulación de los Tratamientos de Cocción-Pasteurización *Sous vide* Aplicando Ciclos a Temperatura Constante (CRT) y Variable (VRT) de Autoclave.

Para llevar a cabo la simulación de los procesos de cocción-pasteurización dentro del entorno del software Abaqus CAE v.6.7-1 se adimensionalizó el problema térmico. La adimensionalización de las magnitudes se realizó a fin de aprovechar las

simplificaciones que el análisis dimensional aporta al estudio experimental y teórico de los fenómenos físicos.

Se consideró despreciable la resistencia pelicular a la transferencia de calor debido a las condiciones de turbulencia del equipo en el cual se realizaron las validaciones del modelo.

Las temperaturas reales del proceso de cocción-pasteurización utilizadas para en la simulación de los tratamientos CRT se detallan a continuación:

- Temperatura inicial de los músculos: 0 °C.
- Temperatura inicial del fluido de intercambio de calor (*CUT*): 20 °C .
- Temperatura del fluido durante la fase de mantenimiento: 75 °C.
- Descenso de Temperatura del fluido durante la fase de enfriamiento hacia 20 °C.

En la simulación de procesos de cocción-pasteurización VRT (tipo Delta T), se implementaron además del *CUT* y del período de enfriamiento, escalones a distintas temperaturas de mantenimiento térmico. A continuación se detallan las temperaturas aplicadas:

- Temperatura inicial de los músculos: 0 °C.
- Temperatura inicial del fluido de intercambio de calor (*CUT*): 20 °C.
- Primer escalón a una temperatura de 60 °C.
- Segundo escalón, con ascenso en rampa hacia una temperatura de 75 °C.
- Descenso de Temperatura del fluido durante la fase de enfriamiento hacia 20 °C.

Para una mejor visualización de la adimensionalización de las temperaturas se presenta la siguiente relación:

$$\text{Temperatura real} = 20 \text{ °C} + \text{Temperatura adimensional} \cdot 55 \quad (2.1.10)$$

En el caso del sistema CRT, se estableció como valor adimensional 0 correspondiente a la temperatura inicial del fluido calefactor (agua) del autoclave, considerado en 20 °C. Esta temperatura corresponde a la condición inicial a la cual se encuentra habitualmente el ambiente de la cámara del autoclave en la planta piloto del ITA, CIA, CNIA, INTA. Es decir, esta temperatura correspondió al inicio del *come up time*, (*CUT*).

Por otro lado, se ponderó con el valor de 1 al valor de la temperatura adimensional correspondiente a la temperatura del medio (agua) en la única fase mantenimiento que tuvo este tratamiento, el cual fue de 75 °C.

Para simular del sistema VRT (tipo Delta T), se estableció también como valor adimensional 0 correspondiente a la temperatura inicial del fluido calefactor (agua) del autoclave, considerado en 20 °C. Para luego continuar con 2 fases de calentamiento escalonadas cuyos valores de temperaturas adimensionales fueron 0,727 y 1. En el primer caso, el valor correspondió al escalón de mantenimiento de 60 °C, mientras que el segundo valor correspondió al escalón de mantenimiento de 75 °C. Dichos valores fueron calculados de acuerdo a la expresión establecida en la **Ecuación ??**.

Asimismo, en todas las simulaciones CRT y VRT se representó con el valor adimensional de -0,364 a la temperatura inicial del músculo bovino correspondiente a 0 °C, considerando que la pieza cárnica ha sido retirada de la cámara de refrigeración (0-3 °C) como es habitual en las prácticas de trabajo dentro de la planta piloto del ITA, CIA, CNIA, INTA. Otro aspecto importante de la adimensionalización de las temperaturas recae en las curvas de enfriamiento de cada una de las geometrías generadas. En esta etapa, la temperatura del medio (agua) utilizado descendió desde 1 hasta el valor de temperatura adimensional 0, es decir desde 75 °C a 20 °C.

El tiempo de procesamiento térmico se adimensionalizó usando un tiempo característico: $t_c = \frac{\alpha_c}{L_c^2}$, donde α_c es la difusividad térmica del material, en este caso perteneciente a la carne vacuna (α , $1,33 \cdot 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$), (?) y L_c es la longitud característica, tomada como el radio de una esfera que tiene el mismo volumen V que la pieza de músculo:

$$L = \sqrt[3]{\frac{3 * V}{4\pi}} \quad (2.1.11)$$

$$t' = \frac{t(s)}{t_c} \quad (2.1.12)$$

El Valor de Pasteurización (VP) [min] a obtener en el PMT (punto de mínimo tratamiento) durante el tratamiento térmico de cocción-pasteurización fue representado mediante la **Ecuación ??**;

$$VP_{real}[min] = \int_0^t 10^{\frac{T-T_{refvp}}{z_{vp}}} .dt \quad (2.1.13)$$

Al mismo tiempo que este valor en términos de simulación se lo puede escribir mediante la ecuación :

$$VP'_{simulado}[min] = \left(\int_0^t 10^{\frac{T'-T_{refvp'}}{z_{vp'}}} .dt' \right) * \frac{t_c}{60} \quad (2.1.14)$$

siendo:

VP' = Valor de Pasteurización adimensional. T = Temperatura interna real (°C).

T' = Temperatura interna adimensional.

T_{ref} = Temperatura de referencia real de 70 °C.

$T_{refvp'}$ = Temperatura de referencia adimensionalizada $\left(\frac{T_{ref}}{T_{atc}-T_i} \right)$.

T_{atc} = Temperatura de autoclave real (°C).

T_i = Temperatura inicial (°C).

z_{vp} = Valor de referencia real de 10 °C.

$z_{vp'}$ = Valor de referencia en la simulación $\left(\frac{z_{vp}}{T_{atc}-T_i} \right)$.

A su vez el Valor de Cocción (VC) en superficie ($z = 33$ °C) también se ejecutó de modo similar al Valor de Pasteurización, teniendo como punto de partida la relación:

$$CV_{real}[min] = \int_0^t 10^{\frac{T-T_{refvc}}{z_{vc}}} .dt, \quad (2.1.15)$$

$$CV'_{simulado}[min] = \left(\int_0^t 10^{\frac{T' - T_{refvc'}}{z_{vc'}}} .dt' \right) * \frac{t_c}{60} \quad (2.1.16)$$

siendo:

T_{refvc} = Temperatura de referencia real de 100 °C.

$T_{refvc'}$ = Temperatura de referencia simulada.

$T_{refvc'} = \left(\frac{T_{ref}}{T_{atc} - T_i} \right)$.

z_{vc} = Valor de referencia real de 33 °C.

$z_{vc'}$ = Valor de referencia en la simulación $\left(\frac{z_{vc}}{T_{atc} - T_i} \right)$.

Aprovechando la linealidad del problema térmico, los procesos de simulación de los sistemas de cocción-pasteurización tipo CRT y VRT fueron ejecutados en 2 etapas dentro del entorno de trabajo de Abaqus CAE v.6.7-1. Se diseñaron por separado de 2 curvas adimensionalizadas llamadas para cada geometría generada de músculos *Semitendinosus* bovino. El caso *b* contempló el comienzo de calentamiento (*CUT*) con posterior ascenso de la temperatura de operación de 75 °C e implementación de un mantenimiento térmico. Mientras que el diseño del caso *c* representó el ciclo de enfriamiento, inicializado con valor adimensional de 0 hasta el valor adimensional de -1. Este descenso adimensional corresponde al descenso térmico real, dónde habitualmente el agua en fase de enfriamiento desciende desde los 75 °C hasta la temperatura de finalización de los ciclos de cocción-pasteurización a 20 °C, (**Figura ?? b**). Para la misma geometría del músculo bovino generada se utilizó el mismo caso *c* en la etapa de enfriamiento en los ciclos CRT y VRT.

Por otro lado, se construyó el caso *a*, con etapas completas de *CUT*, mantenimiento térmico (caso *b*) con posterior enfriamiento (caso *c*). Esta curva, únicamente se utilizó a modo de prueba y validación en la geometría del músculo *Semitendinosus* bovino patrón para los ensambles de los casos CRT y VRT.

A cada geometría generada (caso patrón y casos del 1 a 6 en sus 2 versiones de cocción-pasteurización) le fue incorporada las propiedades del material adimensional y la condición de inicial y de borde antes utilizadas en la generación de la esfera. Una vez construídos cada caso por separado, fueron ensamblados para cada geometría

dado que las soluciones constituyen un problema lineal y es posible superponerlas y reproducirlas para otros casos. Para la realización del ensamble se utilizaron las rutinas (*readbc*, *bc*, *readtemp*, *readdat*, *do it*) programadas en el ambiente de trabajo de MATLAB v.7., veáse **Apéndice**.

Para el caso del músculo patrón y geometrías de los casos del 1 al 6 simuladas bajo el sistema CRT, se fijó en la etapa del *CUT* un tiempo adimensional de 0,014 (7 pasos x 0,002), a fin de que el valor de la temperatura adimensional evolucione desde el valor 0 al 1. Lo anteriormente explicado fue equivalente a utilizar un valor de temporal real de 10 min para que la temperatura del fluido calefactor dentro de la cámara del autoclave ascienda desde una temperatura ambiente de 20 °C hasta 75 °C. La duración de la etapa de mantenimiento térmico a temperatura adimensional de 1 ó 75 °C implementada en el sistema CRT, no fue fijada a priori. Ya que en conjunto con la fase de enfriamiento (fijada en una duración de 0,042) determinan el aporte de calor necesario para alcanzar el Valor de Pasteurización deseado ($VP_{70}^{10} = 40$ min) en el PMT de cada de las geometrías modeladas en el sistema CRT. El tiempo necesario de mantenimiento térmico fue obtenido a partir de las diferencias entre el tiempo total (caso $b + c$) y el el tiempo fijado para el *CUT*.

Por otro lado, para ejecutar la simulación del proceso cocción-pasteurización bajo el sistema VRT (tipo Delta T) para el caso patrón y geometrías de los casos del 1 al 6 simuladas. Nuevamente se utilizó un *CUT* (10 min) con el mismo valor adimensional de 0,014 (7 pasos x 0,002). Sin embargo, la evolución de la temperatura adimensional del medio calefactor se realizó desde el 0 hasta los 0,7272, es decir desde los 20 °C a los 60 °C.

En la fase de mantenimiento de la temperatura adimensional fue ejecutada en forma de Delta T con 2 escalones. En el caso de ejemplo caso del músculo patrón en el primer escalón se utilizó un tiempo adimensionalizado de 0,084 (42 pasos x 0,002, equivalente a 60 minutos) con retención de la temperatura a 0,7272 o lo que es igual a 60 °C. Luego del primer escalón y en todos los casos geométricos generados, la evolución térmica en forma de rampa se continuó desde el valor adimensional 0,7272 hasta el valor 1 de temperatura adimensional (desde 60 °C hasta 75 °C). La duración de esta etapa se llevó a cabo en un tiempo adimensional de 0,042 (21 pasos x 0,002, equivalente a 30 minutos). Una vez alcanzado este último valor de temperatura

adimensional, en la segunda fase de mantenimiento no se fijó el tiempo de duración de dicha etapa. Ya que también en conjunto con la fase de enfriamiento (fijada en una duración de 0,042) determinan el aporte de calor necesario para alcanzar el Valor de Pasteurización deseado ($VP_{70}^{10} = 40 \text{ min}$) en el PMT de cada de las geometrías modeladas en el sistema VRT.

En las **Figuras ??** a, b y c, se presentan las evoluciones térmicas adimensionales dentro del ámbito de trabajo de Abaqus CAE v.6.7-1 correspondientes al medio de intercambio de calor (agua) durante las etapas de calentamiento y enfriamiento en el tratamiento CRT. Además, se presenta a modo de ejemplo la evolución térmica adimensional de un nodo interno (nodo 81303) del músculo patrón.

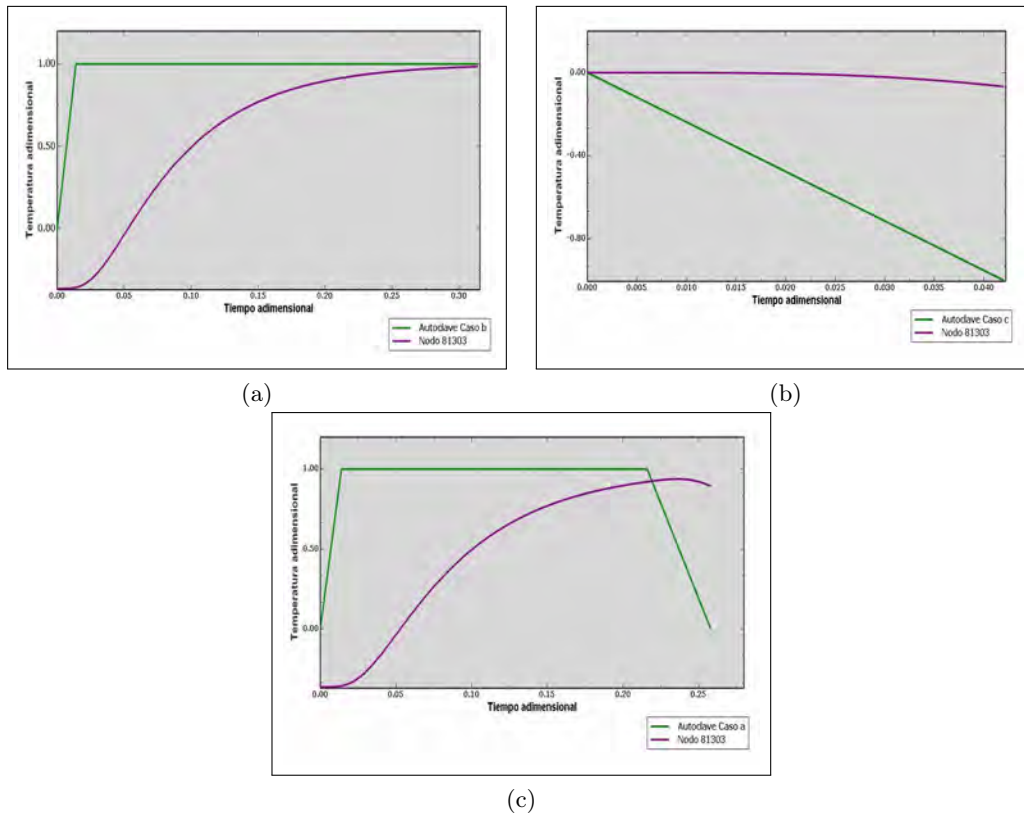


Figura 2.6: Simulación del proceso CRT aplicado al músculo *Semitendinosus* patrón. (a) Evoluciones térmicas adimensionales correspondientes al medio de intercambio de calor y al nodo interno 81303 en la fase de calentamiento. (b) Evoluciones térmicas adimensionales correspondientes al medio de intercambio de calor y al nodo interno 81303 en la fase de enfriamiento. (c) Evoluciones térmicas adimensionales y completas del medio de intercambio de calor y al nodo interno 81303.

Para el tratamiento VRT también las curvas de evolución térmica del medio de intercambio de calor (agua) y del nodo interno 81303 del músculo *Semitendinosus* patrón simulado, así como los casos de 1 al 6 de las geometrías generadas fueron obtenidas dentro del ámbito de trabajo de Abaqus CAE v.6.7-1. En las **Figuras ?? a, b y c**, se presentan, a modo de ejemplo, las evoluciones para el caso del la geometría del músculo patrón. En la **Figura ?? a y b** se presentan los ensambles de las curvas de calentamiento (caso *b*) y enfriamiento (caso *c*) y el correspondiente caso *a* completo para ambos tratamientos. En estas figuras se presenta además la evolución térmica del nodo 81303 interno del músculo *Semitendinosus* bovino patrón.

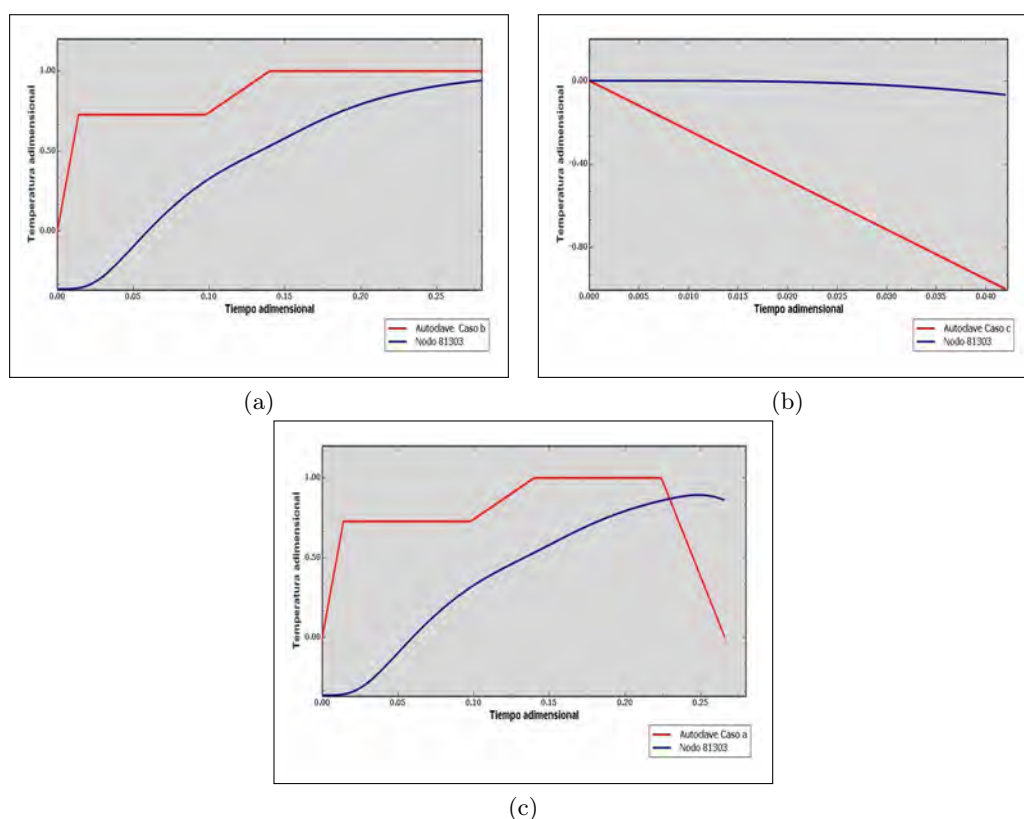
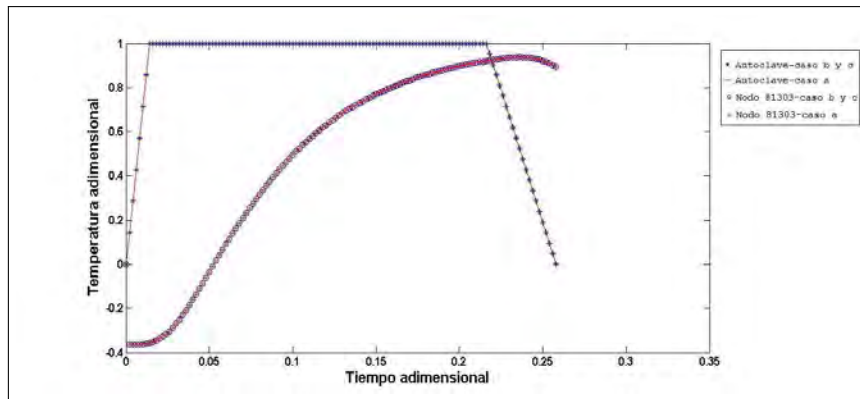
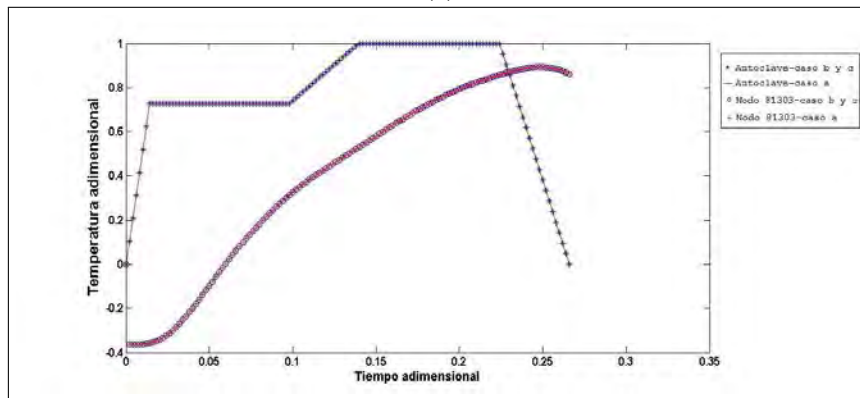


Figura 2.7: Simulación del proceso VRT aplicado al músculo *Semitendinosus* patrón. (a) Evoluciones térmicas adimensionales correspondientes al medio de intercambio de calor y al nodo interno 81303 en la fase escalonada de calentamiento. (b) Evoluciones térmicas adimensionales correspondientes al medio de intercambio de calor y al nodo interno 81303 en la fase de enfriamiento. (c) Evoluciones térmicas adimensionales y completas del medio de intercambio de calor y al nodo interno 81303.



(a)



(b)

Figura 2.8: Ensamble y verificación de las curvas de calentamiento y enfriamiento adimensionales del medio de intercambio de calor obtenidas para el sistema de cocción- pasteurización CRT, VRT y del nodo interno 81303 del músculo *Semitendinosus* bovino patrón.

2.2. Etapa Experimental.

2.2.1. Estudio de la Distribución de Parámetros Característicos de la Penetración de Calor en Músculos *Semitendinosus* bovino Cocidos-Pasteurizados *Sous vide* en un Autoclave con Ducha de Agua de Escala Piloto.

En las plantas de procesamiento de alimentos *Sous vide* a menudo se controla el tratamiento de cocción-pasteurización de los productos a través del seguimiento de la combinación temperatura-tiempo para el horno o autoclave. Sin embargo, es recomendable que el control del tratamiento se realice en el punto de mínimo tratamiento (PMT) del alimento. Ello se debe a que los envases de material plástico multilaminado pueden deformarse al ser colocados en los canastos de los equipos como consecuencia de su menor estabilidad mecánica en comparación con otros tipos de envases. Debido a que el ensayo para determinar la curva de penetración de calor es de carácter destructivo, por cada corrida solo se monitorean 1 o 2 envases. En consecuencia, resulta indispensable conocer la uniformidad alcanzada en la transferencia de calor en los equipos de tratamiento térmico, para establecer las posiciones más adecuadas para el monitoreo de la curva de penetración de calor. A fin de evitar que se evalúe un envase ubicado en la zona más favorecida en relación con el calentamiento (lo que conllevaría al subprocesamiento de los productos ubicados en posiciones menos favorecidas) resulta entonces necesario determinar parámetros que permitan evaluar la performance del equipo en relación con la uniformidad en la transferencia de calor. Uno de esos parámetros podría ser el tiempo de calentamiento necesario para alcanzar una temperatura específica. Otro sería la inversa de la pendiente de la parte lineal de la curva semilogarítmica de calentamiento (parámetro f_h , factor de velocidad de calentamiento). Además de las características de los equipos, otros factores que podrían afectar la uniformidad del tratamiento térmico son el tamaño de los envases, la cantidad de envases y el patrón de carga o layout, la temperatura inicial del producto, la temperatura de la cámara del autoclave, etc.

2.2.1.1. Diseño Experimental.

Se colocaron 8 cilindros de músculos *Semitendinosus* bovino por estante, utilizándose un total de 3 del canasto del autoclave estantes. En cada repetición del tratamiento térmico se registró la curva de penetración de calor de los 8 cilindros de un mismo estante y se midió la evolución de la temperatura del agua en la cámara del autoclave con 2 termocuplas tipo T. Los 8 cilindros en los cuales se registró la curva de penetración de calor en cada repetición correspondieron a músculos crudos, mientras que los cilindros restantes (utilizados para completar el canasto) fueron piezas ya procesadas en ensayos previos. Se realizaron 3 repeticiones del tratamiento térmico por cada estante. En todas las repeticiones (correspondientes a los distintos estantes) se mantuvo constante la cantidad de músculos por estante y la cantidad total de estantes. A su vez, en las distintas repeticiones se utilizaron similares temperaturas iniciales del producto (3 °C). La uniformidad del tratamiento térmico se evaluó a través del cálculo de 2 parámetros:

1. Tiempo de calentamiento (Δt_{10}^{70}): es el tiempo necesario para que la temperatura de los músculos evolucione desde 10 °C hasta 70 °C, para una temperatura de la cámara del autoclave de 75 °C.
2. Factor de velocidad de calentamiento (f_h): este factor se define como el tiempo requerido para que la porción lineal de la curva semilogarítmica de calentamiento atravesase un ciclo logarítmico.

2.2.1.2. Materia Prima.

Se utilizaron músculos *Semitendinosus* bovino con 48 h de tiempo post faena, provenientes de animales de razas británicas. Los músculos fueron comprados en el frigorífico Coto SA. Este establecimiento tiene implementado sistemas de gestión de la calidad (Procedimientos de Buenas Prácticas de Manufacturas - BPM - Análisis de Peligros y Puntos críticos de control HACCP). Se solicitó al proveedor que el peso y el pH de los músculos se encontraran en el rango 1.500 a 2.000 g (con grasa) y 5,4 a 5,9 respectivamente, de modo de disponer de materia prima homogénea para el procesamiento. Al ser recibidos en el Instituto Tecnología de Alimentos

(ITA), CIA, CNIA, INTA, los músculos fueron desgrasados y pesados, ver **Figura ??** a. Luego, en cada músculo se midió el pH mediante pHmetro (marca Testo Modelo 230 con electrodo de punción y sonda ATC, Alemania), descartándose aquellos músculos que presentaron valores de pH fuera del rango normal (5,4 a 5,8). Finalmente, los músculos se envasaron al vacío (envasadora Rapivac modelo Maximax 800, Argentina) en bolsas BB4L (Sealed Air, Argentina, permeabilidad al $O_2 : 30cm^3.m^{-2}.24h^{-1}.bar^{-1}$) y se almacenaron en cámara a 1 ± 1 °C durante 72 h hasta su procesamiento.



Figura 2.9: Músculos *Semitendinosus* bovino utilizados para el ensayo de distribución de calor. (a) Músculo *Semitendinosus* bovino entero. (b) Cilindro central.

2.2.1.3. Calibración de Termocuplas.

Se utilizó un baño de agua (marca LINDBERG Blue, Modelo RWB3220CY-2, Alemania) con el agua acondicionada a 70 °C. En la zona central del baño (para asegurar buen nivel de mezclado por turbulencia) se colocaron las termocuplas flexibles tipo T (Cobre/Constantan) a calibrar y un termómetro mercurio en vidrio calibrado (marca MIV Serie A N° 0682, $-10 + 150$ °C $\pm 0,5$ °C, Argentina), cuya lectura se utilizó como medida patrón.

2.2.1.4. Preparación de Muestras para Monitoreo de Curvas de Penetración de Calor.

En primer lugar, se procedió a cortar el cilindro central de cada músculo, retirando de cada pieza el extremo distal y proximal, tal como se muestra en la **Figura ??**

b. Posteriormente se registró el peso y las dimensiones (largo y diámetro mayor y menor) de cada uno de los cilindros, utilizando un calibre marca Mitutoyo Mecánico (Modelo 500-119- $300 \pm 0,04$ mm, Japón). Luego, se procedió a rotular y uniformar a los cilindros, igualando el peso (se cortaron aquellos más largos). A continuación, se colocó a cada uno de los 8 cilindros a ser evaluados una termocupla flexible tipo T calibrada. La misma se colocó en el centro geométrico del cilindro, insertándola en dirección axial (en la posición del eje central del cilindro, paralelo a la dirección de las fibras). Posteriormente, los cilindros fueron envasados al vacío en bolsas *Cook-in* Cryovac CN-640 (Sealed Air, Argentina). Antes del envasado, en las bolsas plásticas se colocó un dispositivo denominado stuffing box Modelo C-52 (Ecklund Harrison Tech, USA), -Figura ?? a- , el cual permite pasar el termopar flexible a través del material multilaminado plástico del envase y no perder la condición de hermeticidad. En la **Figura ?? b**, se presenta el cilindro dispuesto para ser envasado al vacío en una envasadora de doble campana (marca Rapivac Modelo Maximax 800, Argentina). Luego del envasado, se realizó la verificación del cierre de la bolsa, controlando la ausencia de pliegues o la superposición de la película de envasado. Además del nivel de vacío, luego del envasado, se verificó el funcionamiento de las termocuplas. Finalmente, los cilindros envasados se almacenaron en cámara de refrigeración (1 ± 1 °C) hasta el día siguiente, en el cual se aplicó el tratamiento térmico.



(a)



(b)

Figura 2.10: Inserción de termocupla tipo T dentro de la pieza cilíndrica de carne envasada. (a) Dispositivo stuffing box. (b) Pieza cilíndrica dispuesta para el envasado al vacío.

2.2.1.5. Aplicación de los Tratamientos Térmicos.

El estudio de penetración de calor se llevó a cabo en un autoclave con lluvia de agua e inyección de aire en la cámara, (marca Steriflow Barriquand modelo Microflow Roanne, Francia)- **Figura ??**. El mismo constituye el modelo de planta piloto correspondiente a la marca Steriflow Barriquand y consta de un único canasto, **Figuras ??** a y b. En este tipo de autoclaves, el agua opera en reciclo, siendo bombeada desde el fondo de la cámara hacia el intercambiador de calor externo donde el agua intercambia calor con vapor (fase de calentamiento y retención) o con agua fría o refrigerada (fase de enfriamiento).

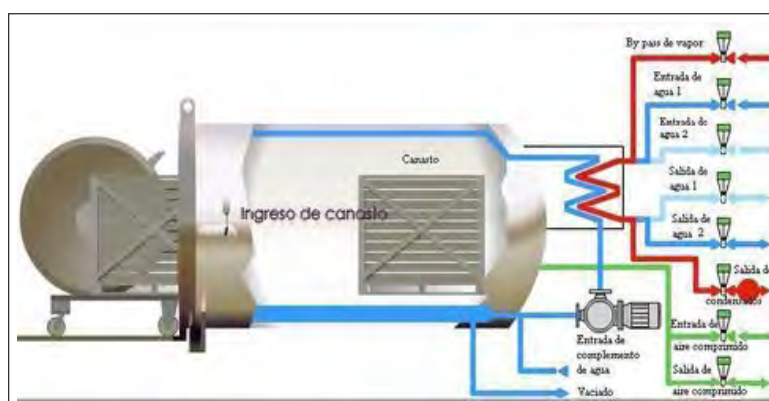


Figura 2.11: Esquema operativo del autoclave Steriflow Barriquand Modelo Microflow.



(a)



(b)

Figura 2.12: Autoclave Steriflow Barriquand Modelo Microflow instalado en planta piloto del ITA, CIA, CNIA, INTA. (a) Autoclave cerrado. (b) Autoclave y canasto contenedor.

Luego del intercambio térmico, el agua retorna a la cámara del autoclave por la

parte superior de la misma y es dispersada en forma de lluvia a través de una placa perforada. Dentro de la cámara, el agua atraviesa el conjunto de envases contenidos en el canasto de la autoclave. El canasto puede girar a fin de favorecer la transferencia de calor mediante la agitación fondo-tapa-fondo (end-over-end) de los envases. Es posible trabajar tanto en el rango de temperaturas de pasteurización (hasta 100 °C) como de esterilización (hasta 135 °C) en combinación con un sistema de enfriamiento normal (agua de enfriamiento, proveniente del tanque general de la planta a una temperatura entre 10 y 15 °C, dependiendo de la estación del año) o con agua refrigerada (entre 3 y 10 °C) mediante un módulo de refrigeración. Entre las ventajas principales de este equipo se pueden citar: distribución homogénea de la temperatura en la cámara del autoclave (diferencia menor a 1 °C entre las temperaturas medias de la zona de calentamiento más rápido y más lento de la cámara) y disminución de tiempos de proceso porque se eliminan tiempos muertos, debido a que las fases de calentamiento, retención y enfriamiento se realizan en forma continua con el mismo agua que recircula. Además, la cantidad de efluente de la planta se reduce porque el agua de reciclaje del autoclave se puede almacenar en cisternas cuando termina una corrida y reutiliza en la siguiente. No es necesario incorporar cloro en el agua de enfriamiento (como en los autoclaves que operan con vapor) porque el agua que enfría los envases fue previamente pasteurizada o esterilizada durante el tratamiento térmico. La principal desventaja es el alto costo del equipo (??).

2.2.1.6. Condiciones Operativas Aplicadas.

En el canasto del autoclave marca Steriflow Barriquand modelo Microflow se colocaron los cilindros en 3 niveles o estantes -Figura ?? a-: nivel inferior correspondiente al piso del canasto, nivel medio (ubicado sobre un cuadro metálico y rejilla plástica) y el nivel superior (ubicado sobre un cuadro metálico y rejilla plástica). En cada nivel se ubicaron 8 cilindros, los cuales se colocaron del modo siguiente: 3 cilindros adelante (zona del canasto más cercana a la puerta de la cámara del autoclave), 3 en la parte posterior (próximos al fondo de la cámara del autoclave) y 2 cilindros en la zona central del estante -Figura ?? b-.

El autoclave se operó en modo estático (sin rotación del canasto). En los ensayos se utilizó una temperatura de la cámara del autoclave de 75 °C (temperatura del



Figura 2.13: Ubicación de los cilindros dentro del canasto del autoclave marca Steriflow Barriquand modelo Microflow. (a) Ubicación de los cilindros en los tres estantes (superior, medio e inferior) del autoclave. (b) Ubicación de las muestras en nivel inferior del autoclave (vista superior).

agua en la cámara) y un *come-up-time*, (*CUT*, tiempo necesario para alcanzar la temperatura de régimen) de 5 minutos. Para el registro de los curvas de penetración de calor se utilizó un multímetro digital (marca Fluke Modelo Hydra 2625A, John Fluke Mfg. Co., Inc., Everett, USA), aplicando un intervalo de *scan* de 10 s y una precisión de $\pm 0,1$ °C. Durante el registro de la curva de penetración de calor los datos fueron almacenados en una PC, conectada al multímetro digital a través de una interfase RS32. Luego del tratamiento térmico los cilindros fueron retirados del autoclave y sumergidos en un baño de agua-hielo externo a 0 °C, para luego ser llevados a cámara de refrigeración (1 ± 1 °C) durante 24 h hasta su evaluación.

2.2.1.7. Controles Post-Proceso de los Cilindros de Carne Cocidos.

Luego del tratamiento térmico, se verificó la hermeticidad de los envases y se procedió a la apertura de los mismos, al retiro de las termocuplas y a la determinación del peso de los cilindros cocidos -Figura ?? a-. Posteriormente se verificó que cada termopar se encontrara en la posición correcta (centro térmico del cilindro) -Figura ?? b-, para lo cual se observó una rodaja de la zona central y se comprobó que no se hubiese producido su desplazamiento hacia la superficie de la pieza -Figura ?? c-. En los casos en los cuales se comprobó el desplazamiento del termopar del centro térmico, se descartaron las curvas de penetración de calor correspondientes a esos cilindros.

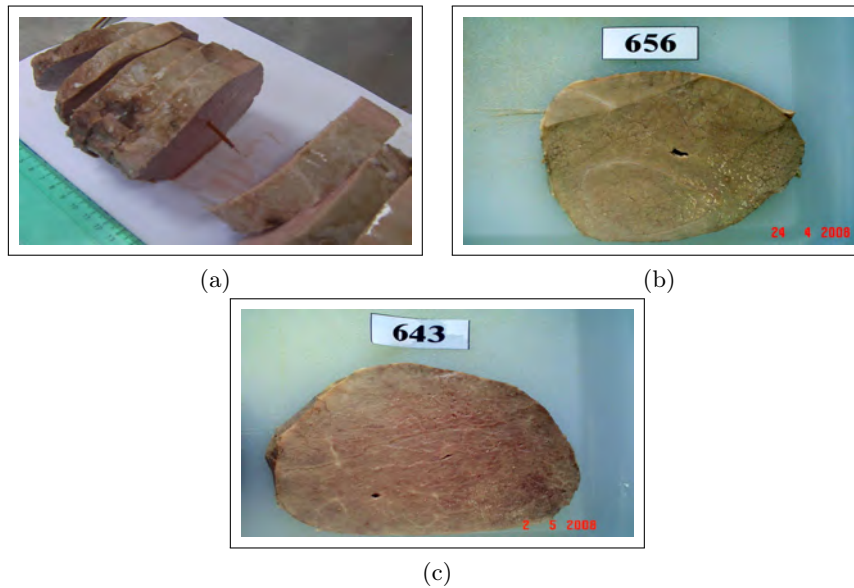


Figura 2.14: Verificación de la posición correcta de la termocupla en el centro térmico del cilindro. (a) Vista superior de cilindro cortado en rodajas. (b) Termocupla ubicada en el centro térmico del cilindro. (c) Desplazamiento de la termocupla hacia la superficie del cilindro.

2.2.1.8. Cálculo de los Parámetros de Penetración de Calor.

Se presentan a continuación 2 parámetros que caracterizan a la curva de penetración de calor, los cuales fueron estudiados para la distribución de calor en la cámara del autoclave con ducha de agua:

1. Tiempo de calentamiento (Δt_{10}^{70}): tiempo necesario para que la temperatura del centro térmico de los cilindros evolucione desde 10 °C hasta 70 °C, para una temperatura de la cámara del autoclave de 75 °C.
2. Factor de velocidad de calentamiento (f_h): tiempo requerido para que la porción lineal de la curva semilogarítmica de calentamiento atraviese un ciclo logarítmico. Este factor es numéricamente igual al negativo de la inversa de la pendiente de la parte lineal de la curva semilogarítmica de calentamiento, (**Ecuación ??**).

$$f_h = \frac{-1}{\text{pendiente}} \quad (2.2.17)$$

Antes de realizar el cálculo de los parámetros característicos fue necesario transformar los datos de las curvas de penetración de calor obtenidos en los distintos ensayos. Así, se procedió a ajustar las temperaturas correspondientes a las curvas de penetración de calor debido a que en este tipo de estudios son inevitables pequeñas variaciones de la temperatura de la cámara del autoclave y de la temperatura inicial del producto. Estas modificaciones pueden causar una distribución no homogénea de los parámetros de penetración de calor. Por esta razón, en este trabajo se utilizaron las ecuaciones de Schultz y Olson, (?), para ajustar tanto la temperatura inicial del producto como la temperatura del autoclave en sus valores nominales de 1 °C y 75 °C, respectivamente. Posteriormente se obtuvieron las curvas semilogarítmicas de calentamiento, graficando el logaritmo de la diferencia entre la temperatura del autoclave y del alimento, en función del tiempo de tratamiento térmico. Una vez obtenidas las curvas semilogarítmicas, se procedió a establecer el inicio del proceso (tiempo cero). Para ello se desplazó el inicio del proceso todo el tiempo correspondiente al *CUT* (se consideró despreciable el aporte de esta etapa a la letalidad del proceso). Posteriormente se realizó el cálculo de las pendientes de calor.

2.2.1.9. Análisis Estadístico.

El análisis estadístico realizado fue a un Análisis de Varianza (ANOVA) de un solo factor (one way ANOVA). En el modelo planteado, el factor correspondió al *estante* (subíndice *i*), siendo sus niveles: superior, medio e inferior. A su vez, el subíndice *j* correspondió a 3 repeticiones por estante. El modelo utilizado se representa mediante la **Ecuación ??**:

$$Y_{ij} = \zeta_i + \xi_{ij} \quad (2.2.18)$$

donde:

Y_{ij} = variable respuesta de la *j*-ésima repetición (*j*= 1,2,3), en el *i*-ésimo estante (*i*=1,2,3).

ζ_i = efecto del *i*-ésimo estante.

ξ_{ij} = error que se supone independiente e idénticamente distribuido normal (0, σ^2).

El análisis estadístico incluyó la realización de la prueba de homogeneidad de

varianzas (Test de Levene) con un nivel de significación del 5 % ($p = 0,05$). A su vez, se utilizó como prueba de comparación de medias al test DMS (Diferencias Mínimas Significativas), con un nivel de significación del 5 % ($p = 0,05$).

Para el análisis estadístico de los datos de esta primera etapa experimental se utilizó el software SPSS (?)

2.2.2. Validación de los Resultados de la Etapa de Modelado y Simulación de los Ciclos CRT y VRT Aplicados en la Cocción-Pasteurización *Sous vide* de músculo *Semitendinosus* bovino.

2.2.2.1. Diseño Experimental.

El ensayo se organizó en 2 bloques, en cada uno de los cuales se compararon los tratamientos CRT y VRT simulados en el ítem ?? del presente Trabajo de Tesis. En cada bloque se utilizaron 18 músculos *Semitendinosus* bovino, 9 de los cuales fueron tratados mediante el ciclo CRT y 9 con el ciclo VRT, ambos ciclos con fase de mantenimiento a 75 °C. El ensayo total demandó 36 músculos, (18 cada bloque x 2 bloques).

La cantidad de músculos procesados en el autoclave (marca Steriflow Barriquand Modelo Microflow, Roanne, France) por cada tratamiento térmico (ciclo CRT o VRT) fue de 18. De ese total, 9 músculos se destinaron para análisis según el diseño explicado en el párrafo anterior y 9 músculos se colocaron en el canasto del autoclave como “relleno” para completar la carga del mismo. Los 18 músculos se distribuyeron entre los 3 estantes del canasto del autoclave, colocándose 6 músculos por estante, **Figuras ??**. Los 9 músculos correspondientes al diseño experimental se distribuyeron en el estante medio e inferior (**Figura ??**; indicación Análisis y Análisis & Termocupla). A su vez, de esos 9 músculos se seleccionaron 6 a los cuales se les insertó una termocupla tipo T (**Figura ??**; indicación Análisis & Termocupla) según se describe en ???. Los 9 músculos “relleno” se ubicaron 6 en el estante superior y 3 en el estante inferior. Los músculos de “relleno” se reutilizaron en las distintas corridas correspondientes a los 2 tratamientos térmicos (CRT y VRT). La ubicación de los músculos en los 3 estantes del canasto del autoclave se realizó tomando en

consideración los resultados obtenidos en el estudio de distribución de los parámetros característicos de la penetración calor en músculos cocidos-pasteurizados (ítem ??)



Figura 2.15: Músculos *Semitendinosus* bovino en los estantes del canasto del autoclave con ducha de agua marca Steriflow Barriquand Modelo Microflow. (a) Estante Inferior. (b) Estante Medio. (c) Estante Superior. (d) Ingreso del canasto a la cámara del autoclave.

2.2.2.2. Materia Prima.

En los ensayos se utilizaron músculos *Semitendinosus* bovino con 48 h de tiempo post-faena, provenientes de animales de razas británicas homogéneas. Los músculos se compraron en la sucursal Morón de la cadena de hipermercados JUMBO. La planta frigorífica que abastece a dicho hipermercado tiene implementados procedimientos BPM y HACCP. Al proveedor se le solicitaron músculos con las siguientes especificaciones: peso entre 1.500 y 2.000 g y pH en el rango 5,4 - 5,9. En relación al peso de los músculos a utilizar en los ensayos, se estableció el rango indicado que no fue posible limitarlo a 1.800 g, por peso en las simulaciones. Sin embargo, si el peso de algún músculo difería del establecido en las simulaciones, se compensaba mediante la modificación del factor de *scaling* en el valor del peso del músculo. En las Figuras ??, ?? y ?? se presentan las fotografías tomadas a

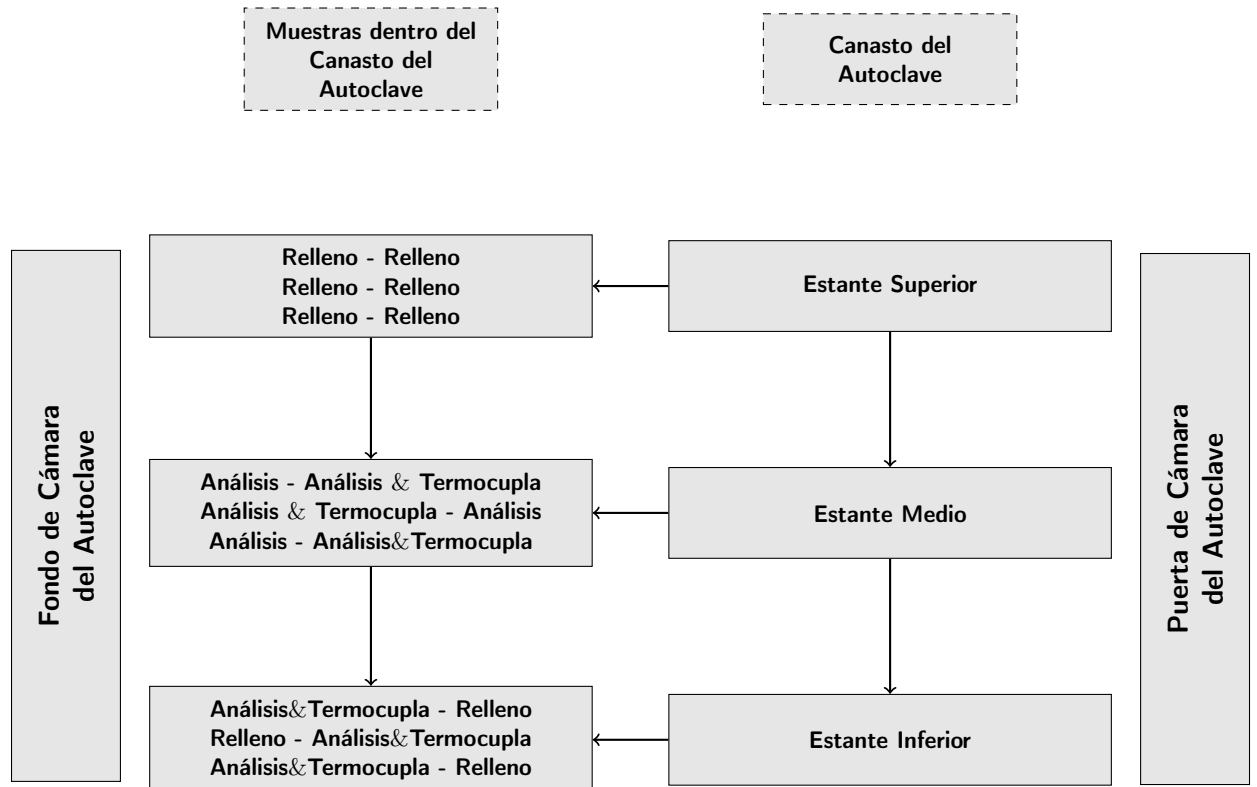


Figura 2.16: Esquema de ubicación de los músculos *Semitendinosus* bovino en los estantes dentro del canasto del autoclave Steriflow Barriquand Modelo Microflow.

los músculos bovinos mediante una cámara digital (marca Kodak, Modelo Easy Share P880, EE.UU.). Los músculos fueron recibidos en el Instituto Tecnología de Alimentos (ITA), CIA, INTA e inmediatamente fueron desgrasados superficialmente. Posteriormente se tomó su peso con una balanza electrónica (marca Sartorius Modelo CPA34001P capacidad hasta $34.000 \pm 0,5$ g, Alemania). A su vez, se midió el pH en el extremo proximal de los músculos mediante pHmetro (marca Testo Modelo 230 con electrodo de punción y sonda ATC, Alemania). Los pesos promedio de los músculos desgrasados utilizados en los ensayos con el ciclo CRT fueron de $1.545,2 \text{ g} \pm 193,65 \text{ g}$, mientras que los utilizados con al ciclo VRT fueron de $1.493,9 \text{ g} \pm 112,21 \text{ g}$. A su vez, los valores promedio de pH fueron $5,58 \pm 0,07$ para los músculos utilizados en los ensayos correspondientes al ciclo CRT y $5,81 \pm 0,1$ para los músculos correspondientes al ciclo VRT. Los músculos desgrasados fueron envasados al vacío en bolsas Cryovac BB4L (permeabilidad al O_2 : $30 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot 24 \text{ h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ Sealed Air, Argentina) utilizándose una envasadora de vacío doble campana (marca Rapivac

Modelo Maximax 800, Argentina) y posteriormente fueron almacenados en cámara de refrigeración a 1 ± 1 °C durante 72 h hasta su procesamiento.

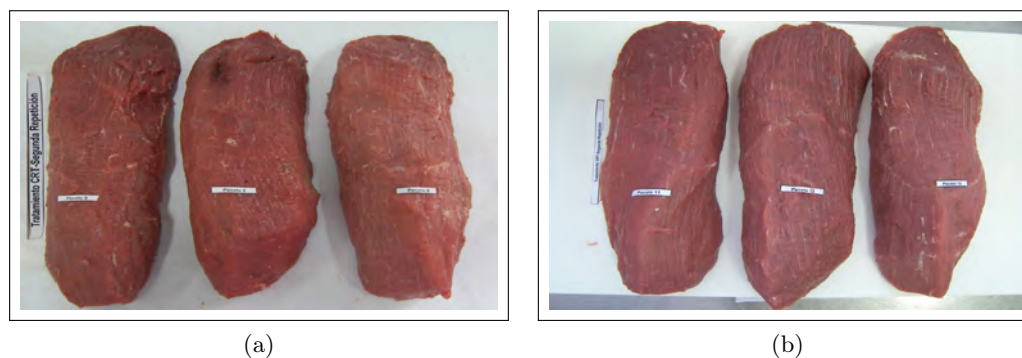


Figura 2.17: Músculos *Semitendinosus* bovinos ha ser utilizados en tratmientos térmicos aplicados (CRT-VRT). (a) Músculos *Semitendinosus* bovinos crudos a ser procesados mediante ciclo CRT. (b) Músculos *Semitendinosus* bovinos crudos a ser procesados mediante ciclo VRT.

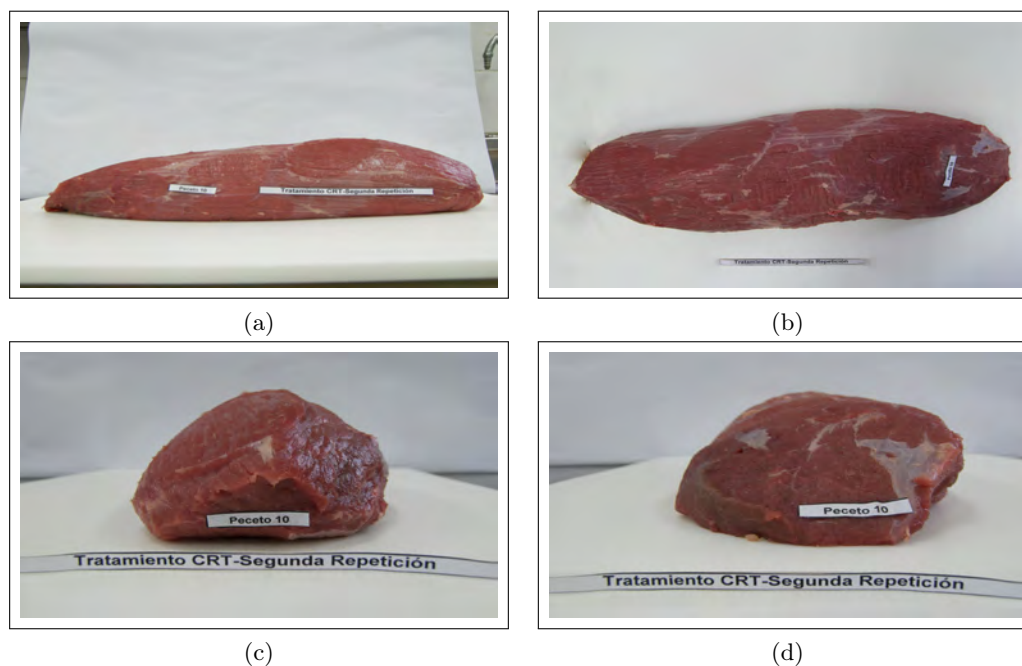


Figura 2.18: Diferentes vistas de un músculo *Semitendinosus* bovino a ser procesado mediante ciclo CRT. (a) Vista eje z. (b) Vista eje x. (c) Vista proximal (eje y). (d) Vista distal (eje y).

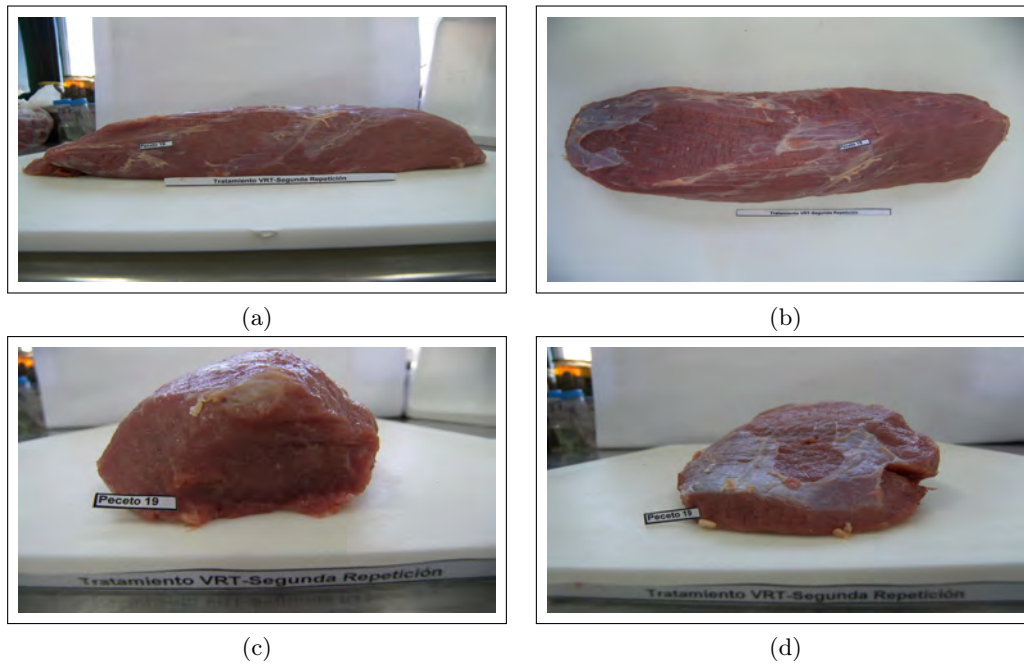


Figura 2.19: Diferentes vistas de un músculo *Semitendinosus* bovino a ser procesado mediante ciclo VRT. (a) Vista eje z. (b) Vista eje x. (c) Vista proximal (eje y). (d) Vista distal (eje y).

2.2.2.3. Preparación de los Músculos.

En primer lugar se determinó el peso con una balanza electrónica (marca Sartorius Modelo CPA34001P, capacidad hasta $34000 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$, Alemania), y las dimensiones (LX, LY, LZ) de cada uno de los músculos *Semitendinosus* bovino desgrasados a ser procesados. Para este último procedimiento se utilizó un calibre (marca Mitutoyo Mecánico Modelo 500-119 - $300 \pm 0,04 \text{ mm}$, Japón). En el caso presentado en la **Figura ??** a, la dimensión LX fue medida cada 2,3 cm, desde el extremo distal al proximal (ver también **Figuras ??** b y c). Al mismo tiempo, cada punto en el cual se midió de la dimensión LX (medida cada 2,3 cm en la dirección de la dimensión LZ) coincidió con el punto en donde se realizó la medición de la dimensión LY. Los músculos siempre se ubicaron en posición caudal, tanto en el momento de las mediciones como en la toma de fotografías, con la utilización de una cámara digital (marca Kodak, Modelo Easy Share P880, EE.UU). En la **Tabla ??** se presentan, a modo de ejemplo, las longitudes LX y LY correspondientes a un músculo *Semitendinosus* bovino de peso de 1.854 g y longitud LZ = 37,2 cm. Los valores

resaltados en negrita en la **Tabla ??** corresponden a las dimensiones utilizadas para dicho músculo en la simulación.

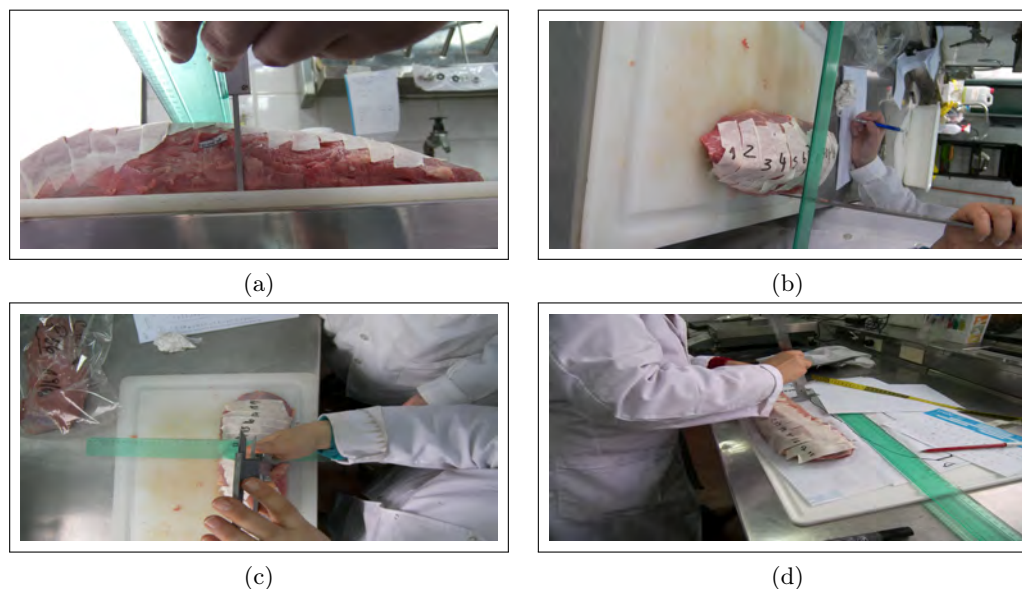


Figura 2.20: Etapas de la medición de las dimensiones del músculo *Semitendinosus* bovino. (a) Vista eje z. (b) Vista eje x. (c) Vista eje y. (d) Vista lateral.

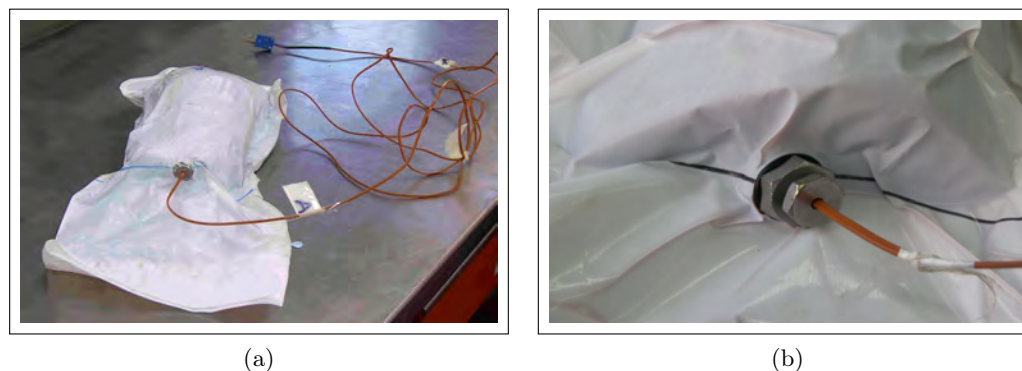


Figura 2.21: Termocupla flexible tipo T insertada en el músculo *Semitendinosus* bovino envasado al vacío. (a) Vista distal. (b) Detalle del dispositivo stuffing box.

Posteriormente a 6 de los músculos destinados a análisis, se les insertó una termocupla flexible tipo T calibrada. Para ello, en una bolsa *Cook-in Cryovac* CN-640 (permeabilidad máxima al O_2 $35\text{ cm}^3.m^{-2}.24h^{-1}.bar^{-1}$, Sealed Air, Argentina), utilizada para realizar el tratamiento térmico de los músculos, se colocó un dispositivo stuffing box (tuerca y contratuerca de acero inoxidable, con o-ring y gasket de caucho,

Tabla 2.1: Ejemplo de dimensiones experimentales correspondientes a un músculo *Semiten-dinosus* bovino.*

Puntos de medición	LX (cm)	LY (cm)
1	5,8	4,2
2	7,1	4,3
3	8,6	5,7
4	9,4	6,3
5	10,1	6,2
6	10,3	6,2
7	10,3	6,7
8	10,3	6,4
9	10,9	6,7
10	11,3	6,3
11	11,7	6,3
12	10,1	6,5
13	10,1	6,4
14	10,6	6,2
15	11,1	6,1
16	10,6	5,6
17	10,2	5,1
18	9,9	4,2
19	9,2	3,6
20	7,6	2,8
21	6,5	2,1
22	4,1	1,1

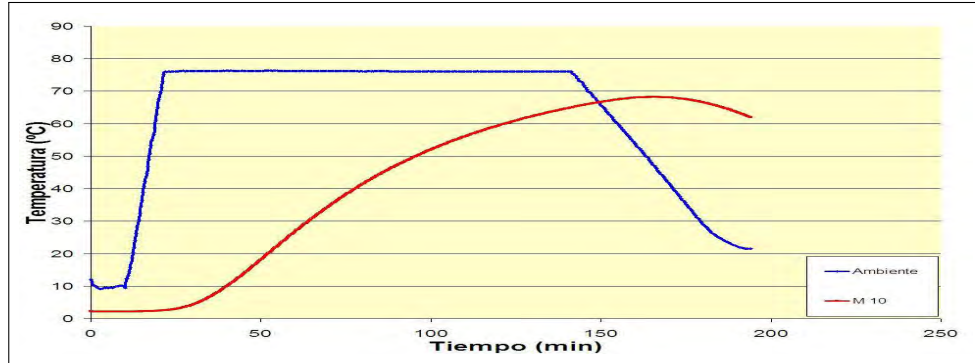
*Peso músculo crudo: 1.854 g; LZ=37,2 cm.

Modelo C-5.2, Ecklund-Harrison Technologies, Inc., Florida, USA). Este dispositivo permitió introducir el termopar flexible a través de la película de la bolsa *Cook-in* sin perder la condición de hermeticidad y de vacío. La termocupla se introdujo a través del extremo distal en dirección axial del músculo hasta la ubicación del PMT del mismo, determinado por simulación, **-Figuras ??** a y b-. Posteriormente, los músculos fueron envasados al vacío en una envasadora de vacío doble campana (marca Rapivac Modelo Maximax 800, Argentina), verificando el correcto cierre de cada bolsa y el mantenimiento del vacío. A continuación, los músculos fueron colocados en el canasto del autoclave y este fue llevado a cámara de refrigeración (1 ± 1 °C) con un día de anticipación al tratamiento térmico. Este procedimiento se realizó para los diferentes ensayos correspondientes a los ciclos estudiados (CRT y VRT) y tuvo por objetivo asegurar que todos los músculos presenten la misma temperatura al inicio del tratamiento térmico.

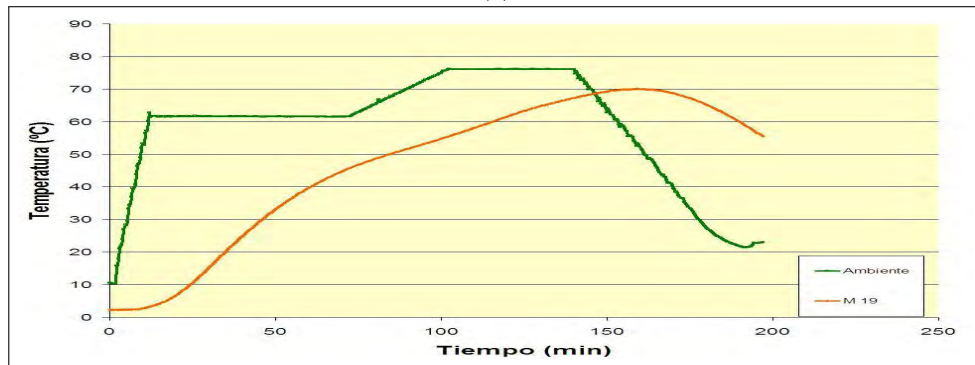
2.2.2.4. Aplicación de los Tratamientos Térmicos.

Los tratamientos térmicos (CRT y VRT) fueron aplicados en un autoclave con ducha de agua (marca Steriflow Barriquand Modelo Microflow, Roanne, Francia). El autoclave se operó en modo estático, sin rotación del canasto. El canasto cargado con los músculos (a una temperatura inicial de 1 ± 1 °C) se retiró de la cámara de refrigeración y se ingresó a la cámara del autoclave para dar inicio al tratamiento térmico. El tiempo de puesta en régimen, (*come-up-time*), del autoclave, es decir el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de proceso (75 °C), fue de 10 minutos, partiendo desde temperatura ambiente (20 °C). En la **Figura ?? a**, se presenta el caso del ciclo CRT; al finalizar el *come-up-time* se inició la fase de mantenimiento a 75 °C, la cual tuvo una duración de 122 y 120 minutos, para el primer y segundo bloque, respectivamente. Las fases de mantenimiento fueron logradas gracias a la ejecución de rutinas de programación utilizadas para simular el proceso térmico CRT, dependiendo de la carga de músculos bovinos procesados por bloque. A su vez, la **Figura ?? b** corresponde al ciclo VRT, en el cual se aplicaron dos fases mantenimiento: la primera a 60 °C durante 60 minutos y la segunda fase a 75 °C durante 38 y 34 minutos, para el primer y segundo bloque, respectivamente. El incremento de temperatura de 60 °C hasta 75 °C se realizó mediante un rampa de $0,5$ °C min^{-1} . La fase de enfriamiento fue programada desde el autoclave para disminuir la temperatura del agua desde 75 °C hasta 20 °C aproximadamente durante 45 minutos, tiempo habitual que lleva este proceso. El tiempo de enfriamiento se definió considerando el aporte de la fase de enfriamiento -hasta 65 °C- al Valor de Pasteurización VP_{70}^{10} , el cual se complementó con el aporte de la fase de calentamiento - desde 65 °C - para alcanzar el VP_{70}^{10} de 40 minutos, obtenido mediante simulación. El monitoreo y registro de las curvas de penetración de calor en los músculos y la evolución de la temperatura en el agua de la cámara del autoclave durante el tratamiento térmico se realizó con un multímetro digital (marca Fluke Modelo Hydra 2625A , John Fluke Mfg. Co., Inc., Everett, USA). En el monitoreo de los datos se utilizó un intervalo de scan de 10 s y una precisión de 0,1 °C y los datos fueron almacenados en una computadora personal (Toshiba Tecra A19 (c9)) conectada al multímetro digital a través de una placa RS32. Posteriormente, los datos fueron procesados en con el software MATLAB v.7. Luego del tratamiento térmico, los músculos se retiraron de la cámara del autoclave y fueron sumergidos en un baño

de agua-hielo externo a 0 °C. Posteriormente, los músculos fueron almacenados en cámara de refrigeración a 1 ± 1 °C durante 18 h. hasta su análisis.



(a)



(b)

Figura 2.22: Curvas experimentales correspondientes a la temperatura del agua de la cámara del autoclave y de un músculo *Semitendinosus* bovino sometido a tratamientos de cocción-pasteurización *Sous vide*. (a) Ciclo CRT y PMT del músculo *Semitendinosus* bovino. (b) Ciclo VRT y PMT del músculo *Semitendinosus* bovino.

2.2.2.5. Análisis de las muestras.

Los músculos correspondientes a cada ciclo ciclo CRT o VRT, para cada bloque, fueron retirados de la cámara de refrigeración, desembolsados, secados con papel absorbente y pesados para determinar la pérdida de peso por cocción. A su vez, en esos 9 músculos se midió el pH en el extremo proximal de cada uno. Posteriormente, de los 9 músculos se separaron 3 para realizar el análisis sensorial visual y determinar los parámetros cromáticos. De cada uno de esos músculos se extrajo una rodaja de 4 cm de espesor, la cual se destinó al análisis de apreciación visual y el resto de

cada músculo se evaluaron los parámetros cromáticos (en una de las superficies interiores del cilindro). Las **Figuras ??** a y b representan, a modo de ejemplo, 3 músculos tratados mediante el ciclo CRT y los otros 3 tratados mediante el ciclo VRT. Ambos grupos fueron utilizados para análisis de apreciación visual y la determinación de parámetros cromáticos. En los restantes 6 músculos se midieron las dimensiones LX, LY, LZ, **Figuras ??** y **??**. Posteriormente los músculos fueron cortados en rodajas de 2 cm de espesor. Estos músculos fueron seccionados en rodajas y fotografiados utilizando una cámara digital marca Kodak Easy Share P880, con el objetivo encontrar y medir la posición de la termocupla luego de cada tratamiento térmico aplicado. La medición de la posición de la rodaja final, dónde se presume que se encontrará el punto de mínimo tratamiento. A su vez, esos 6 músculos se utilizaron en la determinación de la resistencia al corte mediante la técnica de Warner Bratzler (utilizando Cizalla de Warner-Bratzler y Celda de Warner-Bratzler como se describe el ítem ??).



Figura 2.23: Músculos *Semitendinosus* bovino coccidos-pasteurizados utilizados para análisis de apreciación visual y determinación de parámetros cromáticos. (a) Vista de muestras procesadas mediante ciclo CRT. (b) Vista de muestras procesadas mediante ciclo VRT.

2.2.2.5.1 Pérdida de Peso.

El parámetro pérdida de peso se calculó de acuerdo a la siguiente relación:

$$\text{Pérdida de Peso \%} = \frac{(\text{Peso inicial} - \text{Peso final}) * 100}{\text{Peso inicial}} \quad (2.2.19)$$

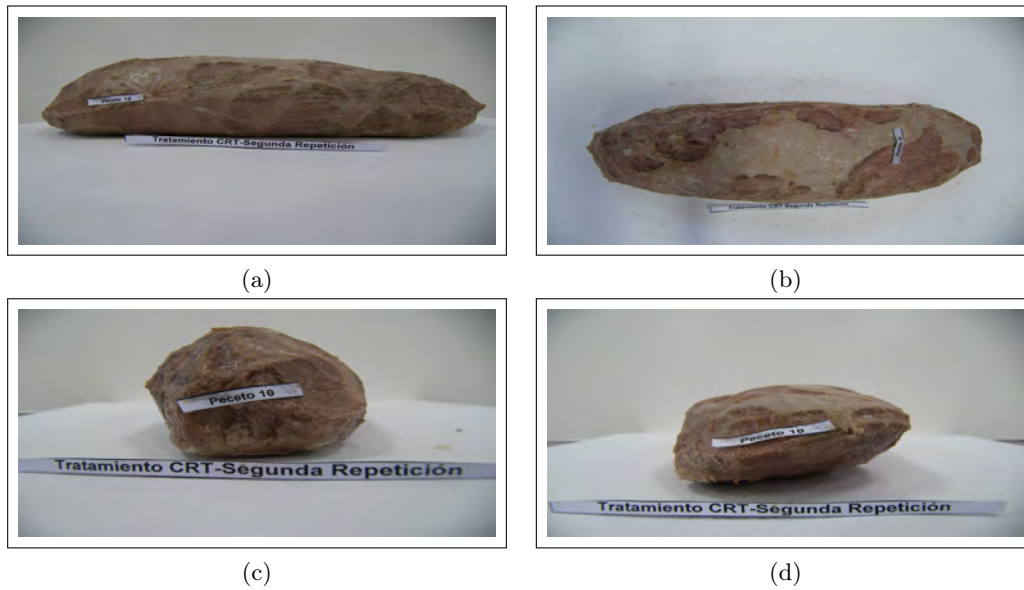


Figura 2.24: Diferentes vistas del músculo *Semitendinosus* bovino cocido-pasteurizado mediante ciclo CRT. (a) Vista eje z. (b) Vista eje x. (c) Vista proximal (eje y). (d) Vista distal (eje y).

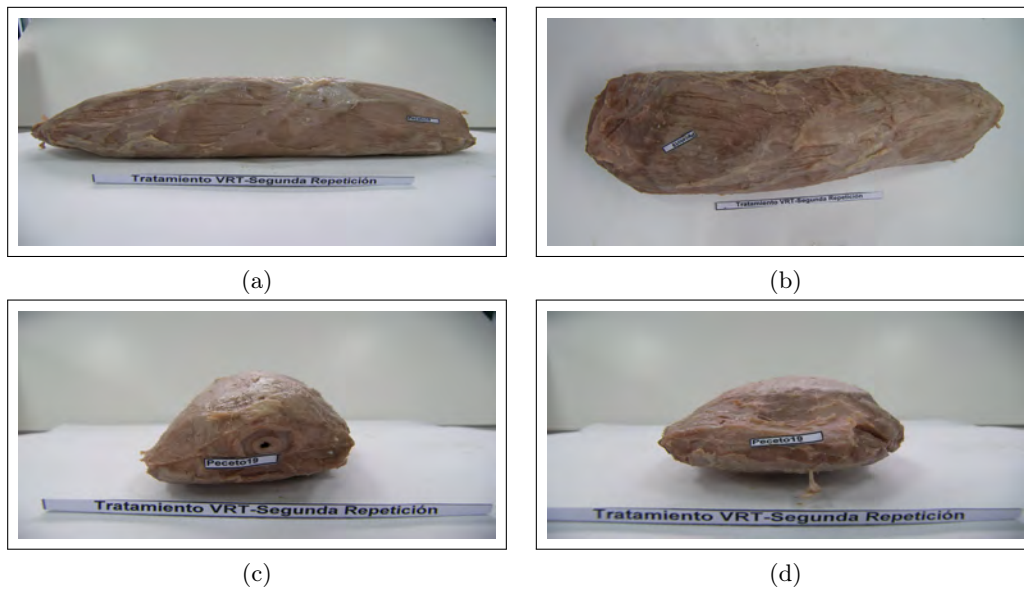


Figura 2.25: Diferentes vistas del músculo *Semitendinosus* bovino cocido-pasteurizado mediante ciclo VRT. (a) Vista eje z. (b) Vista eje x. (c) Vista proximal (eje y). (d) Vista distal (eje y).

donde el peso inicial corresponde al músculo crudo desgrasado y el peso final es el peso del músculo luego del tratamiento térmico (ciclos CRT o VRT). Para la

determinación de los pesos de los músculos crudos y cocidos se utilizó una balanza electrónica (marca Sartorius Modelo CPA34001P con capacidad hasta 34.000 g \pm 0,5 g, Alemania)-**Figura ?? a**-.

2.2.2.5.2 Medición del pH.

La medición del pH de los músculos *Semitendinosus* bovino crudos y cocidos se realizó en la zona proximal de los mismos, empleando un pHmetro (marca Testo Modelo 230 con electrodo de punción y sonda ATC, Alemania) previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4.00 y 7.00 (**Figura ?? b**).



Figura 2.26: Determinación de peso y pH en músculos *Semitendinosus* bovino crudos. (a) Determinación de peso de la pieza cárnica (b) Medición de pH en el extremo distal de la pieza cárnica.

2.2.2.5.3 Resistencia al Corte.

La resistencia al corte de la carne cocida se evaluó mediante la técnica de Warner Bratzler utilizando 2 sistemas diferentes. Por un lado se utilizó la Cizalla de Warner-Bratzler (Chatillon, New York, USA), provista de una cuchilla triangular (**Figuras ??**). A su vez, también se determinó la resistencia al corte utilizando una celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida (celda aprobada por el United State Department of Agriculture -USDA). En este caso las mediciones se realizaron con el analizador de textura (marca Stable Micro Systems Modelo TA.XTplus). Las **Figuras ??** corresponden a dicha celda. Las velocidades de la misma durante el test, así como pre y post test fueron en todos los casos de 3mm/s.

Se destaca además, la realización de un estudio de resistencia al corte, utilizando solamente la Celda de Warner-Bratzler (elemento de corte tipo “V” invertida). En este estudio de carácter comparativo (por bloque y por ciclo CRT y VRT), se utilizaron por músculo *Semitendinosus* bovino 2 rodajas tomadas en forma consecutivas del mismo. Una de esas rodajas fue utilizada para realizar las extracciones de cilindros en la zona periférica, mientras que en la segunda rodaja la extracción de cilindros fue realizada toda la rodaja.

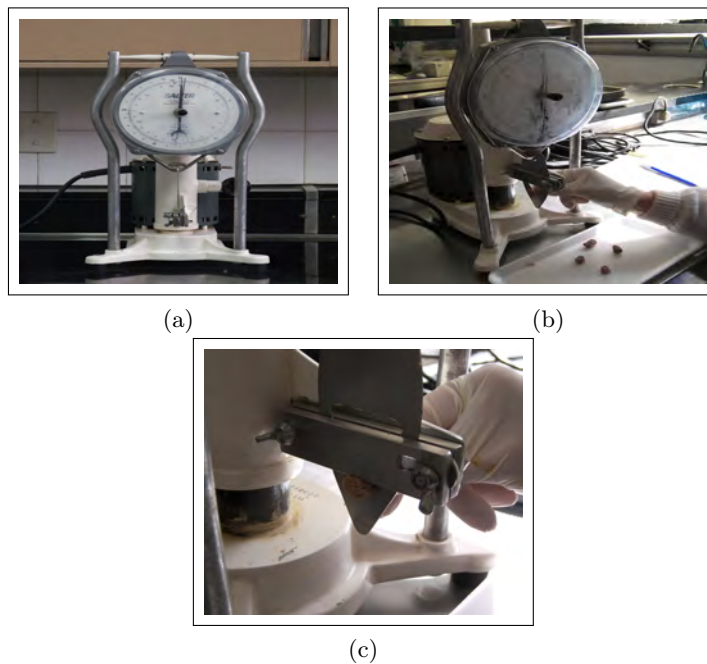


Figura 2.27: Medición de la resistencia al corte de la carne cocida evaluada mediante la técnica de Warner Bratzler, utilizando una cuchilla triangular. (a) Cizalla de Warner-Bratzler (Chatillon, New York, USA), provista de una cuchilla triangular. (b) Inserción del cilindro dentro de la cuchilla triangular. (c) Corte realizado mediante la cuchilla triangular.

Para la evaluación de la resistencia al corte se extrajeron 3 rodajas de la parte central de cada músculo (1 rodaja para la determinación en la Cizalla de Warner-Bratzler y las restantes 2 rodajas para la determinación en Celda de Warner-Bratzler). Estas rodajas se colocaron en bolsas polietileno y fueron almacenadas en cámara de refrigeración ($1 \pm 1^\circ\text{C}$) durante 24 h.

La extracción de las muestras cilíndricas (**Figuras ??**), el acondicionamiento de las mismas y el procedimiento de medición se realizaron siguiendo las pautas

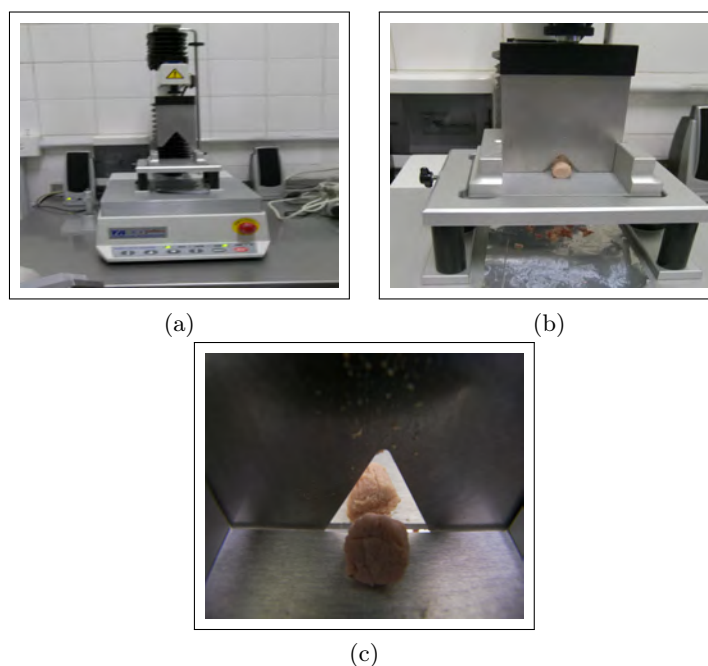


Figura 2.28: Medición de la resistencia al corte de la carne cocida utilizando una Celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida. (a) Celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida. (b) Inserción del cilindro dentro de la cuchilla . (c) Corte realizado mediante elemento de corte ripo “V” invertida.

generales establecidas por (?). Para cada una de las determinaciones realizadas y por cada rodaja de músculo cocido se extrajeron ocho 8 cilindros (1,27 cm de diámetro y 2 cm de alto) de una rodaja correspondiente a la posición central del músculo *Semitendinosus* bovino. Los cilindros se tomaron en dirección paralela a la orientación de las fibras musculares, utilizando para la extracción un sacabocados de 1,27 cm de diámetro interno. Antes de la medición, los cilindros se estabilizaron en cámara de refrigeración a 1 ± 1 °C durante 4 h.

En la **Figura ??** se presenta, a modo de ejemplo, el gráfico fuerza de corte (N) versus tiempo (min), obtenido para un cilindro cocido utilizando la Celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida. En dicha figura se indica la fuerza de corte máxima medida y el trabajo de corte (área rayada).



Figura 2.29: Extracción de muestras cilíndricas mediante sacabocado. (a) Extracción en toda la rodaja del músculo *Semitendinosus* bovino cocido-pasteurizado. (b) Extracción en la periferia de la rodaja del músculo *Semitendinosus* bovino cocido-pasteurizado.

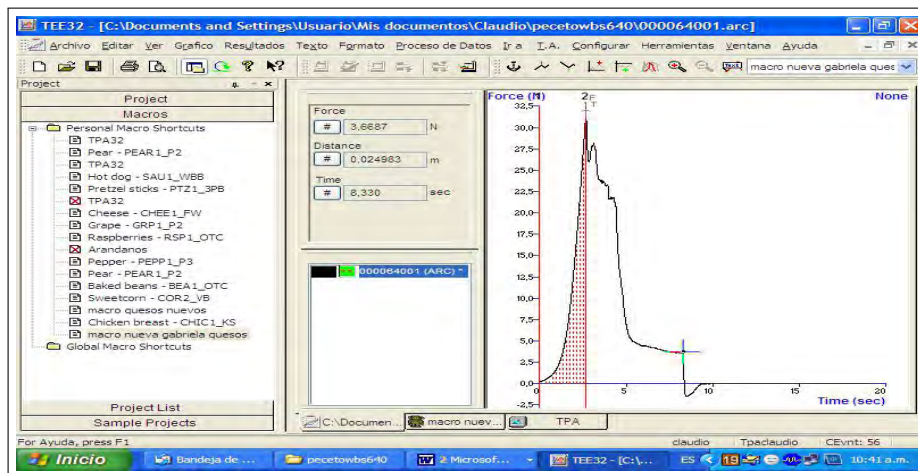


Figura 2.30: Gráfico de la Fuerza de corte (N) vs. tiempo (min) obtenida para un cilindro de carne cocido utilizando una celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida.

2.2.2.5.4 Análisis de Apreciación Visual.

El análisis de apariencia visual de los músculos cocidos lo realizó un panel integrado por 30 evaluadores entrenados, utilizando un gabinete Veri-Vide (Modelo CAC 120 con iluminante Veri-Vide Artificial Daylight F-40 T12/D65, Reino Unido). Las evaluaciones se realizaron sobre una porción de 5 cm de músculo cocido, colocadas sobre bandejas de poliestireno expandido (Telgopor[®]) de color gris, exhibiendo su superficie lateral. Se llevó a cabo una prueba pareada simple para dos atributos: “color

de carne cocida” y “uniformidad de color en superficie”. En este caso los evaluadores recibieron las dos muestras de músculo cocido codificadas de la misma forma que para la prueba triangular, la mitad en el orden A-B y la otra mitad en el orden B-A. Esta prueba se llevó a cabo en 2 sesiones independientes, una para cada atributo bajo estudio. Los datos de la prueba de comparación de a pares fueron comparados con valores tabulares correspondientes al tipo de prueba (??).

En la **Tabla ??** se presenta la planilla de evaluación de las pruebas pareadas donde se anotaron las respuestas que los evaluadores dieron en forma oral debido a que la disposición del gabinete para pruebas sensoriales visuales no permite la utilización directa de planillas por parte de los evaluadores.

Tabla 2.2: Ejemplo de planilla utilizada en la prueba pareada simple.

Evaluador	Combinación	Más Oscura	Más Homogénea
	146-381		
	603-089		
	381-146		
	089-603		
	146-381		
	089-603		
	381-146		
	603-089		
	146-381		
	603-089		
	381-146		
	089-603		
	146-381		
	089-603		
	381-146		
	603-089		
	146-381		
	603-089		

En la **Figura ??** a se presenta un evaluador realizando la prueba pareada simple en el gabinete Veri-Vide (Modelo CAC 120 con iluminante Veri-Vide Artificial Daylight F-40 T12/D65, Reino Unido). Las **Figuras ??** b y c corresponden a la presentación de las rodajas seleccionadas y codificadas para dicha prueba.

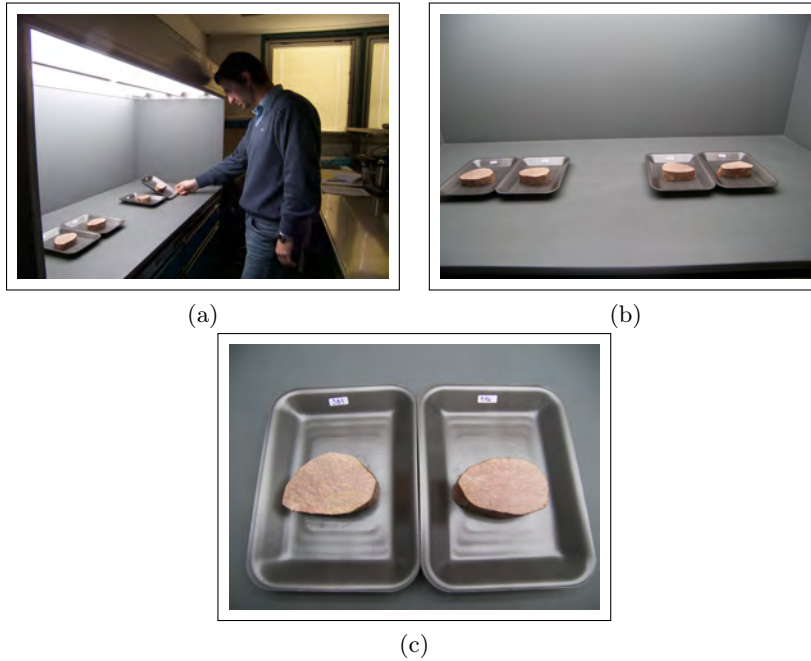


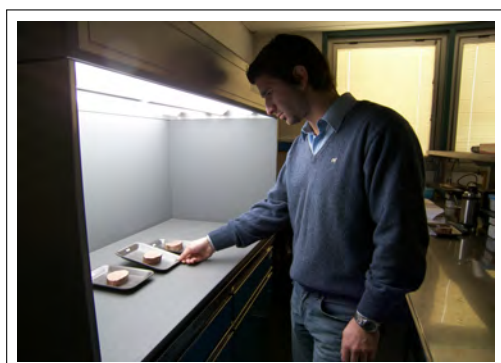
Figura 2.31: Realización de la prueba pareada simple. (a) Panelista realizando observación. (b) Presentación de la prueba dentro del gabinete Veri-Vide CAC 120. (c) Bandeja con muestras codificadas.

Además, se llevó a cabo un ensayo discriminativo (test triangular) de las muestras de músculos tratados mediante el ciclo CRT respecto a las muestras de los músculos cocidos pasteurizados del ciclo VRT. Los evaluadores recibieron por repetición 3 submuestras de músculos *Semitendinosus* bovinos cocidos, de las cuales 2 pertenecían a una muestra de un ciclo y la restante al ciclo diferente. Las mismas fueron identificadas con códigos de 3 dígitos al azar, balanceando el ensayo con las 6 combinaciones posibles de presentación. En este caso, se buscó la muestra diferente en base a la apariencia global. En la **Tabla ??** se presenta un ejemplo de la planilla utilizada en la prueba triangular. Los datos de la prueba del triángulo fueron comparados con valores tabulares correspondientes al tipo de prueba (??)

En la **Figura ??** a se presenta un evaluador realizando la prueba triangular en el gabinete Veri-Vide (Modelo CAC 120 con iluminante Veri-Vide Artificial Daylight F-40 T12/D65, Reino Unido). La **Figura ??** b corresponde a la presentación de las rodajas seleccionadas y codificadas para dicha prueba.

Tabla 2.3: Ejemplo de planilla utilizada en la prueba triangular.

Evaluador	Combinación	Respuesta	Fue correcta ?
	528-921-458		
	458-921-745		
	745-458-528		
	458-528-921		
	921-745-528		
	528-745-458		
	528-921-458		
	458-921-745		
	745-458-528		
	458-528-921		
	921-745-528		
	528-745-458		
	528-921-458		
	458-921-745		
	745-458-528		
	458-528-921		
	921-745-528		
	528-745-458		
	528-921-458		
	458-921-745		
	745-458-528		
	458-528-921		
	921-745-528		



(a)



(b)

Figura 2.32: Realización de la prueba triangular. (a) Panelista realizando observación. (b) Bandeja con muestras codificadas.

2.2.2.5.5 Parámetros Cromáticos.

El objetivo de este análisis fue evaluar el efecto de los dos tratamientos estudiados (CRT y VRT) sobre los parámetros cromáticos correspondientes al espacio X,Y,Z, (sistema en el que mide el colorímetro aplicado) y CIELAB (L^* , a^* , b^*) utilizando un colorímetro (marca Kónica Minolta Modelo Cr-400, Japón). Este equipo posee como ventaja principal su uso portable y se presenta en la **Figura ??** a. En las determinaciones se utilizó el iluminante D_{65} con un ángulo de observación de 2° . Según se observa en la **Figura ??** b, los parámetros cromáticos se evaluaron en la parte interna de una rodaja de músculo (cilindro de aproximadamente 10 cm de largo), separada de la parte central de cada músculo cocido. En la misma, los parámetros se midieron en 10 posiciones diferentes (numeradas en sentido horario), correspondientes a 3 zonas. Estas zonas se indican en la **Figura ??**. En las zonas 1 (superior) y 3 (inferior) se determinaron los promedios de 3 mediciones, y la zona 2 (centro) se calculó el promedio de 4 mediciones.

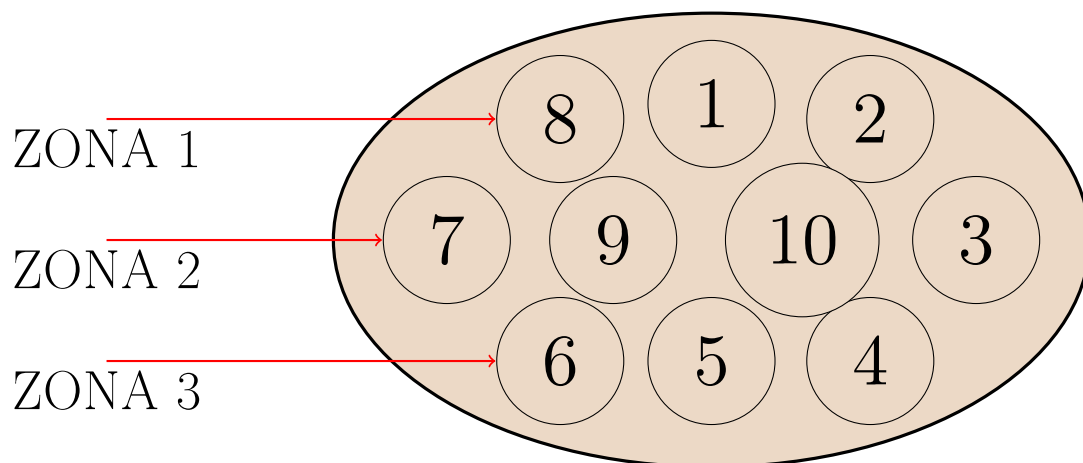


Figura 2.33: Ubicación de las posiciones dentro de la parte interna del músculo *Semitendinosus* bovino cocido para realizar la evaluación de color.

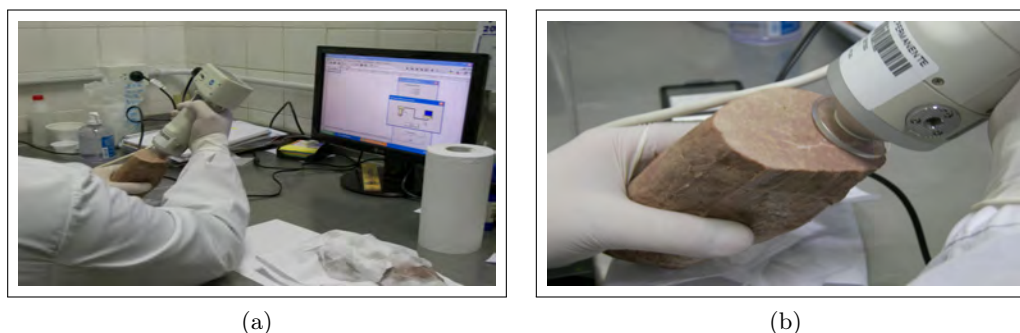


Figura 2.34: Medición de parámetros cromáticos mediante el colorímetro marca Kónica Minolta Modelo Cr-400. (a) Equipamiento y medición de parámetros cromáticos. (b) Medición de parámetros cromáticos en la parte interna del músculo cocido.

2.2.2.6. Análisis Estadístico.

2.2.2.6.1 pH del Músculo Cocido, Diferencia de pH, Peso del Músculo Cocido y Pérdida de Peso.

Los resultados correspondientes a los parámetros pH del músculo cocido, diferencia de pH (pH del músculo cocido - pH del mismo músculo crudo), peso del músculo cocido y pérdida de peso% fueron analizados considerando el diseño experimental en bloques, con 2 réplicas, que se aplicó en este estudio, (?). En cada bloque (semana) se analizaron 18 músculos; 9 correspondientes al ciclo CRT y 9 al ciclo VRT. Se aplicó la prueba T de Student para comparar el efecto de los dos tratamientos evaluados ($p < 0,05$).

A continuación se detalla el modelo estadístico aplicado mediante la (**Ecuación ??**):

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \epsilon_{ijk} \quad (2.2.20)$$

donde:

y_{ijk} = valor de cada parámetro en la k-ésima observación ($k=1 \dots 9$) del j-ésimo bloque ($j = 1, 2$) correspondiente al i-ésimo tratamiento ($i= 1, 2$).

μ = media general.

α_i = efecto del i-ésimo tratamiento ($i = 1, 2$).

β_j = efecto del j-ésimo bloque ($j = 1, 2$).

ϵ_{ijk} = error aleatorio asociado con el tratamiento i en el bloque j de la k -ésima observación ($k = 1, 2, \dots, 9$). Se asume con media igual a cero (0) con varianza $= \sigma_\epsilon^2$ y no correlacionados.

2.2.2.6.2 Resistencia al Corte Evaluada Mediante Cizalla de Warner-Bratzler (Cuchilla Triangular) y Celda de Warner-Bratzler (elemento de corte tipo “V” invertida).

A las 24 rodajas (6 x 2 ciclos x 2 bloques) de músculos *Semitendinosus* cocidos utilizadas para medir la relación entre las resistencias al corte medidas mediante 2 sistemas de corte diferentes, les fue aplicado un análisis de correlación de Pearson (coeficiente r). Además, se realizó un análisis de regresión lineal entre las resistencias al corte medidas por los 2 elementos de corte utilizados. Esto permitió evaluar la calidad del ajuste del modelo de regresión lineal (r^2) y obtener la expresión de la relación lineal.

El modelo de regresión lineal simple aplicado se representa mediante la **Ecuación ??**:

$$Y_i = \mu + \beta x + \epsilon_i \quad (2.2.21)$$

donde:

Y_i = resistencia al corte determinada mediante celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida, utilizando un analizador de textura Stable Micro Systems Modelo TA. XTplus, siendo “ i ” la i -ésima observación ($i = 1, \dots, 24$).

μ = ordenada al origen.

β = pendiente de la recta.

x = valor de resistencia al corte determinada mediante cizalla de Warner-Bratzler equipada con cuchilla triangular.

ϵ_i = error aleatorio asociado con la observación i , se asume con media igual a 0, con

varianza = σ_ϵ^2 y no correlacionados.

Las rodajas empleadas en el análisis de regresión previo corresponden a los 2 tratamientos evaluados, 12 rodajas correspondientes a CRT y 12 rodajas a VRT, es decir que en el análisis se tomó el conjunto de los datos. En consecuencia, fue necesario evaluar la bondad del ajuste del modelo de regresión, en relación a los tratamientos realizando un análisis de variancia de acuerdo al modelo representado por la **Ecuación ??**:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij} \quad (2.2.22)$$

donde:

y_{ij} = variable respuesta correspondiente al parámetro medido (resistencia al corte determinada con cada elemento de corte), en la j -ésima observación ($j=1, \dots, 12$) del i -ésimo tratamiento ($i=1, 2$).

μ = media general.

α_i = i -ésimo efecto de tratamiento ($i=1, 2$).

ϵ_{ij} = error experimental que se supone independiente e idénticamente distribuido $N(0, \sigma_\epsilon^2)$.

2.2.2.6.3 Resistencia al Corte Evaluada Mediante Celda de Warner-Bratzler (Elemento de Corte tipo “V” invertida). Estudio Comparativo de las Mediciones Realizadas en la Periferia de la Rodaja del Músculo *Semitendinosus* bovino Respecto de las Mediciones en Toda la Rodaja con Celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida.

Según se describe en el ítem ??, se realizó la medición del parámetro resistencia al corte (evaluado con celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida en la periferia de una rodaja y en el conjunto de otra rodaja de un mismo músculo *Semitendinosus* bovino. Para analizar la relación entre ambas mediciones (periferia vs rodaja completa) se realizó un análisis de correlación de Pearson, aplicando además

el modelo de regresión simple indicado en el ítem ??.

2.2.2.6.4 Parámetros Cromáticos.

Los resultados correspondientes a los parámetros cromáticos fueron analizados estadísticamente mediante un modelo mixto, considerando un experimento de parcelas divididas. Las diferencias entre los efectos se analizaron mediante las sentencias lsmeans y slice del software SAS (?). Además, se realizó de realizar la corrección de los grados de libertad Satterthwise correspondiente a la falta de independencia, por medir varias veces el mismo músculo bovino.

El modelo siguiente fue aplicado para analizar el efecto de los tratamientos (CRT y VRT) y de las zonas (1,2,3) de las rodajas sobre los parámetros cromáticos X, Y, Z así como también L^* , a^* y b^* .

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \delta_{ik} + \beta_k + (\alpha\beta)_{ik} + \epsilon_{ijk} \quad (2.2.23)$$

donde:

y_{ijk} = valor de cada parámetro (X, Y, Z) ó (L^* , a^* , b^*) en la k-ésima zona (k=1,2,3) de la j-ésima rodaja (j=1,2, ... 6) correspondiente al i-ésimo tratamiento (i=1,2).

$$\mu_{ik} = \mu + \alpha_i + \beta_k + (\alpha\beta)_{ik}.$$

μ_{ik} = media de la k-ésima combinación Tratamiento*Zona. α_i , β_k y $(\alpha\beta)_{ik}$ corresponden a los efectos del Tratamiento, Zona y Tratamiento*Zona, respectivamente.

δ_{ik} = error del efecto músculo principal, asumido iid (independiente e idénticamente distribuido) $N(0, s_\delta^2)$.

(ϵ_{ijk}) = error aleatorio que representa las diferencias entre los músculos en el mismo tratamiento (i= 1,2), en la zona interna (k=1, 2, 3) del músculo (j= 1, 2, 3, 4, 5 y 6) respectivamente, con varianza (σ_ϵ^2). Este error se supone independiente e idénticamente distribuido $N(0, \sigma_\epsilon)$.

Para el análisis estadístico de los resultados experimentales ítem ??, ??, ??, ?? se utilizaron los software SPSS V-12 (?) y SAS, (?).

Capítulo 3

Resultados y Discusión

3.1. Resultados de la Etapa de Modelado y Simulación.

3.1.1. Validación del Modelo Térmico Aplicado en la Esfera.

En el presente Trabajo de Tesis, se generaron modelos de músculos *Semitendinosus* bovino proponiendo una forma geométrica simple controlada por 6 parámetros (LX, LX, LZ, a, b, c.), de los cuáles los 3 primeros representaron las dimensiones de la pieza mientras que los 3 restantes caracterizaron a la asimetría del músculo. Estos modelos se construyeron a partir de la deformación de una esfera generada mediante la utilización del software comercial de Elementos Finitos Abaqus CAE v.6.7-1., con posterior edición en ambiente de trabajo de MATLAB.v.7.

Antes de llevar a cabo la transformación de la esfera obtenida en la geometría correspondiente al músculo *Semitendinosus* bovino, se comparó el campo de temperatura adimensional obtenido por simulación con la solución aproximada correspondiente a la transferencia de calor por conducción en estado transiente para una esfera con condiciones convectivas en su exterior (?). Para ello, se extrajo la historia térmica correspondiente al nodo central de la esfera (nodo 2825). En la **Figura ??** a, se presenta la vista interna de la esfera con su mallado, verificando

de este modo la conducción radial de calor con condiciones convectivas. Al mismo tiempo en la **Figura ?? b** se presentan las curvas de evolución de temperatura interna de la esfera (centro térmico) obtenidas a través de la simulación y la solución aproximada para la esfera. Es posible observar una mínima discrepancia al inicio de las 2 curvas como resultado de haber utilizado solo el primer término de la ecuación trascendental (para $F_o > 0,2$) a fin de validar el modelo. No obstante, a partir del valor 0,2 del tiempo simulado, se comprobó que el modelo de transferencia de calor aplicado fue el correcto.

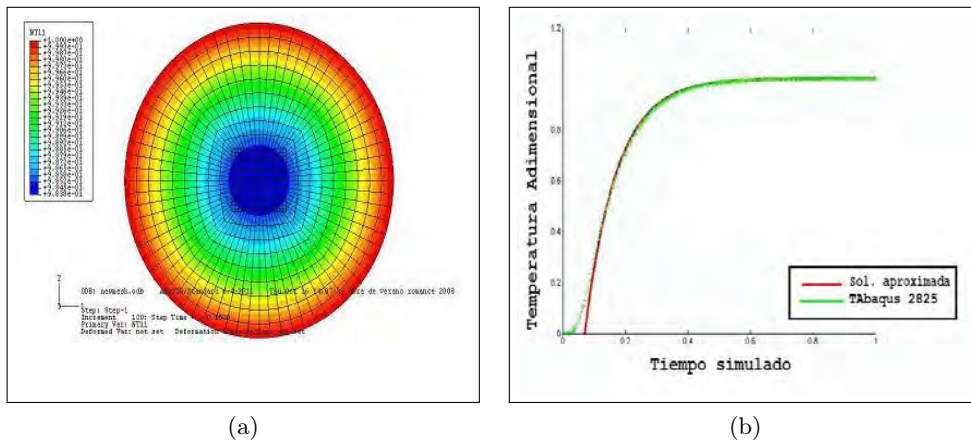


Figura 3.1: Validación de la conducción de calor en estado transiente en el modelo esférico. (a) Vista interna de la esfera con mallado. (b) Solución aproximada y curva simulada correspondiente al nodo central de la esfera.

3.1.2. Obtención de Geometrías de Músculos *Semitendinosus* bovino a partir de la Deformación de la Esfera.

El músculo *Semitendinosus* bovino, se caracteriza por su forma fusiforme con un extremo denominado porción proximal y el posterior, de menor tamaño, llamado distal. A su vez, cada una de sus extremidades presenta asimetrías pronunciadas. La forma del músculo fue diseñada en el presente Trabajo de Tesis aplicando el Método de Elementos Finitos, apto para el modelado geometrías irregulares.

Una vez validada la conducción de calor en forma radial en la esfera, se procedió a obtener la geometría del músculo bovino implementando 5 rutinas programadas en lenguaje MATLAB las cuales se detallan a continuación : $P0$, $transform$, $P1$, rlx y

P2, veáse **Apéndice**. Para llevar a cabo la transformación de la esfera (compuesta por un total de 131.671 nodos y 32.000 elementos cuadráticos hexaédricos) a la forma del músculo *Semitendinosus* bovino fueron utilizados sólo 6 parámetros (LX, LY, LZ, a, b, c). La generación de una forma simple del músculo bovino fue obtenida en 2 etapas. En la primera de ellas se obtuvo la forma propiamente dicha del músculo, mientras que en la segunda etapa se logró el efecto de relajación en la zona central de la malla de elementos finitos, veáse, **Ecuaciones ??, ?? y ??** y **Figura ??**.

A su vez, se realizó un análisis de sensibilidad a los cambios en las dimensiones del músculo *Semitendinosus* bovino. Para ello, se obtuvo un primer modelo patrón del músculo bovino considerando que el mismo pesaba en promedio 1.800 g, con dimensiones LX, LY y LZ de 10 cm, 7 cm y 30 cm respectivamente. Estas dimensiones fueron afectadas por 3 coeficientes de asimetría (a, b, c) cuyos valores permanecieron constantes e iguales a 1, 2,5 y 1,5 respectivamente. En el estudio de sensibilidad solo las dimensiones LX, LY, LZ fueron modificadas en $\pm 20\%$ en relación a las dimensiones del músculo patrón. La modificación en las dimensiones combinado con el efecto de los coeficientes a, b, c permitieron capturar de forma sencilla las asimetrías del músculo *Semitendinosus* bovino en sus 3 dimensiones. En la **Tabla ??** se presentan los valores LX, LY, LZ de cada una de las geometrías generadas (caso patrón y casos del 1 al 6) considerando la modificación del $\pm 20\%$ de cada una de ellas respecto al caso patrón.

Tabla 3.1: Dimensiones de geometrías de los músculos *Semitendinosus* bovino generadas considerando la modificación del $\pm 20\%$ de cada una de las dimensiones del músculo patrón.

Casos Simulados	Dimensiones en cm (LX, LY, LZ)
Caso Patrón	10; 7 ;30
Caso 1	12; 7 ;30
Caso 2	10;8,4;30
Caso 3	10; 7 ;36
Caso 4	8; 7 ;30
Caso 5	10;5,6;30
Caso 6	10; 7 ;24

Las vistas correspondientes a las 3 dimensiones (LX, LY, LZ) del músculo *Semitendinosus* bovino patrón modelado pueden ser observadas en la **Figura ??**. En las **Figuras ??**, **??** y **??** se presentan las geometrías correspondientes a las dimensiones LX, LY, LZ aumentadas y disminuidas en un 20 %. En las mismas se pueden diferenciar las relaciones de forma en comparación con al músculo *Semitendinosus* bovino patrón. Esas diferencias serán relevantes al analizar el efecto de los cambios en las dimensiones respecto a la posición del PMT, el tiempo de procesamiento y el Valor de Cocción (CV) en superficie.

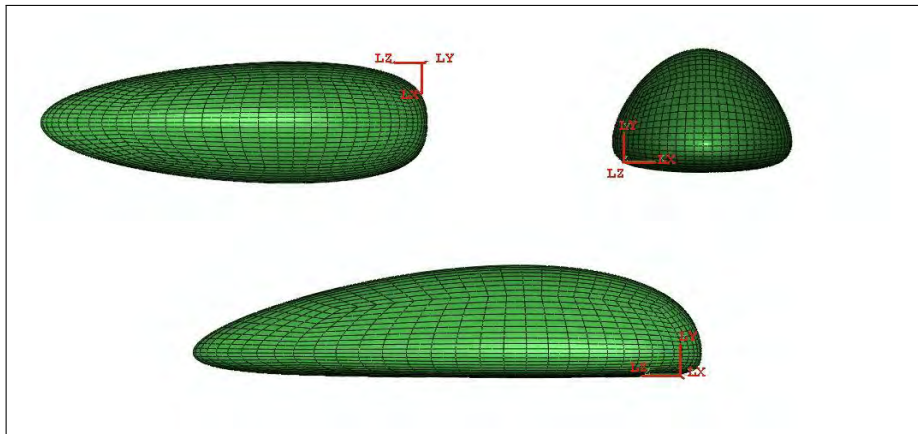


Figura 3.2: Vistas LX, LY, LZ del músculo *Semitendinosus* bovino patrón modelado.

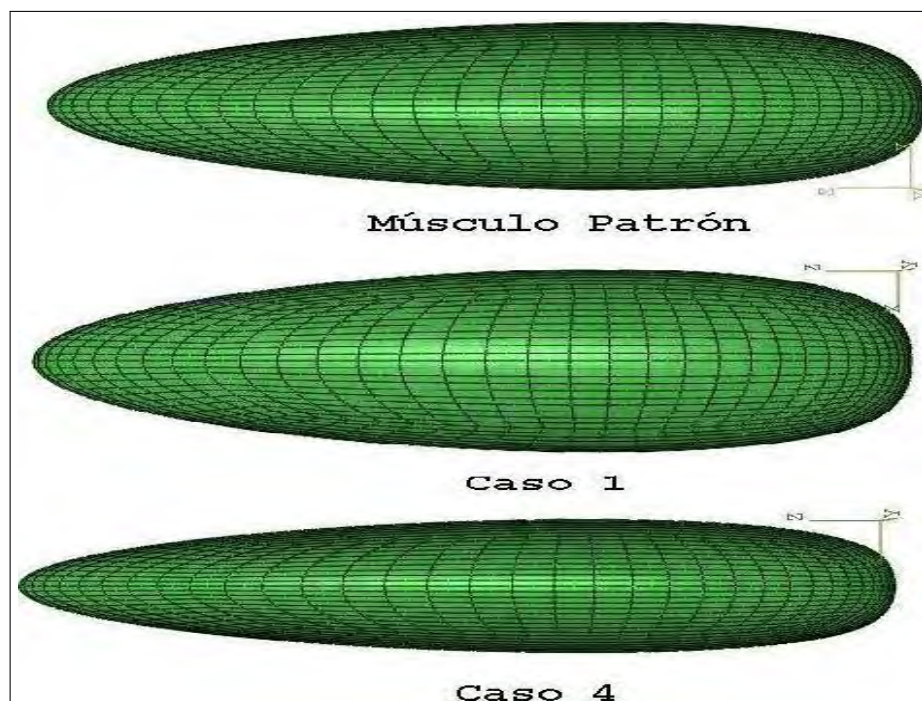


Figura 3.3: Vista LX de 3 geometrías del músculo *Semitendinosus* bovino correspondientes a Caso patrón, Caso 1 y Caso 4 (Tabla ??).

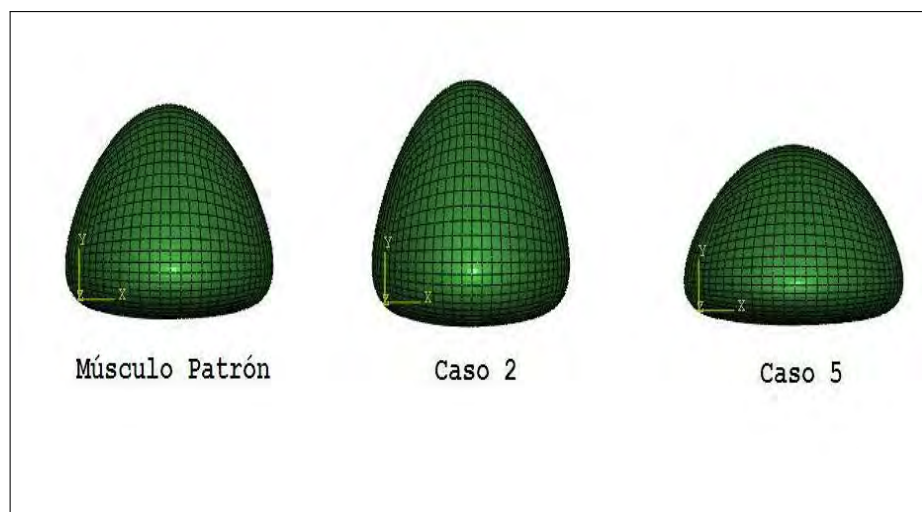


Figura 3.4: Vista LY de 3 geometrías del músculo *Semitendinosus* bovino caso patrón, Caso 2 y Caso 5 (Tabla ??).

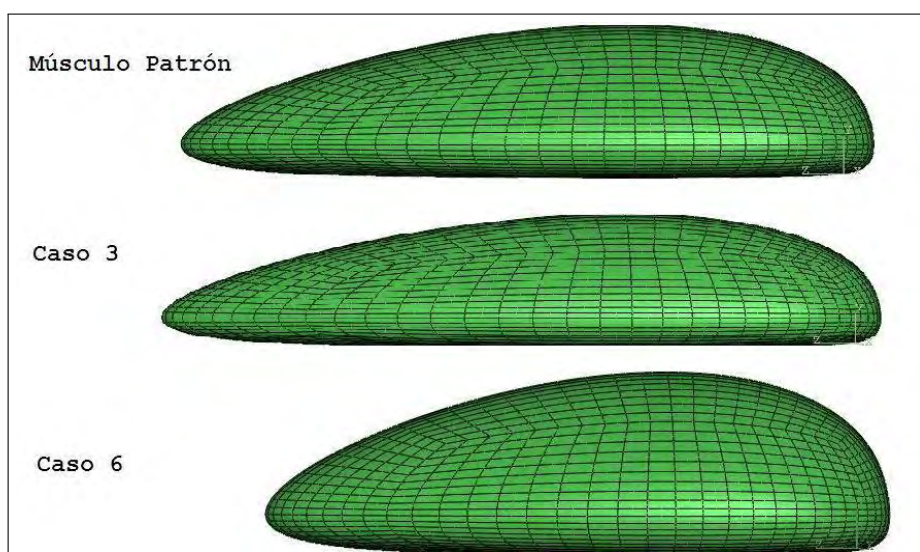


Figura 3.5: Vista LZ de 3 geometrías del músculo *Semitendinosus* bovino Caso patrón, Caso 3 y Caso 6 (Tabla ??).

3.1.3. Modelado y Simulación de Ciclos de Cocción-Pasteurización a Temperatura Constante de Autoclave (CRT) y Temperatura Variable de Autoclave (VRT).

En esta primera etapa del trabajo se generaron modelos geométricos de músculos *Semitendinosus* bovino cubriendo un amplio espectro de formas posibles. Estos modelos fueron sometidos a simulaciones de procesos de cocción-pasteurización CRT y VRT. La ejecución de la simulación del tratamiento CRT (dentro del entorno de Abaqus CAE v.6.7-1.) se realizó en 2 etapas, para cada una de las geometrías estudiadas (caso patrón y geometrías de los casos del 1 al 6, **Tabla ??**). Por un lado se diseñó el caso b, éste incluyó las etapas de *coming up time* (*CUT*) y mantenimiento de la temperatura hasta el valor adimensional de 1. Por otro lado, se diseñó el caso c, en el cual solamente se simuló la etapa de enfriamiento para cada una de las geometrías estudiadas (caso patrón y geometrías de los casos del 1 al 6 **Tabla ??**). Las **Figuras ??, ?? y ??**, presentan a modo de ejemplo la progresión en el músculo patrón del frente térmico en el tratamiento CRT, para cada paso de tiempo adimensional evaluado. Estos casos corresponden a las etapas del *CUT* (**Figura ??**), mantenimiento de la temperatura adimensional (**Figura ??**) y a la etapa de enfriamiento (**Figura ??**).

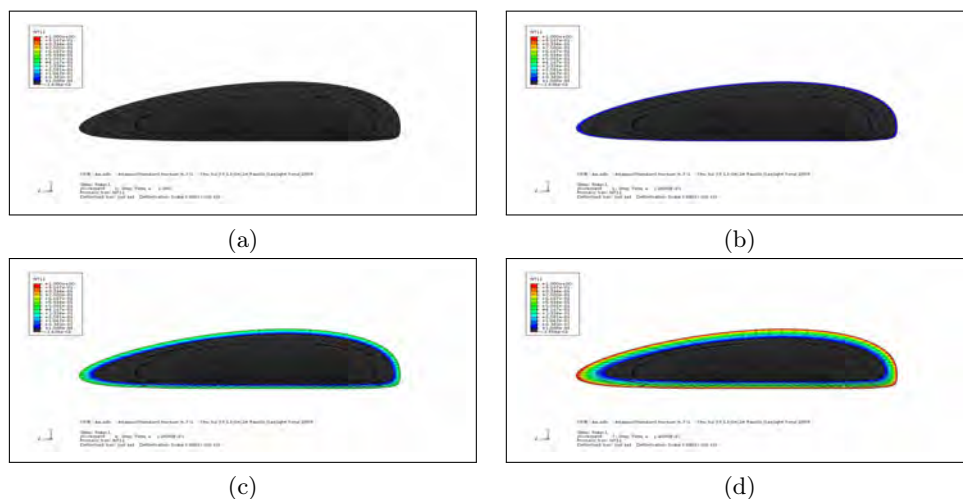


Figura 3.6: Evolución de la temperatura interna del músculo *Semitendinosus* bovino patrón durante la fase del *CUT* (tratamiento de cocción-pasteurización tipo CRT.) a tiempo adimensional de 0 (a); 0,002 (b); 0,008 (c); 0,014 (d).

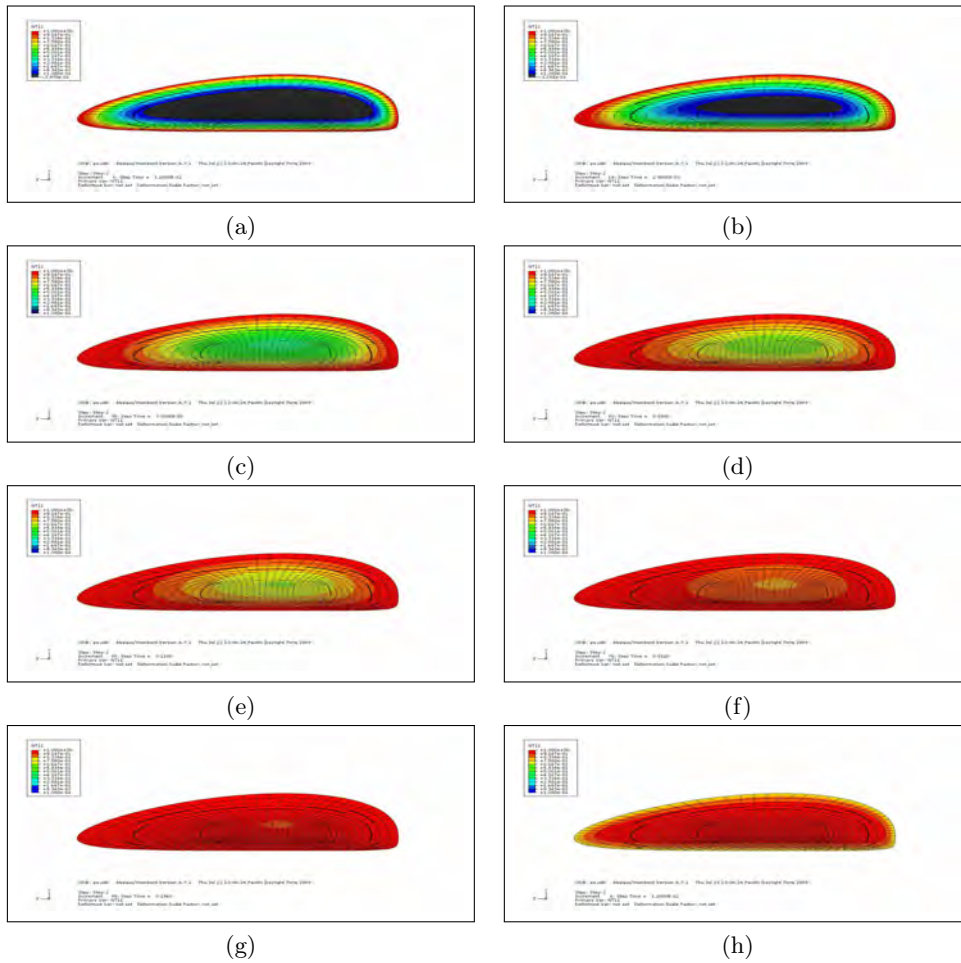


Figura 3.7: Evolución de la temperatura interna del músculo *Semitendinosus* bovino patrón durante la etapa de mantenimiento (tratamiento de cocción-pasteurización tipo CRT) a tiempo adimensional 0,012 (a); 0,028 (b); 0,072 (c); 0,1 (d); 0,11 (e); 0,152 (f); 0,196 (g); 0,2 (h).

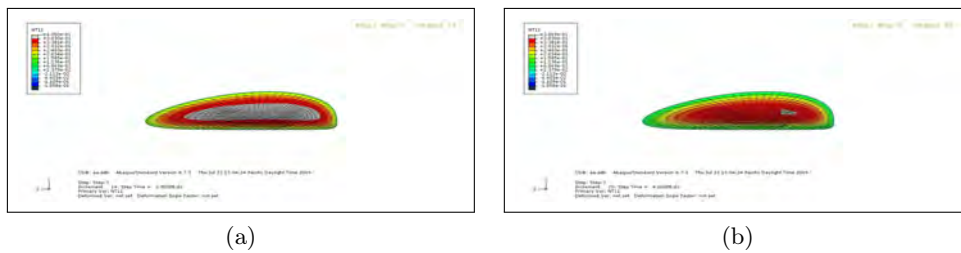


Figura 3.8: Evolución de la temperatura interna del músculo *Semitendinosus* bovino patrón durante la etapa de enfriamiento (tratamiento de cocción-pasteurización tipo CRT) a tiempo adimensional 0,12 y 0,28.

En la **Figura ??** se presentan, a modo de ejemplo, las evoluciones térmicas adimensionales correspondientes al medio de intercambio de calor (agua) y al nodo interno (nodo 81303) del músculo *Semitendinosus* bovino patrón en los tratamientos CRT y VRT simulados. Se observó un mayor retraso en el nodo interno 81303 durante el calentamiento del músculo patrón en la simulación del tratamiento VRT con respecto al mismo músculo sometido al tratamiento CRT. Este retraso observado en el tratamiento VRT determinó un mayor tiempo de procesamiento. Ello se debió al menor gradiente de temperatura logrado en el tratamiento VRT como consecuencia del escalonamiento de temperatura (Delta T). Luego de lo observado, se esperaría entonces que la aplicación de un tratamiento térmico escalonado (tipo Delta T) por ejemplo a 60 y 75 °C, permitiría disminuir el efecto del tratamiento sobre la pérdida de peso, el color, la textura, los atributos sensoriales y las propiedades nutricionales, debido a que la aplicación de un tratamiento tipo VRT determinaría una menor pérdida de jugos de la carne durante el tratamiento de cocción-pasteurización.

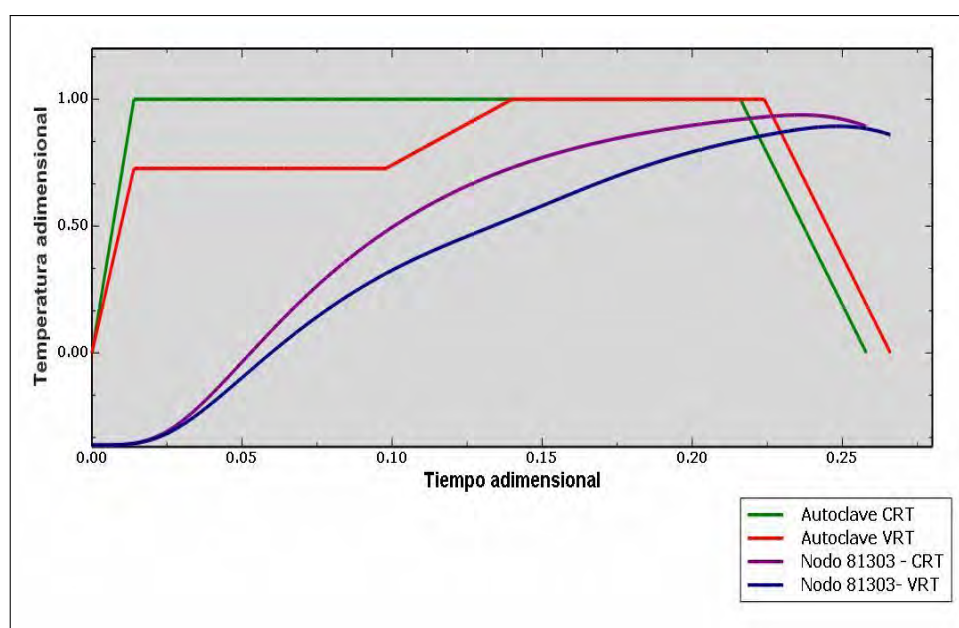


Figura 3.9: Evoluciones térmicas adimensionales correspondientes al medio de intercambio de calor (agua, Autoclave CRT y VRT) y al nodo interno (nodo 81303) del músculo *Semitendinosus* bovino patrón.

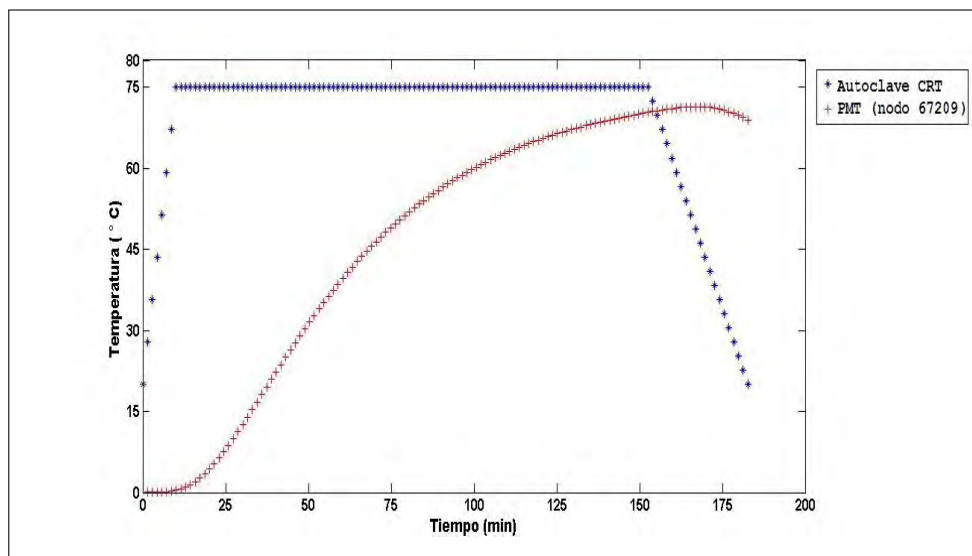
3.1.4. Análisis de la Evolución Térmica, Obtención del Punto de Mínimo Tratamiento (PMT), Tiempo de Procesamiento y Valor de Cocción (CV) para Alcanzar el Valor de Pasteurización (VP) .

Utilizando las geometrías generadas según se describe en los ítems anteriores, se simularon tratamientos de cocción-pasteurización tipo CRT y VRT. Para cada una de las geometrías, los tratamientos térmicos fueron simulados en 2 etapas (casos *b* y *c*) y luego fueron ensamblados, aprovechando la linealidad del problema térmico. Este ensamble se realizó considerando el aporte de letalidad de la fase de enfriamiento, hasta alcanzar el VP_{70}^{10} de 40 min en el PMT de cada geometría. Para ello, se implementaron las rutinas *readbc*, *readtemp*, *readdat*, *bc* y *do it* programadas en lenguaje MATLAB, véase **Apéndice**. El ensamble se realizó de forma eficiente al unir las soluciones de los casos *b* y *c*. Además, las rutinas utilizadas, permitieron realizar a cabo la transformación de los valores adimensionales a escala real de tiempo (min) y temperatura (°C).

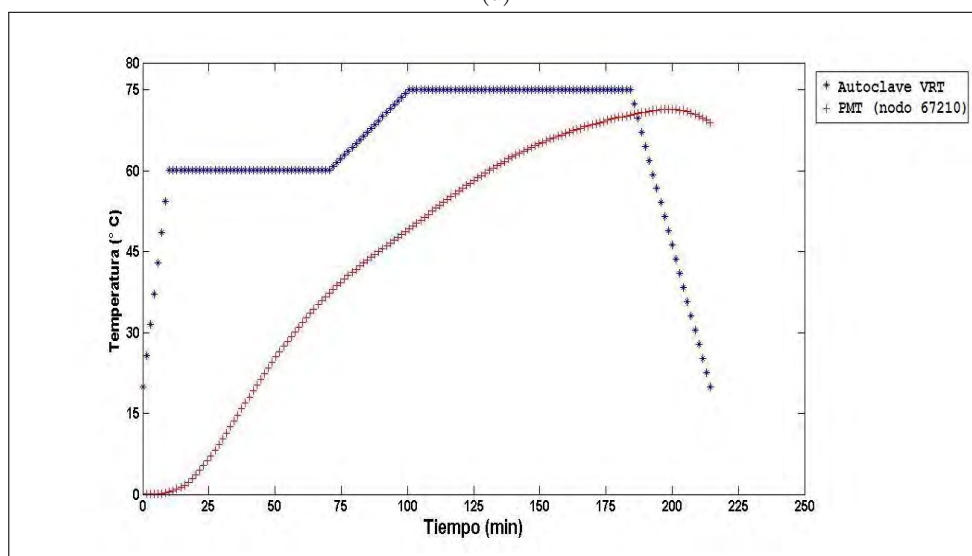
El cálculo del parámetro VP_{70}^{10} se realizó a partir de la curva de penetración de calor en el PMT, tomando una temperatura superior a 65 °C en la fase de calentamiento y hasta 65 °C en la fase de enfriamiento. A su vez, fue posible determinar la ubicación del PMT a través de las coordenadas nodales utilizando las rutinas antes mencionadas. Por otra parte, el cálculo de CV_{100}^{33} se realizó considerando la curva de penetración de calor correspondiente a un nodo superficial.

En las **Figuras ??** a y b, se presentan las evoluciones térmicas en tiempo real correspondientes al medio de intercambio de calor (agua) y al PMT del músculo *Semitendinosus* patrón en los tratamientos CRT y VRT simulados.

Otro de los objetivos propuestos en el presente Trabajo de Tesis fue determinar la ubicación del PMT en la geometría del músculo *Semitendinosus* bovino, luego de haber finalizado la simulación de los tratamientos térmicos CRT y VRT. En las **Figuras ??** a y b se presenta la ubicación del PMT correspondiente a todos los casos estudiados de músculo *Semitendinosus* bovino (**Tabla ??**). El PMT fue representado por un número de nodo con 3 coordenadas en el sistema LX, LY, LZ, las cuales fueron transformadas y relacionadas con las coordenadas iniciales en el



(a)



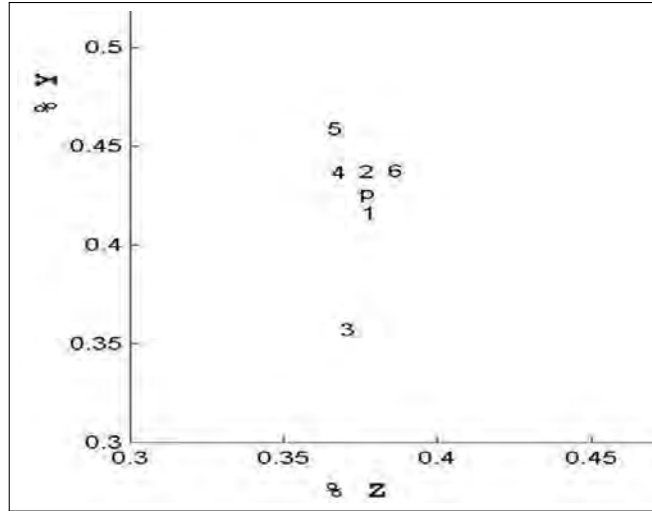
(b)

Figura 3.10: Evoluciones térmicas en tiempo correspondientes al medio de intercambio de calor y al nodo (PMT) del músculo *Semitendinosus* bovino patrón. (a) Tratamiento CRT simulado. (b) Tratamiento VRT simulado.

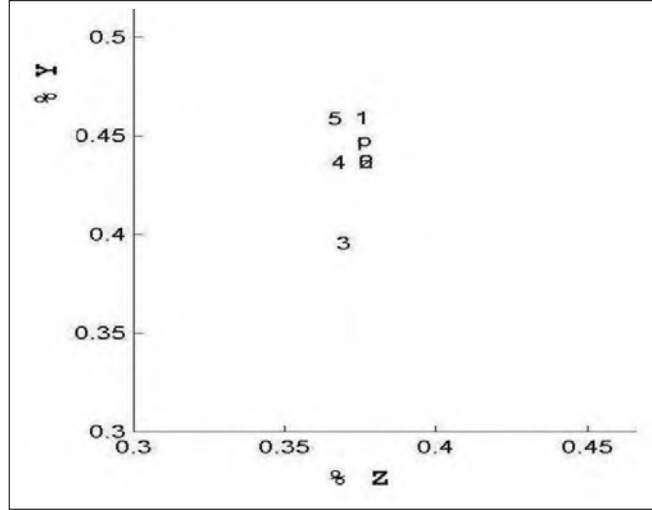
músculo bovino fresco. En los eje de abcisa y ordenada de las **Figuras ??** a y b se representan los parámetros %Z y %Y, respectivamente. Estos representan la relación de las coordenadas del PMT en relación a las dimensiones LY y LZ, respectivamente.

Para la mayoría de los casos el PMT se encontró más desplazado hacia la porción

proximal del músculo bovino simulado. Al variar las dimensiones del músculo patrón en un 20 %, la posición del PMT no se ha visto afectada de manera marcada, excepto en el Caso 3, particularmente para CRT. En consecuencia, la modificación que más influyó en la modificación del PMT fue el aumento en la longitud de la pieza (LZ), lo que afectó a su vez a la altura del músculo (LY).



(a)



(b)

Figura 3.11: Ubicación del punto de mínimo tratamiento (PMT) de todos los Casos de geometrías de músculos *Semitendinosus* bovinos simulados (**Tabla ??**). (a) PMT obtenidos en la simulación de procesos CRT a 75 °C. (b) PMT obtenidos durante la simulación de procesos VRT a 75 °C. Los números representan los Casos estudiados (**Tabla ??**).

Trabajos previos han informado el desarrollo de modelos térmicos para la búsqueda del PMT, como punto inicial del cálculo de letalidad de los procesos aplicados. Así ? y ? aplicaron modelos de transferencia de calor en 2D y validaron sus modelos a través de la inserción de termocuplas en carcadas de aves (pollo y pavo), observando que el PMT se encontraba en la zona anterior del cuerpo de las aves, la cual posee mayor relación volumen/cantidad de tejido. A su vez, ? desarrollaron un modelo de transferencia de calor por conducción, aplicado a cuerpos de forma cónica. Ese modelo fue capaz de predecir las temperaturas internas y localización del PMT con muy buena aproximación en cada caso planteado.

A su vez, en el presente Trabajo de Tesis, se evaluó, para cada geometría del músculo *Semitendinosus* bovino el CV_{100}^{33} superficial (min) correspondiente al tiempo de procesamiento necesario para alcanzar el VP_{70}^{10} de 40 min en el PMT (**Figuras ??**). En todos los casos simulados, se obtuvieron mayores valores de CV_{100}^{33} superficial para el tratamiento CRT que para el tratamiento VRT. Los casos que más difirieron del músculo patrón fueron el Caso 2 (aumento de LY) y el Caso 6 (disminución de LZ que determinó el aumento de LY).

Además, se obtuvo el tiempo de procesamiento (min) necesario para alcanzar en el PMT el VP_{70}^{10} de 40 min. En la **Figura ??**, se observa que todos los casos CRT simulados presentaron menor tiempo de procesamiento para alcanzar dicho valor. Esto se debería al mayor gradiente térmico observado en este tratamiento. A su vez, los casos más desfavorables (mayor tiempo de procesamiento) respecto al músculo patrón fueron los Casos 2 y 6, estos correspondieron a un aumento de LY directo (Caso 2) o indirecto, a través de la dimensión de LZ (Caso 6). El aumento observado en los tiempos de procesamiento para los Casos 2 y 6 explicarían los mayores CV_{100}^{33} observados para estos casos. Cabe destacar, que la mayoría de los estudios realizados en sistemas VRT, corresponden al campo de esterilización de alimentos. ?, estudiaron la optimización de procesos VRT con el objetivo de preservar la calidad superficial en productos enlatados. A través de sus estudios lograron incrementar un 20 % la retención de tiamina (indicador de calidad para evaluar la performance de sistemas VRT), y disminuir el tiempo de procesamiento en un 16,5 %. En el presente Trabajo de Tesis se incrementaría la calidad superficial en virtud de los menores valores de CV_{100}^{33} obtenidos en el caso del del tratamiento VRT simulado. No obstante y en contraposición con ?, no se observó la disminución del tiempo de procesamiento

necesario para alcanzar VP_{70}^{10} , para las distintas geometrías estudiadas del músculo *Semitendinosus* bovino.

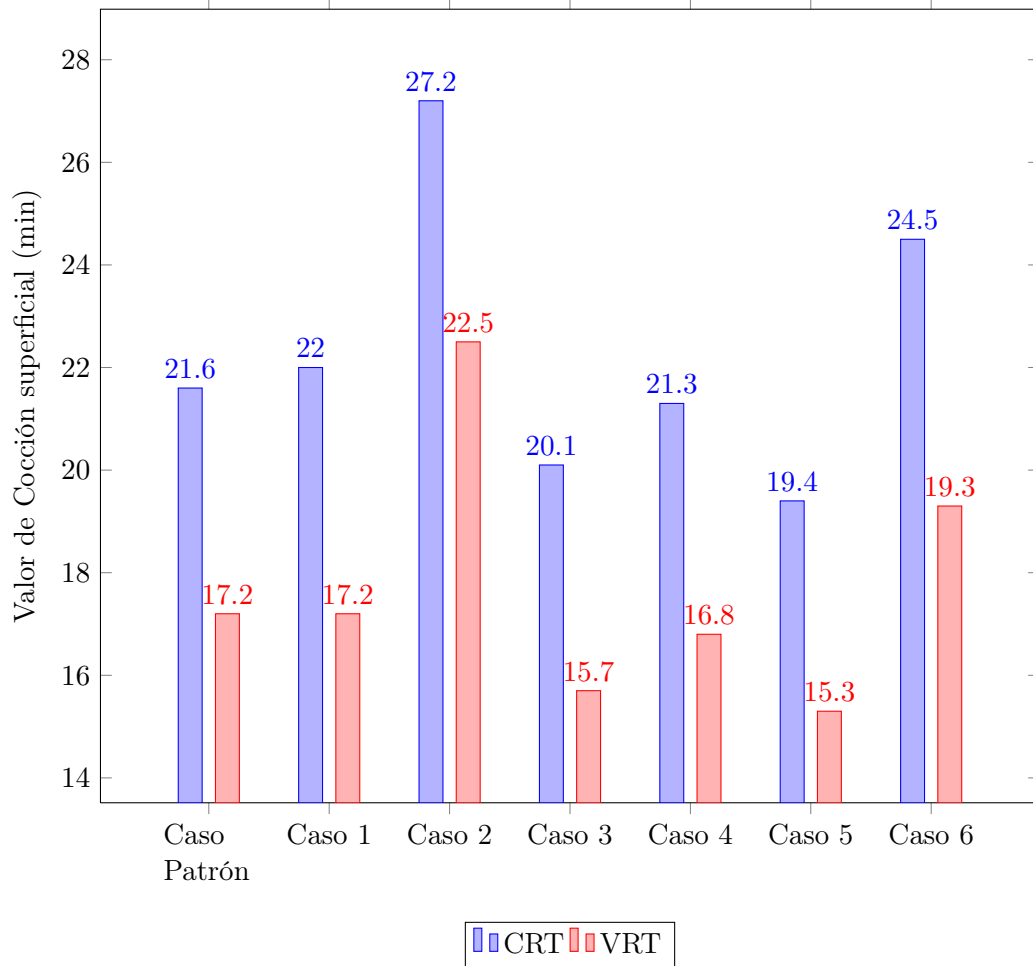


Figura 3.12: Valor de Cocción superficial (CV_{100}^{33} , min) obtenidos para cada una de las geometrías del músculo *Semitendinosus* bovino en la simulación de los tratamientos de cocción-pasteurización CRT y VRT.

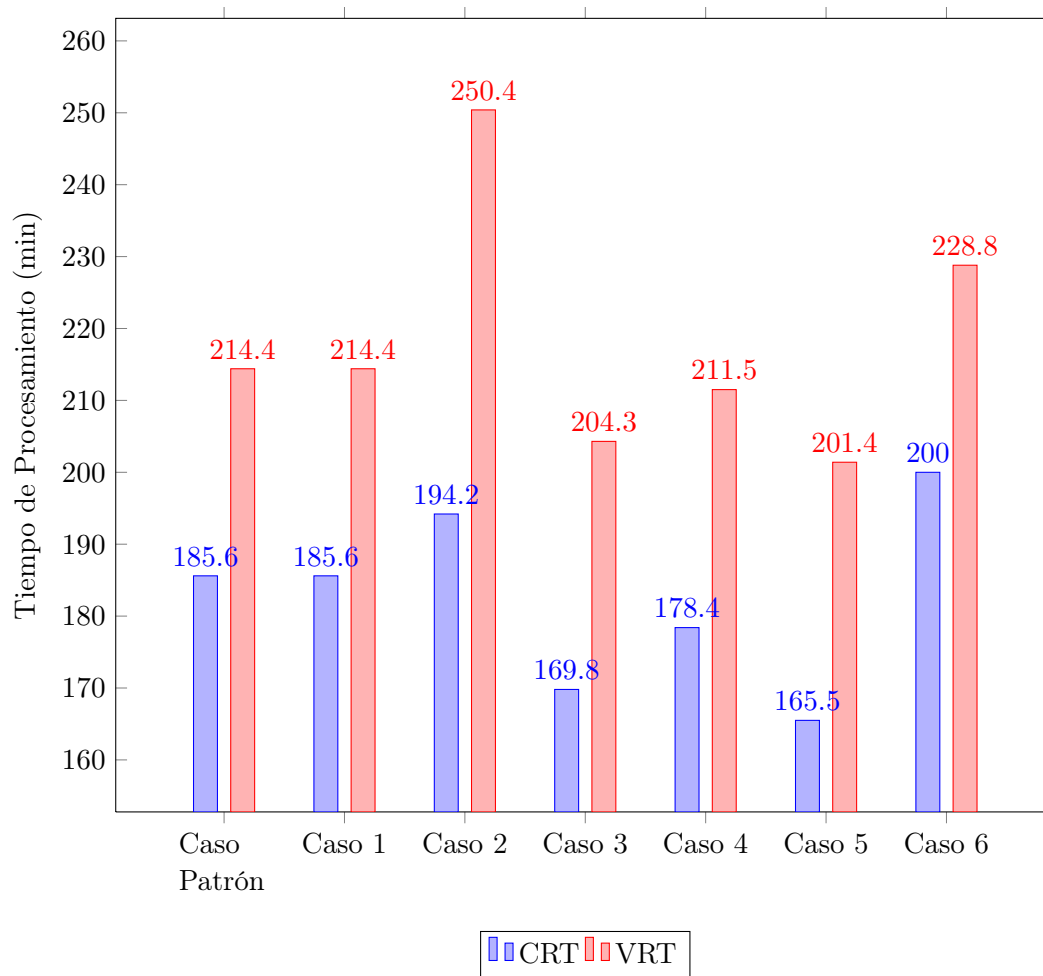


Figura 3.13: Tiempo de procesamiento (min) necesario para alcanzar el Valor de Pasteurización (VP_{70}^{10}) para las geometrías del músculo *Semitendinosus* bovino en en la simulación de los tratamientos de cocción-pasteurización CRT y VRT.

3.2. Resultados de la Etapa Experimental.

3.2.1. Estudio de la Distribución de Parámetros Característicos de la Penetración de Calor en Músculos *Semitendinosus* bovino Cocidos-Pasteurizados al Vacío en un Autoclave con Ducha de Agua de Escala Piloto.

3.2.1.1. Obtención de los Parámetros de Penetración de Calor.

Uno de los objetivos específicos del presente trabajo de Tesis de Maestría consistió en el estudio de la distribución de parámetros característicos de la penetración de calor en cilindros de músculos *Semitendinosus* bovino cocidos-pasteurizados mediante el sistema *Sous vide* en un autoclave con ducha de agua de escala piloto. Este estudio permitió identificar la zona del canasto del autoclave más retrasada en relación al calentamiento y enfriamiento de los músculos. A modo de ejemplo, en la **Figura ??** se presentan las curvas de penetración de calor correspondientes al centro de cilindros de músculos *Semitendinosus* bovinos ubicados en diferentes posiciones del estante medio del canasto, para la primera de las 3 repeticiones del estudio.

En la **Figura ??** se incluyó además la evolución de la temperatura del agua (medio de intercambio de calor) dentro la cámara del autoclave (marca Steriflow Barriquand Modelo Microflow, Roanne, Francia) operado en forma estática. A su vez en la **Figura ??** se indican las diferentes etapas correspondientes al proceso térmico: *come-up-time* (*CUT*), fase de mantenimiento y finalmente fase de enfriamiento. En la **Figura ??**, se observa también la diferencia en la temperatura inicial de los cilindros evaluados (rango 2-4 °C). En virtud de ello, la temperatura inicial fue corregida según el procedimiento propuesto por Schultz y Olson (?).

A partir de las curvas de penetración de calor corregidas por diferencias en la temperatura inicial de los músculos y en la temperatura de la cámara del autoclave, se calculó el parámetro denominado tiempo de calentamiento, (Δt_{10}^{70}). A su vez, el parámetro f_h fue calculado a partir de las curvas semilogarítmicas de calentamiento, como se ilustra en la **Figura ??**, correspondientes al centro térmico de los cilindros del músculo *Semitendinosus* bovino ubicados en el estante medio del canasto del

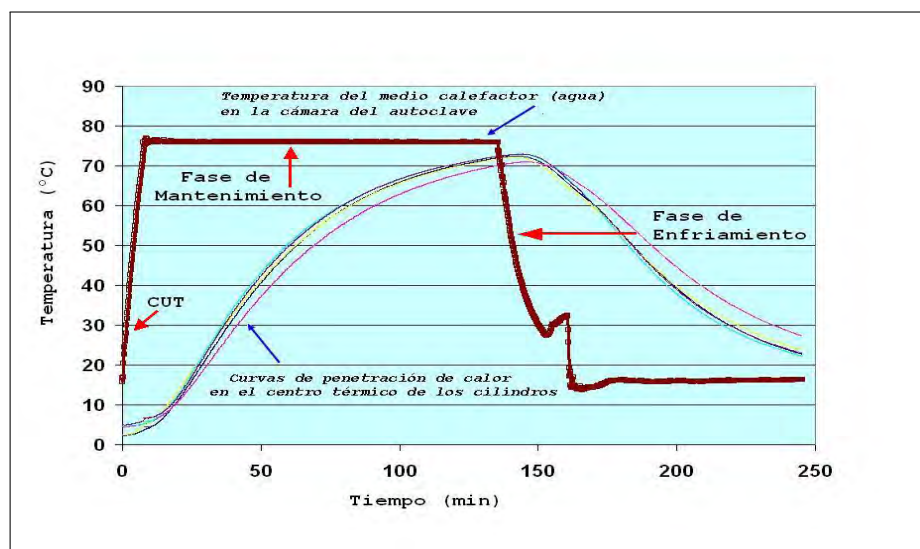


Figura 3.14: Curvas de penetración de calor correspondientes al centro térmico de cilindros de músculos *Semitendinosus* bovino ubicados en el estante medio del canasto del autoclave y evolución de la temperatura del agua en la cámara del autoclave Steriflow Barriquand Modelo Microflow.

autoclave. Estas curvas semilogarítmicas fueron obtenidas a partir de las curvas de penetración de calor corregidas. Además de las correcciones mencionadas, también fue corregido el tiempo inicial del proceso, lo cual se realizó despreciando el *CUT*. En la **Figura ??** b se presentan a modo de ejemplo, curvas semilogarítmicas con el tiempo inicial del proceso corregido.

A partir de las curvas semilogarítmicas corregidas, se calculó el parámetro f_h , obtenido como el valor negativo de la inversa de la pendiente de la parte lineal de la curva semilogarítmica de calentamiento. Para el cálculo de la pendiente, se utilizó la herramienta de regresión lineal disponible en el software de Microsoft Office Excel (**Figura ??**).

Una vez calculados los parámetros Δt_{10}^{70} y f_h se realizó un análisis preliminar a fin de definir si en el análisis estadístico de los datos se evaluaría el efecto de la posición de los cilindros dentro de cada estante o se analizaría el efecto del estante. Se realizó el análisis preliminar utilizando gráficos radiales para los 2 parámetros estudiados, Δt_{10}^{70} y f_h en función de la posición de los cilindros en cada uno de los 3 estantes analizados y para las 3 repeticiones realizadas - **Figuras ??** y **Figuras ??**.

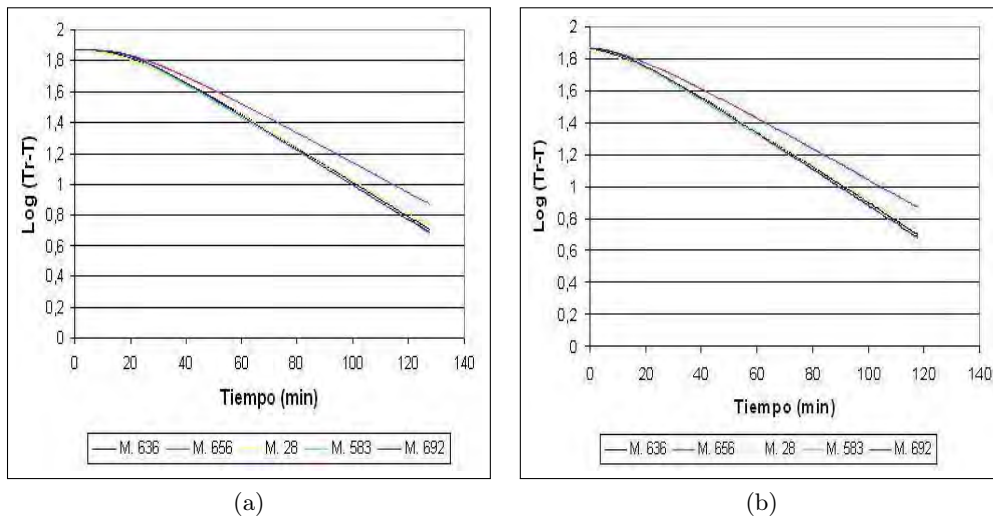


Figura 3.15: Curvas semilogarítmicas de calentamiento en el centro térmico de cilindros de músculos *Semitendinosus* bovino ubicados en el estante del medio del canasto del autoclave. (a) Curvas semilogarítmicas calculadas a partir de las curvas de penetración de calor corregidas. (b) Curva semilogarítmica con corrección del tiempo inicial del proceso, habiendo despreciado el *come-up-time* (*CUT*).

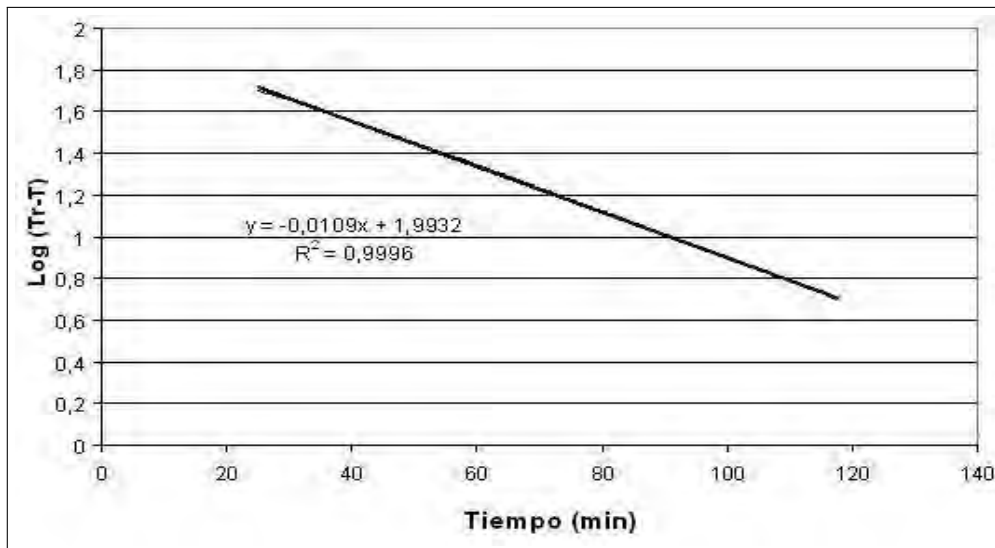


Figura 3.16: Regresión de la parte lineal de una curva semilogarítmica de calentamiento utilizada para el cálculo del parámetro f_h .

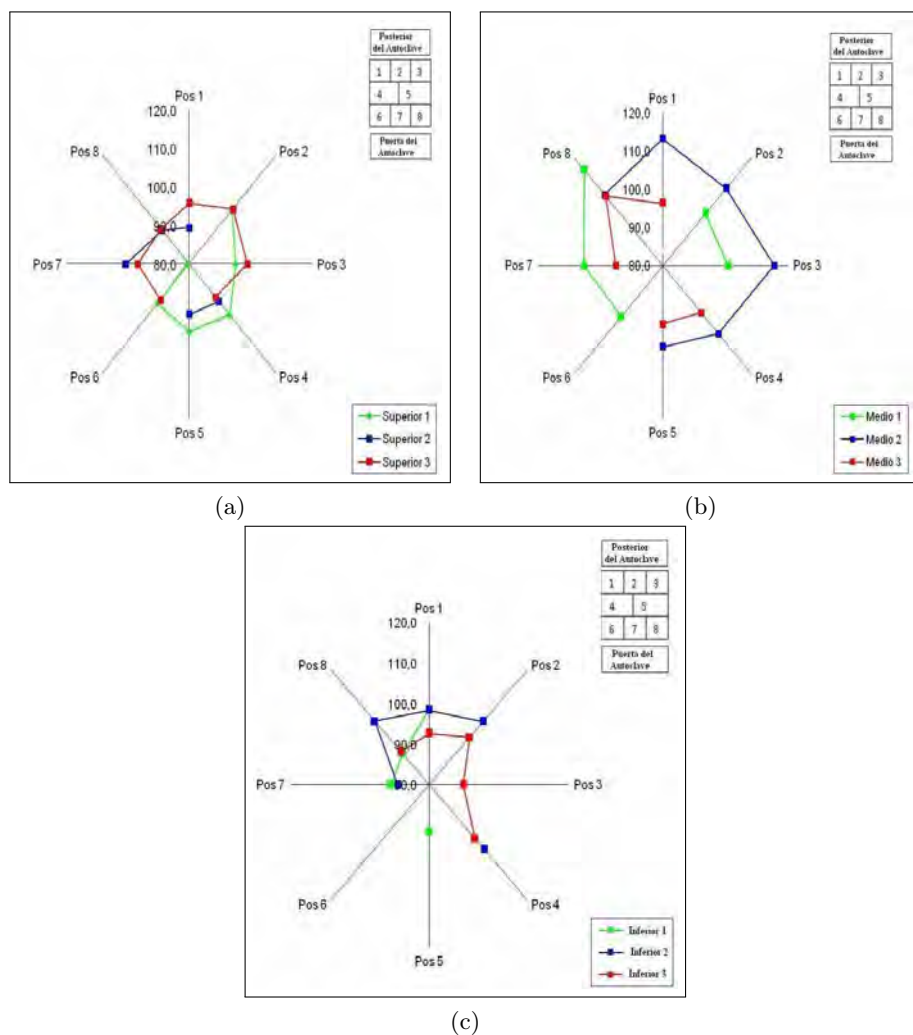


Figura 3.17: Gráficos radiales para el parámetro Δt_{10}^{70} , correspondiente a las distintas posiciones dentro de cada estante del canasto para las 3 repeticiones realizadas. (a) Estante superior. (b) Estante medio. (c) Estante inferior.

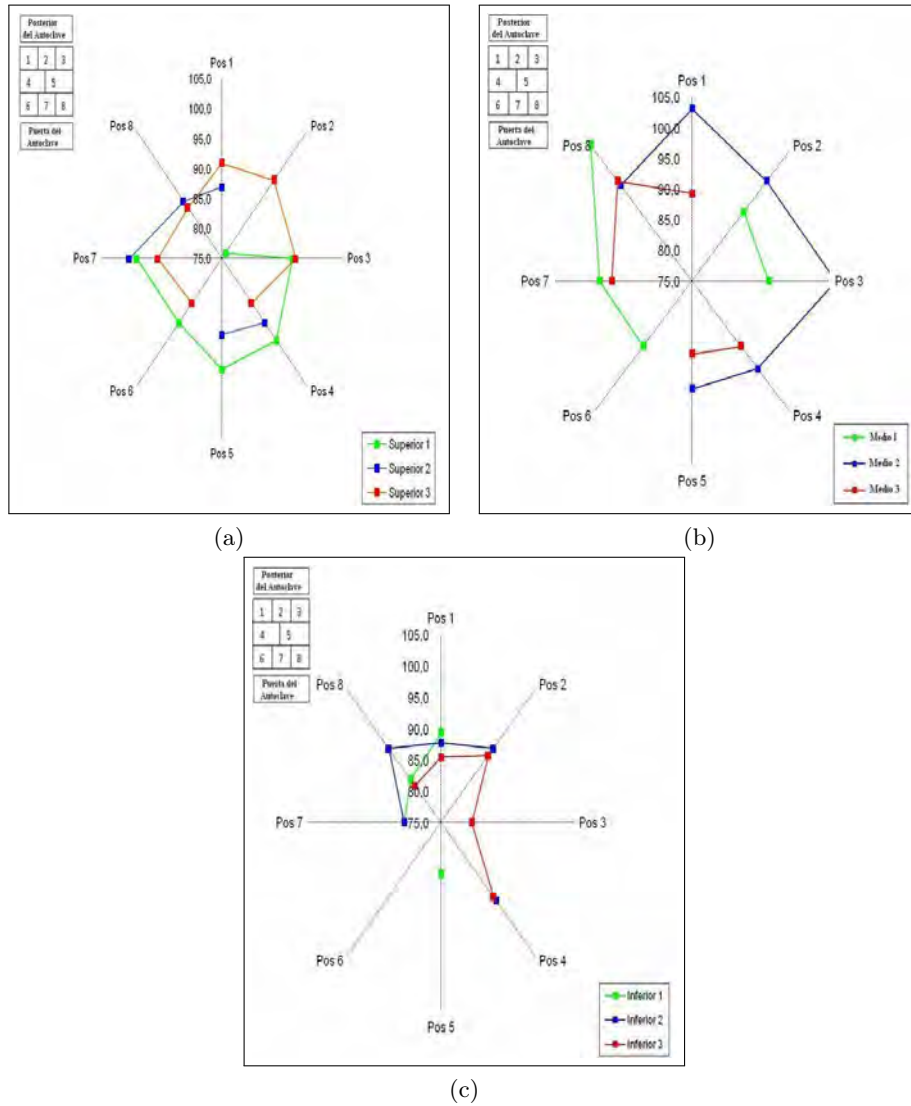
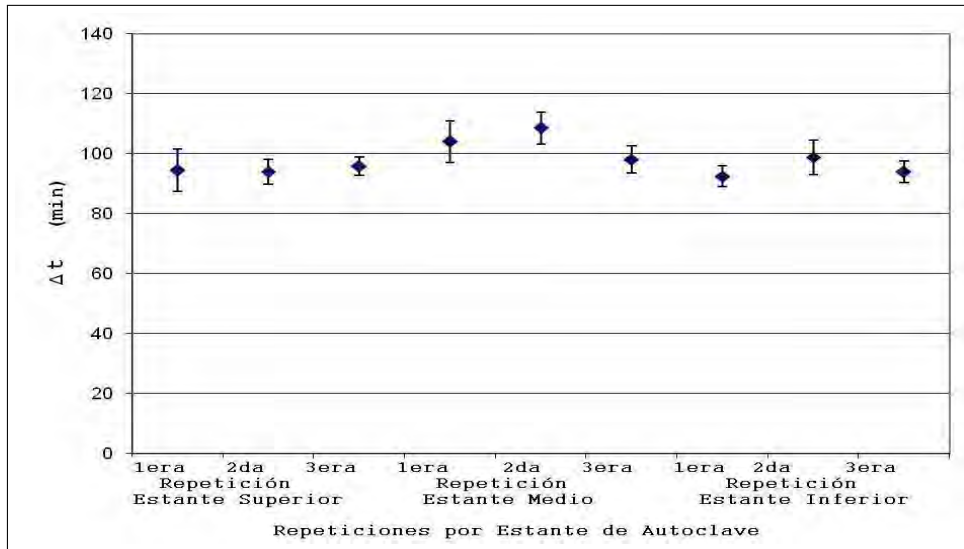


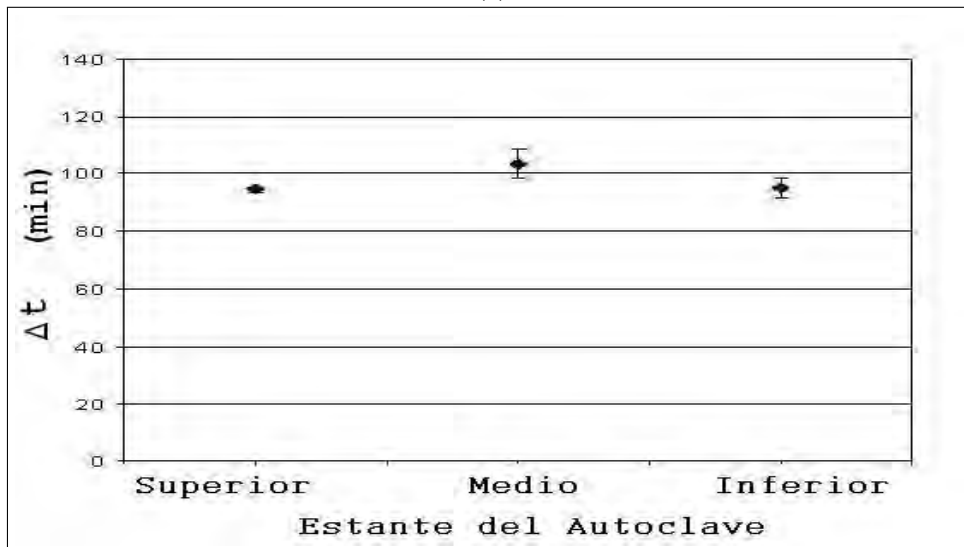
Figura 3.18: Gráficos radiales para el parámetro f_h , correspondientes a las distintas posiciones dentro de cada estante del canasto para las 3 repeticiones realizadas. (a) Estante superior. (b) Estante medio. (c) Estante inferior.

Al analizar las **Figuras ??** y **??**, se concluyó que no era establecer algún patrón de distribución de velocidades de calentamiento de los cilindros, caracterizada tanto por Δt_{10}^{70} como por f_h , para las distintas posiciones evaluadas dentro de cada uno de los 3 estantes del canasto del autoclave. Ello se debió a que cada posición dentro de un mismo estante tuvo un comportamiento distinto en las sucesivas repeticiones de los ensayos. En consecuencia, se decidió analizar estadísticamente los parámetros Δt_{10}^{70} y f_h considerando sus valores promedio para un mismo estante, y para cada una de las repeticiones realizadas. Estas observaciones fueron coincidentes con lo informado en trabajos previos. Así **?**, tampoco pudieron establecer un patrón de distribución de velocidades de calentamiento para las distintas posiciones en un mismo estante de un autoclave con ducha de agua, pese a trabajar con un sistema modelo (ladrillos de policarbonato). En consecuencia estos autores analizaron estadísticamente los resultados considerando los valores promedio de los parámetros por cada estante del canasto.

En la **Figura ??** a se presenta el tiempo de calentamiento, Δt_{10}^{70} , promedio para cada una de las repeticiones realizadas en cada estante del autoclave. A su vez, en la **Figura ??** b se presenta el valor promedio del parámetro Δt_{10}^{70} por estante, calculado a partir de los promedios de las 3 repeticiones realizadas para cada estante del autoclave.



(a)



(b)

Figura 3.19: Valores promedio del parámetro Δt_{10}^{70} . (a) Valor promedio de Δt_{10}^{70} para cada una de las repeticiones realizadas por estante del autoclave (Superior, Medio e Inferior). (b) Valor promedio de Δt_{10}^{70} considerando los promedios de las 3 repeticiones por estante del autoclave.

3.2.1.2. Resultados del Análisis Estadístico del Estudio de la Distribución de Parámetros Característicos de la Penetración de Calor en Músculos *Semitendinosus* bovino Cocidos-Pasteurizados *Sous vide* en un Autoclave con Ducha de Agua de Escala Piloto.

En función de lo indicado anteriormente, se analizaron estadísticamente los parámetros Δt_{10}^{70} y f_h considerando sus valores promedio para cada una de las repeticiones realizadas por cada estante. En la **Tabla ??** se presentan los resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) correspondiente a los parámetros Δt_{10}^{70} y f_h . En la misma se observa que el efecto del estante resultó significativo ($p < 0,05$) para los 2 parámetros evaluados.

A su vez, para establecer cuáles fueron los valores medios de ambos parámetros que resultaron significativamente diferentes, se aplicó el test de comparaciones múltiples DMS (Diferencias Mínimas Significativas). Los resultados del test DMS se presentan en la **Tabla ??**.

Tabla 3.2: Resultados del ANOVA correspondientes a los parámetros Δt_{10}^{70} y f_h .

Modelo	Valor de p *	
	Δt_{10}^{70} (min)	f_h (min)
Estante	0,043	0,022

*Nivel de significancia del 5% ($p < 0,05$)

Tabla 3.3: Valores medios y desvío estándar de los parámetros Δt_{10}^{70} y f_h correspondientes a diferentes estantes del autoclave con ducha de agua Steriflow Barriquand Modelo Microflow.

Estante	Δt_{10}^{70} (min)	f_h (min)
Superior	94,7 ± 0,99 ^b	90,1 ± 0,53 ^b
Medio	103,4 ± 5,22 ^a	95,0 ± 3,65 ^a
Inferior	94,9 ± 3,40 ^b	86,8 ± 2,46 ^b

^{a,b}.Letras diferentes en una misma columna indican valores significativamente diferentes ($p < 0,05$). Test de comparaciones múltiples DMS.

Los valores obtenidos para los parámetros Δt_{10}^{70} y f_h del estante del medio resultaron significativamente mayores ($p < 0,05$) que los parámetros de los estantes superior e inferior. Estos resultados indican que las velocidades de calentamiento de los cilindros ubicados en los estantes superior e inferior resultaron significativamente mayores ($p < 0,05$) que las correspondientes a los cilindros ubicados en el estante

medio del canasto. Se destaca además, que este estante es el que exhibió los mayores desvíos estándar para Δt_{10}^{70} y f_h . A su vez, en el estante superior se observó la mayor homogeneidad (valores menores de los desvíos estándares) de los parámetros evaluados. Los resultados observados para el estante superior fueron esperados, debido a que el agua ingresa a la cámara del autoclave por la parte superior, pasa por la placa perforada *manifold* y se descarga en forma de lluvia, descendiendo a través de los estantes del canasto ubicados en diferentes niveles. A su vez, en trabajos previos, se observó un gradiente de temperatura entre la parte superior y la parte inferior del interior de la cámara del autoclave con ducha de agua. Las mayores temperaturas del agua fueron observadas en el estante superior y las menores en el estante inferior de la cámara de los autoclaves (??). En virtud de ello se considera entonces que la menor velocidad de calentamiento observada en este trabajo en el estante medio de la cámara del autoclave sería consecuencia de un menor coeficiente de transferencia de calor en ese nivel del canasto. Ello se debería a que los cilindros ubicados en el estante superior dificultarían el flujo de agua hacia el estante medio y el contacto de ésta con los cilindros envasados al vacío, por lo que se reduciría el coeficiente de transferencia de calor entre el agua y las piezas envasadas. En el caso del estante inferior, la dificultad de circulación del agua sería mayor por la superposición de los estantes medio y superior. Sin embargo, la velocidad de calentamiento observada fue similar al estante superior. Ello se debería a una mayor turbulencia del agua en contacto con los cilindros ubicados en el estante inferior, la cual se produciría por la combinación de la ducha de agua con el agua acumulada en el fondo del autoclave, generando un efecto similar a un baño de agua agitado, lo cual determinaría un mayor coeficiente de transferencia de calor en esa zona de la cámara del autoclave.

En la **Tabla ??** se presentan las diferencias de tiempo (Δt) entre el tiempo de calentamiento del estante medio, en el cual los cilindros presentan un retardo en el calentamiento y los tiempos de calentamiento (Δt_{10}^{70}) de los estantes en los cuales los cilindros se calientan más rápido (estantes superior e inferior).

Tabla 3.4: Diferencia de tiempo (Δt) entre el Δt_{10}^{70} del estante medio y los tiempos de calentamiento del Δt_{10}^{70} correspondientes a los estantes superior e inferior.

$\Delta t = \Delta t_{10}^{70}$ Medio (min) - Δt_{10}^{70} Superior (min)	$\Delta t = \Delta t_{10}^{70}$ Medio (min) - Δt_{10}^{70} Inferior (min)
8,7	8,5

En ambos casos, el parámetro Δt fue mayor que el tiempo de retención de 2 min, correspondiente al tiempo de muerte térmica para alcanzar 6 reducciones decimales (a 70 °C) de *Listeria monocytogenes* (?). En consecuencia, si los cilindros ubicados en los estantes superior e inferior fuesen utilizados para monitorear el tratamiento de pasteurización y sus centros térmicos fuesen mantenidos durante 2 min a 70 °C, entonces los cilindros ubicados en el estante medio del canasto del autoclave no recibirían la combinación tiempo-temperatura que asegura la condición de pasteurización respecto a *L. monocytogenes* sugerida por un protocolo internacional para la pasteurización de alimentos *Sous vide*, (?). Entonces se concluyó que los procesos de cocción-pasteurización de piezas cárnicas realizados en autoclaves marca Steriflow Barriquand Modelo Microflow, deberán ser controlados monitoreando las curvas de penetración de calor en el centro térmico de piezas ubicadas en la zona central de la cámara del autoclave.

3.2.2. Validación de los Resultados de la Etapa de Modelado y Simulación de los Ciclos CRT y VRT Aplicados en la Cocción-Pasteurización *Sous vide* del Músculo *Semitendinosus* bovino.

3.2.2.1. Comparación entre los Resultados de la Etapa de Modelado Simulación y la de Experimentación en la Obtención del Valor de Pasteurización (VP), Valor de Cocción (CV) y Punto Mínimo de Tratamiento (PMT).

La validación de los tratamientos CRT y VTR en el autoclave (marca Steriflow Barriquand Modelo Microflow Roanne, Francia) tuvo como primera etapa la medición de las dimensiones y de los pesos de músculos *Semitendinosus* bovino provenientes de animales de razas británicas comprados en el frigorífico Coto SA, La utilización del software de elementos finitos Abaqus CAE v. 6.7-1 y del software MATLAB v.7. para el diseño de las geometrías de cada uno de los músculos *Semitendinosus* a ser procesados y la optimización de tratamientos térmicos a partir del análisis dimensional, permitió definir las condiciones para la validación experimental.

Según se detalló en el ítem ??, los músculos fueron pesados, medidos y

fotografiados con el objetivo de modelar su geometría y luego simular los tratamientos CRT y VRT según correspondiera. Ello permitió obtener los valores de VP, CV y tiempo de procesamiento. Estos parámetros se calcularon utilizando las mismas rutinas (*readbc*, *readtemp*, *readdat*, *bc* y *do it*) programadas en lenguaje MATLAB, utilizadas en la primera etapa (modelado y simulación) de este Trabajo de Tesis. En primera instancia se determinaron las coordenadas del PMT en el del músculo simulado, destacándose la importancia de ubicar la posición este punto para realizar el cálculo de los parámetros indicados. Una vez establecidas las coordenadas reales, se llevó a cabo la inserción de la termocupla flexible tipo T en los músculos *Semitendinosus* reales, utilizando para ello el dispositivo stuffing box Modelo C-52 (Ecklund Harrison Tech, USA) colocado en la bolsa *Cook-in* Cryovac CN-640 (Sealed Air, Argentina).

En base al análisis del conjunto de los resultados obtenidos, se han seleccionado para presentar (a modo de ejemplo) en este Trabajo de Tesis, fotografías de músculos *Semitendinosus* bovino con las asimetrías más representativas. Además, en las mismas figuras se muestran estos músculos representados mediante modelos geométricos 3D simplificados. Esta representación se logró luego de haber medido las dimensiones y el peso de los músculos bovino reales y haber obtenido posteriormente las geometrías en el ambiente de trabajo de Abaqus CAE v 6.7-1. y MATLAB v.7. (**Figuras ??** a, b y c).

Una vez obtenidas cada una de las geometrías de los músculos *Semitendinosus* bovino, se simularon los procesos de cocción-pasteurización CRT ó VRT. Se obtuvo el tiempo de procesamiento necesario para alcanzar el $VP_{70}^{10} = 40$ min en los músculos *Semitendinosus* bovinos a procesar (con pesos promedios entre 1.500 y 2.000 g), Este fue calculado a partir de la simulación de los procesos térmicos propuestos (CRT ó VRT) adaptando para ello las dimensiones y pesos de los músculos. Para los 2 bloques, el tiempo de procesamiento necesario para alcanzar el $VP_{70}^{10} = 40$ min se presenta en la **Tabla ??**. Es importante resaltar que durante el tratamiento CRT, la superficie de las piezas estuvo sometida durante más tiempo a la temperatura del agua en la cámara del autoclave (75 °C) que los músculos bovinos correspondientes a VRT, ya que en este último caso el tratamiento térmico fue realizado escalonando la temperatura del medio de intercambio de calor (agua).

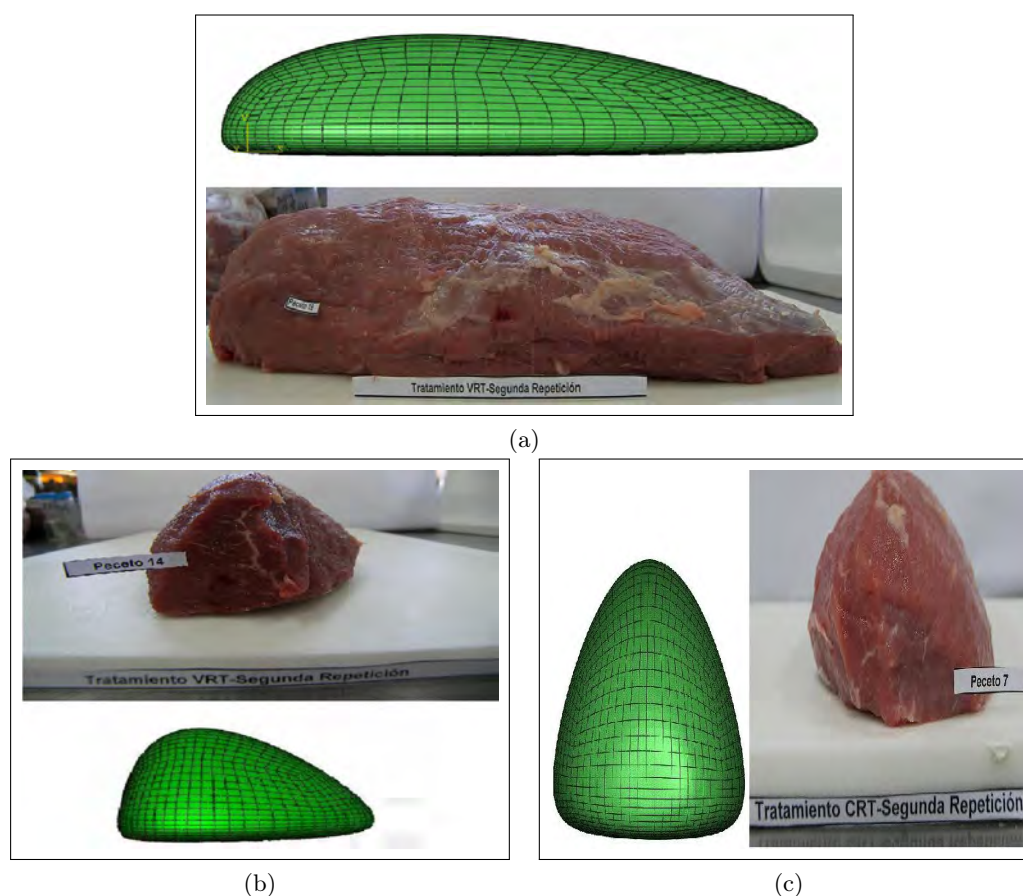
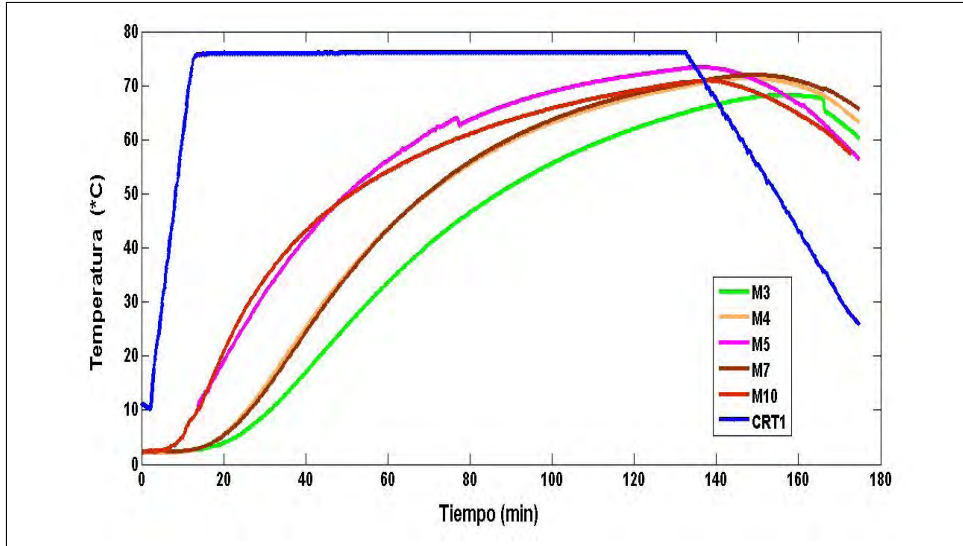


Figura 3.20: Vistas de las dimensiones LY y LZ de diferentes músculos *Semitendinosus* bovino reales y simulados. (a) Vista de la dimensión LZ del músculo real y modelado. (b) Vista de la dimensión LY con asimetría de la porción distal del músculo real y modelado. (c) Vista de la dimensión LY con asimetría de la porción proximal del músculo real y modelado.

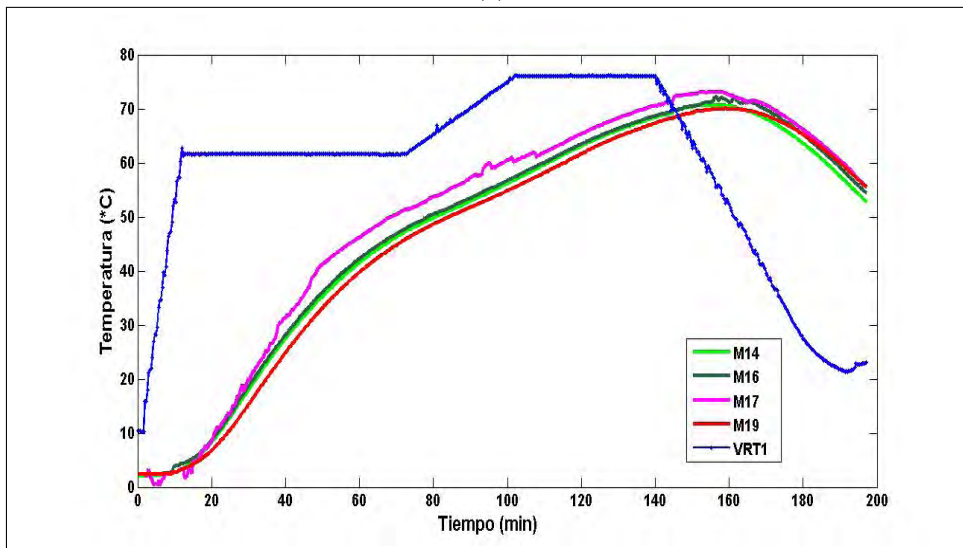
Tabla 3.5: Resultados experimentales para el Bloque 1 y 2 de tiempos de procesamiento (min) para los diferentes procesos de cocción-pasteurización CRT y VRT.

Tratamiento	Tiempo de procesamiento (min)	
	Bloque 1	Bloque 2
CRT	175	177
VTR	183	179

En las Figuras ?? y ?? se presentan las evoluciones térmicas experimentales correspondientes al PMT de músculos *Semitendinosus* bovino y al agua en la cámara del autoclave, para cada tratamiento térmico (CRT y VRT) y bloque experimental.

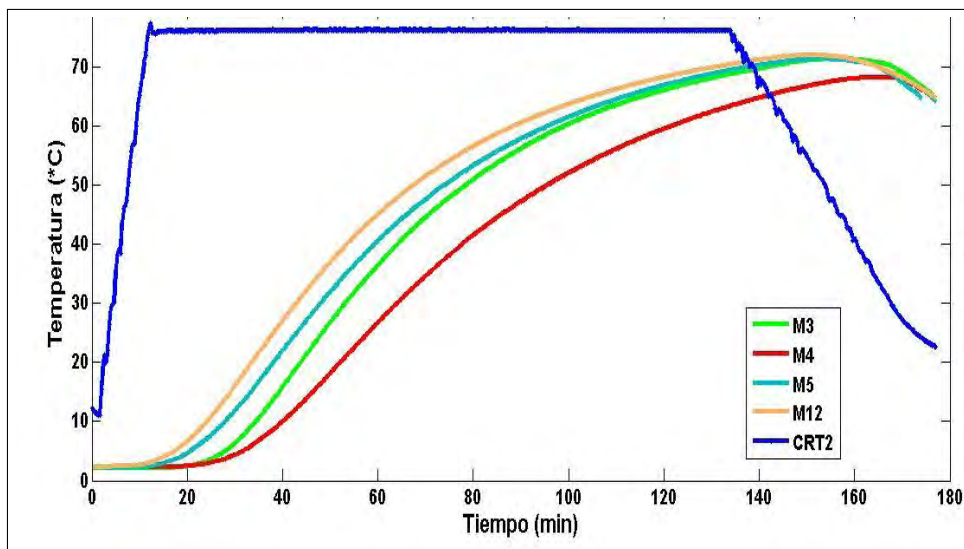


(a)

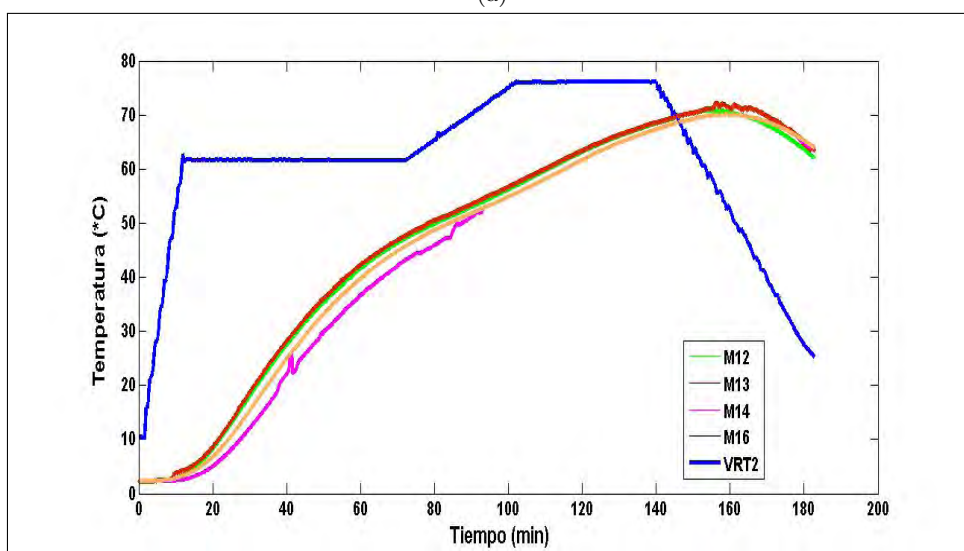


(b)

Figura 3.21: Registro de las evoluciones térmicas experimentales correspondientes al bloque 1: PMT de músculos *Semitendinosus* bovino y agua de la cámara del autoclave bajo condiciones de cocción-pasteurización CRT y VRT. (a) Evolución térmica experimental bajo condiciones de cocción-pasteurización CRT. (b) Evolución térmica experimental bajo condiciones de cocción-pasteurización VRT.



(a)



(b)

Figura 3.22: Registro de las evoluciones térmicas experimentales correspondientes al bloque 2: PMT de músculos *Semitendinosus* bovino y agua de la cámara del autoclave bajo condiciones de cocción-pasteurización CRT y VRT. (a) Evolución térmica experimental bajo condiciones de cocción-pasteurización CRT. (b) Evolución térmica experimental bajo condiciones de cocción-pasteurización VRT.

La medición de las temperaturas internas en los alimentos durante su procesamiento presenta cierta dificultad debido a que las evoluciones térmicas pueden presentar distorsiones y ruido. Así influyen las diferencias en las propiedades termofísicas de los alimentos y el material de la termocupla tipo T, en particular el Cobre, (?). Es de destacar que la mayoría de los productos alimenticios poseen conductividades térmicas, k , en el rango de 0,3 a 0,7 W/m°C, difusividades térmicas, α , entre 1.10^{-7} y $2.10^{-7} m^2/s$ y densidades, ρ , entre 700 y 1.000 kg/m³. A su vez, las propiedades térmicas del Cobre son: k : 401 W/m°C, ρ :8933 kg/m³, Calor específico, C_p , 385 J/kg°C, α ; $117.10^6 m^{-2}/s$, (??)

Con el objetivo de comparar los resultados de los tratamientos térmicos CRT y VRT simulados y los resultados experimentales, se han seleccionado (a modo de ejemplo) las evoluciones térmicas experimentales que se presentan en las **Figuras ?? y ??**. Se incluyen también en las **Figuras ?? y ??** las evoluciones térmicas aproximadas y no aproximadas obtenidas a partir de la simulación correspondiente al modelo 3D generado en el ambiente de Abaqus CAE v.6.7-1 y MATLAB v.7. En el caso de las **Figuras ?? a y ?? a** es posible observar que las diferencias entre las curvas experimentales y las simuladas son despreciables. Sin embargo, las diferencias observadas en las **Figuras ?? b y ?? b** pueden deberse a distintos factores experimentales, como ser la dificultad de insertar correctamente el sensor de temperatura, diferencias entre las difusividades térmicas del alimento y del termopar, y el efecto intermitente de la lluvia de agua de la cámara del autoclave. Otro factor relevante a nivel experimental fue el aporte de calor por parte del autoclave en el cual fueron procesadas las muestras, debido a que se utilizaron mayores temperaturas (76,5 - 77,5 °C) a las simuladas (75 °C). A su vez, los registros de las temperaturas de la cámara del autoclave y de las muestras de músculos bovinos indicaron temperaturas iniciales 10 °C y 3 °C respectivamente. Estos valores fueron considerados como 20 °C y 0 °C en las simulaciones de los procesos térmicos CRT y VRT. Finalmente esos valores fueron ingresados en los programas de simulación utilizados con el fin de respetar las condiciones experimentales.

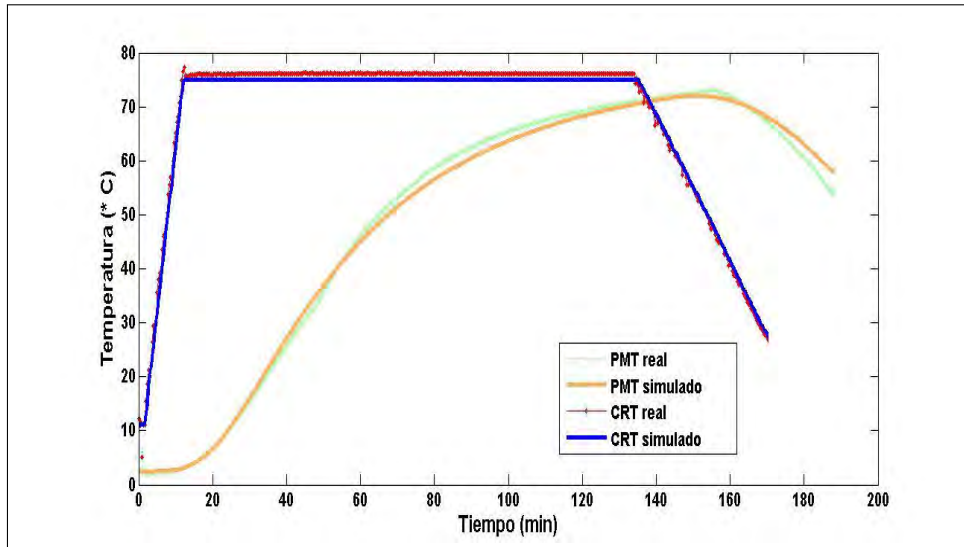
Durante el procesamiento de los alimentos ocurren fenómenos simultáneos a la transferencia de calor, como la pérdida de agua, la reducción del tamaño de las piezas, la pérdida de propiedades nutricionales y el deterioro de los atributos sensoriales. En consecuencia, un modelo completo del tratamiento de cocción-pasteurización debería

incluir un modelo para la conducción de calor en combinación con un modelo que describa la transferencia de materia.

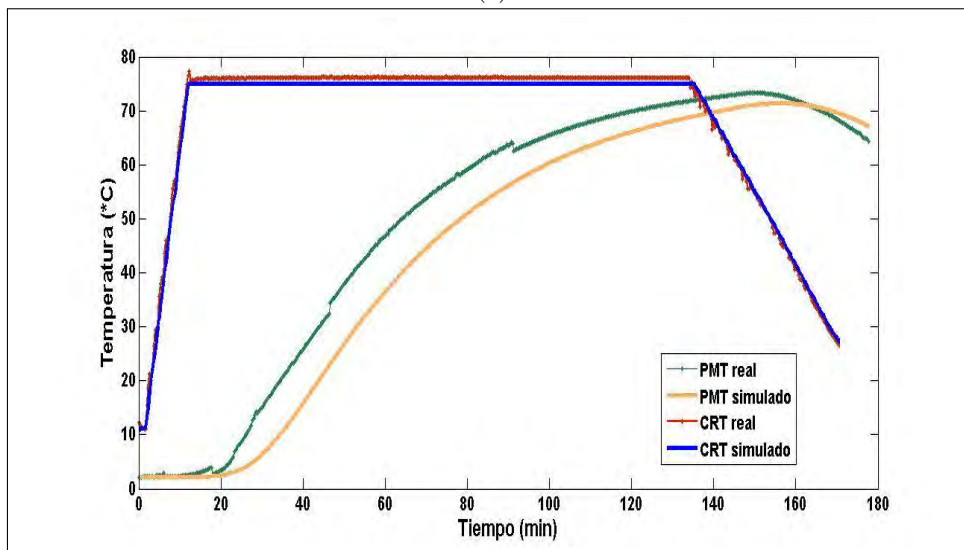
En este sentido, en el presente Trabajo de Tesis, sólo se contempló el fenómeno de conducción de calor, sin acoplar el fenómeno de transferencia de masa (difusión de agua desde el centro hacia la superficie del músculo) al modelo simplificado de la geometría del músculo *Semitendinosus* bovino. Por lo tanto, en el modelo postulado no se contempló la pérdida de agua por el tratamiento térmico y en consecuencia la reducción de la geometría del músculo *Semitendinosus* bovino. Entonces, la malla de elementos finitos utilizada para representar a los diferentes modelos de músculos bovinos (Caso patrón y Casos del 1 al 6) permaneció inmóvil durante la etapa de simulación de los tratamientos de cocción-pasteurización. Sin embargo, durante la etapa de validación de los tratamientos simulados de cocción-pasteurización simulados (CRT ó VRT) fue observada la reducción de los músculos *Semitendinosus* bovino. La disminución del peso habría determinado la modificación de la posición del PMT. La pieza se redujo de tamaño y eso determinaría que el PMT se calentara más rápido en el caso real que el caso modelado.

Por otro lado, la generación de un modelo simple del músculo *Semitendinosus* bovino de 32.000 elementos finitos, a partir de 6 parámetros (LX, LY, LZ, a, b, c) y la simulación de los procesos de cocción-pastrurización tipo CRT y VRT ha proporcionado información sobre la conducción de calor en los músculos simulados, pudiendo ser representados correctamente en el ambiente trabajo de Abaqus CAE v.6.7-1 y MATLAB v.7. Como ventaja comparativa, se desarrollaron rutinas en lenguaje MATLAB las cuales permitieron obtener un ahorro en el cálculo computacional al optimizar los tratamientos térmicos. Aprovechando la linealidad del problema térmicos, los mismos fueron construídos en forma separada. Es decir, se generaron las curvas de calentamiento y enfriamiento de cada pieza bovina con posterior ensamble de las mismas a fin de alcanzar un valor de $VP_{70}^{10} = 40$ min en el PMT como así también localizar la posición de este último cada músculo simulado. Sin embargo, la etapa de generación de geometrías simples constituyeron una herramienta útil y de bajo costo computacional para localizar y demostrar que el PMT de los músculos *Semitendinosus* bovino medidos a nivel experimental se localizaron en la zona correspondiente a la porción proximal del mismo. Lo cual fue previamente demostrado en la primera etapa de simulación y generación de músculos

Semitendinosus bovino del presente Trabajo de Tesis.

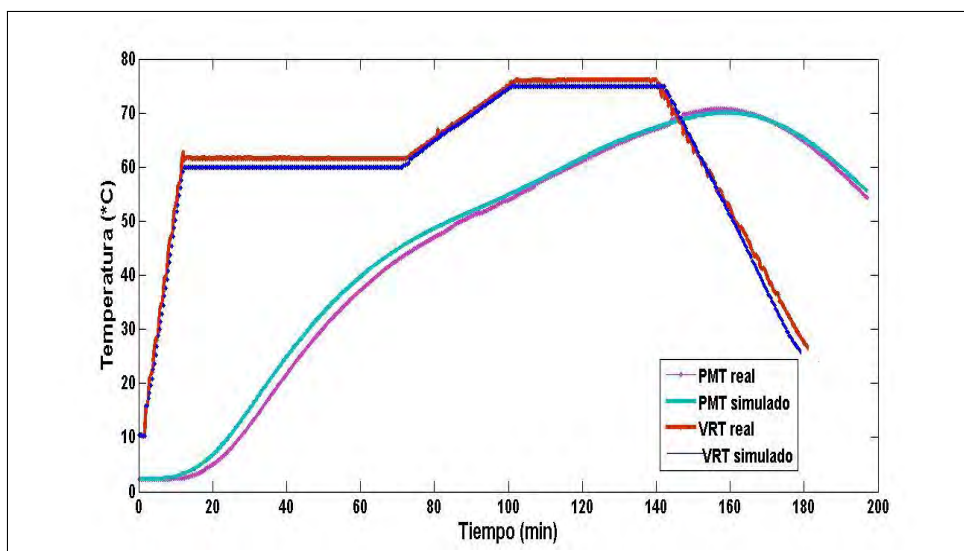


(a)

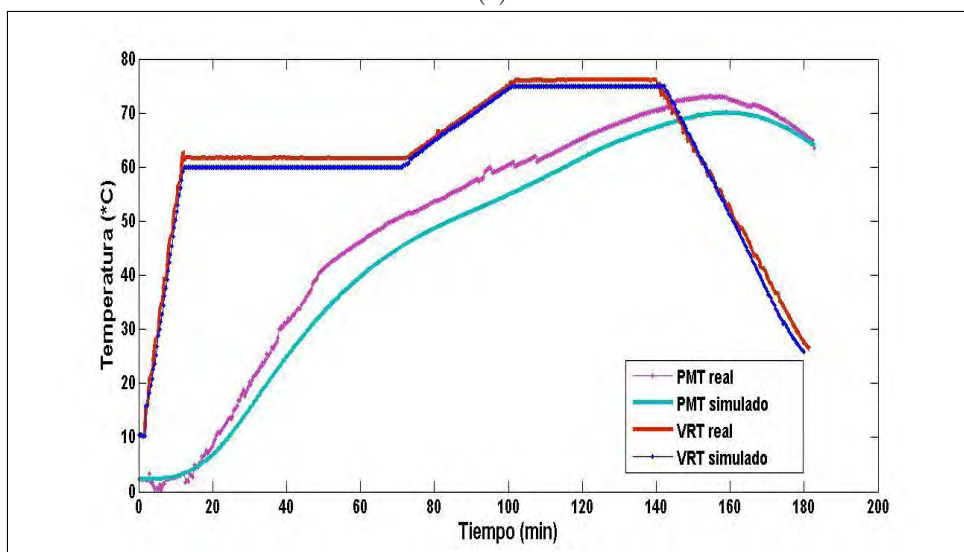


(b)

Figura 3.23: Evoluciones térmicas experimentales y simuladas correspondientes al PMT de un músculo *Semitendinosus* bovino y agua de la cámara del autoclave bajo condiciones de cocción-pasteurización tipo CRT. (a) Evolución térmica experimental y simulada aproximada bajo condiciones de cocción-pasteurización CRT. (b) Evolución térmica experimental y simulada no aproximada bajo condiciones de cocción-pasteurización CRT.



(a)



(b)

Figura 3.24: Evoluciones térmicas experimentales y simuladas correspondientes al PMT de un músculo *Semitendinosus* bovino y agua de la cámara del autoclave bajo condiciones de cocción-pasteurización tipo VRT. (a) Evolución térmica experimental y simulada aproximada bajo condiciones de cocción-pasteurización VRT. (b) Evolución térmica experimental y simulada no aproximada bajo condiciones de cocción-pasteurización VRT.

En las **Tablas ??** y **??** se presentan los valores de VP_{70}^{10} y CV_{100}^{33} obtenidos por simulación y experimentalmente. En las **Tablas ??** y **??** también se presenta el PMT calculado mediante las rutinas de simulación y el determinado experimentalmente. Este último fue medido luego del tratamiento térmico, una vez que la pieza cárnica fue enfriada y cortada en rodajas hasta alcanzar la sección final de la termocupla insertada. En general, los valores de VP_{70}^{10} experimentales resultaron mayores que que sus VP_{70}^{10} calculados mediante simulación. La posición de los PMT medidos experimentalmente ha cambiado durante el procesamiento térmico respecto a los obtenidos por simulación debido al cambio de tamaño de las piezas. Para ciertos casos, la ubicación del sensor (termocupla tipo T) de temperatura utilizado, no fue la correcta hasta el final del procesamiento térmico.

Se presentan en las **Tablas ??** y **??** los valores de CV_{100}^{33} . En el caso de CRT para ambos bloques, dichos valores respondieron a una mayor temperatura aunque menor tiempo de procesamiento respecto de los valores obtenidos para el caso de VRT. Lo cual coincide con lo postulado en la primera etapa de simulación del presente Trabajo de Tesis.

Tabla 3.6: Valores simulados y experimentales de VP_{70}^{10} , PMT y CV_{100}^{33} correspondientes a los Bloques 1 y 2 de los músculos *Semitendinosus* bovino cocidos-pasteurizados bajo condiciones CRT.

Músculo	VP_{70}^{10} sim (min)	VP_{70}^{10} real (min)	PMT sim*	PMT real*	CV_{100}^{33} sim (min)	CV_{100}^{33} real (min)
M 3	42, 4	39, 1	4, 5; 2, 3; 13, 6	3, 8; 1, 9; 11, 8	38, 5	40, 7
M 4	40, 6	45, 5	4, 2; 2, 3; 15, 9	3, 9; 2, 1; 12, 3	37, 2	46, 9
M 5	40, 1	48, 5	4, 2; 2, 3; 15, 9	3, 7; 2, 6; 12, 7	37, 2	47, 9
M 7	40, 6	44, 5	4, 2; 2, 3; 15, 9	3, 9; 2, 1; 12, 3	37, 2	44, 9
M 10	41, 3	49, 5	4, 1; 2, 1; 11, 4	3, 7; 1, 7; 10, 7	39, 5	45, 6
M 3	40, 3	58, 5	4, 9; 2, 3; 13, 6	4, 0; 2, 2; 12, 5	37, 2	40, 5
M 4	41, 3	58, 5	5, 1; 2, 2; 11, 5	4, 8; 1, 7; 10, 5	34, 1	48, 2
M 5	41, 4	53, 1	5, 3; 2, 5; 11, 7	4, 4; 2, 3; 11, 0	39, 5	43, 2
M 12	41, 4	66, 1	5, 3; 2, 5; 11, 7	5, 8; 2, 1; 10, 3	39, 5	45, 2

* Dimensiones de LX, LY, LZ.

Tabla 3.7: Valores simulados y experimentales de VP_{70}^{10} , PMT y CV_{100}^{33} correspondientes a los Bloques 1 y 2 de los músculos *Semitendinosus* bovino cocidos-pasteurizados bajo condiciones VRT.

Músculo	VP_{70}^{10} sim (min)	VP_{70}^{10} real (min)	PMT sim*	PMT real*	CV_{100}^{33} sim (min)	CV_{100}^{33} real (min)
M 14	40, 4	48, 5	3, 5; 2, 5; 11, 5	2, 9; 1, 9; 10, 2	31, 5	37, 2
M 16	40, 6	60, 5	4, 4; 2, 5; 15, 2	3, 5; 2, 0; 13, 3	33, 2	39, 9
M 17	41, 3	60, 9	3, 1; 4, 1; 14, 4	3, 7; 3, 7; 10, 7	32, 5	38, 6
M 19	41, 3	68, 5	4, 3; 2, 2; 11, 4	3, 4; 2, 7; 11, 7	32, 5	37, 4
M 12	43, 4	39, 4	4, 8; 2, 4; 13, 7	4, 0; 2, 0; 13, 0	30, 5	32, 3
M 13	41, 2	49, 2	5, 1; 2, 1; 13, 6	5, 2; 2, 4; 11, 5	31, 2	36, 9
M 14	42, 3	35, 5	4, 9; 2, 0; 13, 2	3, 8; 2, 2; 11, 0	33, 5	36, 2
M 16	41, 3	56, 5	4, 1; 2, 2; 11, 4	3, 8; 2, 9; 12, 7	32, 5	37, 4

* Dimensiones de LX, LY, LZ.

3.2.2.2. Resultados Correspondientes a pH del Músculo Cocido, Diferencia de pH y Porcentaje de Pérdida de Peso.

Los resultados del análisis de variancia (ANOVA) de los parámetros pH del músculo cocido y diferencia de pH, así como la pérdida de peso correspondientes al efecto del tratamiento se presentan en la **Tabla ??**. Cabe señalar que el efecto del bloque no fue estadísticamente significativo para ninguna de las variables analizadas ($p > 0,05$).

Tabla 3.8: Resultados del ANOVA para el efecto del tratamiento y valores promedio y desvíos estándar (DS) para cada uno de los parámetros evaluados en los músculos *Semitendinosus* cocidos.

Parámetro	Efecto del Tratamiento *	Tratamiento	
		CRT Promedio + DS	VRT Promedio + DS
pH del músculo cocido	0,1280	6,07 ± 0,13	6,21 ± 0,18
Diferencia de pH **	0,1014	0,49 ± 0,14	0,39 ± 0,12
Pérdida de peso (%)	0,0001	22,9 ± 1,9 ^a	17,4 ± 2,8 ^b

* Valor de p.

** Diferencia de pH = pH del músculo cocido - pH del mismo músculo crudo.

^{a,b} Letras diferentes en una misma línea indican valores significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Los resultados del análisis estadístico correspondientes a pH del músculo cocido y diferencia de pH no mostraron diferencias estadísticamente significativas en el efecto del tratamiento ($p > 0,05$). El incremento del pH que se observó en los músculos cocidos, fue similar para ambos tratamientos. Las modificaciones conformacionales de las proteínas cárnicas que ocurren durante la desnaturalización térmica, causarían este incremento, ya que los grupos cargados pueden quedar expuestos e ionizarse, (?).

No obstante, la pérdida de peso presentó diferencias significativas en el efecto del tratamiento ($p = 0,0001$). Los músculos procesados mediante el tratamiento CRT presentaron valores significativamente mayores de ese parámetro respecto a los músculos procesados mediante el tratamiento VRT. Se resalta la importancia de la diferencia observada del 5,5 % en los valores de pérdida de peso entre los músculos correspondientes a los tratamientos CRT y VRT evaluados. La variación porcentual de la pérdida de peso entonces obtenida en el presente Trabajo de Tesis (5,5 %) resulta significativa si se consideran las cantidades elevadas de materia prima que se

procesan en una planta industrial. Este resultado favorable fue consecuencia de haber aplicado una estrategia de ciclado térmico tipo VRT (Delta T). En este caso, la forma de implementada respondió a un tratamiento con escalonamiento de temperaturas, en el que la temperatura externa del autoclave fue incrementada de modo de mantener una diferencia entre la temperatura de la pieza cárnica (estrategia Delta T). Al final de la rampa de calentamiento, la temperatura externa se mantuvo constante e igual que el tratamiento a temperatura constante de autoclave (CRT). En general, el escalonamiento de temperatura (Delta T) mejora los atributos sensoriales de los productos cárnicos, reduce la pérdida de agua y de peso de las piezas y minimiza la pérdida de compuestos responsables del "flavour" típico de la carne cocida.

En la aplicación del tratamiento Delta T se requiere alcanzar una diferencia de 25 °C ó 30 °C entre la temperatura externa de autoclave (75 °C - 80 °C) y la temperatura en el punto más frío de la pieza cárnica (60 °C - 65 °C), (?). Este tipo de tratamiento es aplicado a productos cárnicos en los cuales se busca reducir la pérdida de peso por cocción y aumentar el rendimiento. La desventaja de este tipo de tratamiento es que los tiempos de procesamiento son generalmente más extensos (CRT).

?, estudiaron el efecto del aumento de la temperatura durante el calentamiento de músculos como *Longissimus dorsi*, *Rectus femoris* y *Semitendinosus* bovino. Estos autores informaron que las pérdidas de peso de los músculos aumentaron con el incremento de la temperatura y con la velocidad de cocción. En consecuencia, a menores tiempos de procesamiento y mayores temperaturas las pérdidas de peso por cocción aumentarían. A su vez, ?, estudiaron en músculos *M. pectoralis* el efecto de la temperatura de cocción (60 - 80 °C), el tiempo de procesamiento (15-60 min) y los métodos de cocción (presión atmosférica, *Sous vide* y *Cook vide*). Los resultados de pérdida de peso por cocción informados por esos autores presentaron la misma dependencia de la temperatura y del tiempo de procesamiento que los publicados por ?. A su vez, ?, estudiaron el efecto de bajas temperaturas (50 a 65 °C) a durante largos tiempos de cocción pasteurización (90 - 360 min) sobre los parámetros tecnológicos, las propiedades fisicoquímicas y la estabilidad durante el almacenamiento refrigerado de músculos *Semitendinosus*. Estos autores, observaron un mayor efecto de la temperatura que del tiempo de tratamiento sobre las pérdidas de peso por cocción. Estos antecedentes permiten interpretar el efecto positivo del tratamiento VRT observado en este Trabajo de Tesis.

El tratamiento VRT sería el de elección para el tratamiento térmico *Sous vide* de piezas enteras de carne vacuna, cuando se pretende aumentar el rendimiento del proceso aplicando un protocolo de cocción-pasteurización diseñado para alcanzar $VP_{70}^{10} = 40$ min. Ello posibilitaría a la Argentina, como país productor de carne vacuna, exportar a los mercados internacionales, no sólo de cortes vacunos frescos sino también carne bovina cocida de alta calidad sensorial. En este sentido, la Unión Europea, autorizó a la Argentina entre otros países la exportación de carne vacuna cocida siempre que la materia prima se adecue a los requisitos y haya sido tratada mediante el protocolo de pasteurización denominado “F”. Este protocolo establece que el tratamiento térmico debe ser aplicado de modo de asegurar una temperatura de al menos 65 °C en el punto de mínimo tratamiento del producto, durante un tiempo que garantice al menos un Valor de Pasteurización VP_{70}^{10} de 40 min.

3.2.2.3. Resistencia al Corte: Estudio Comparativo entre Dos Elementos de Corte Diferentes (Celda de Warner-Bratzler y Cizalla de Warner-Bratzler) y entre los Tratamientos CRT y VRT.

El análisis de correlación de Pearson indicó una correlación estadísticamente significativa ($p < 0,05$), directa y con un coeficiente de correlación elevado ($r = 0,82$) entre los valores de resistencia al corte medidos mediante 2 elementos de corte diferentes (Celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida y Cizalla de Warner-Bratzler equipada con una cuchilla triangular). A su vez, el modelo de regresión simple aplicado fue estadísticamente significativo ($p < 0,0001$), y la recta de regresión lineal obtenida presentó un valor de $r^2 = 0,67$. La expresión de la recta obtenida fue la siguiente:

$$y = 6,55 + 0,73x \quad (3.2.1)$$

donde

y = Resistencia al corte evaluada mediante Celda de Warner-Bratzler (N).

x = Resistencia al corte evaluada mediante Cizalla de Warner-Bratzler (N).

En la **Figura ??** se observa la recta de regresión lineal en color azul, las observaciones experimentales representadas por cruces, y los intervalos de confianza del 95 % utilizados, para una respuesta media (color rojo) y para predicciones futuras

(color violeta).

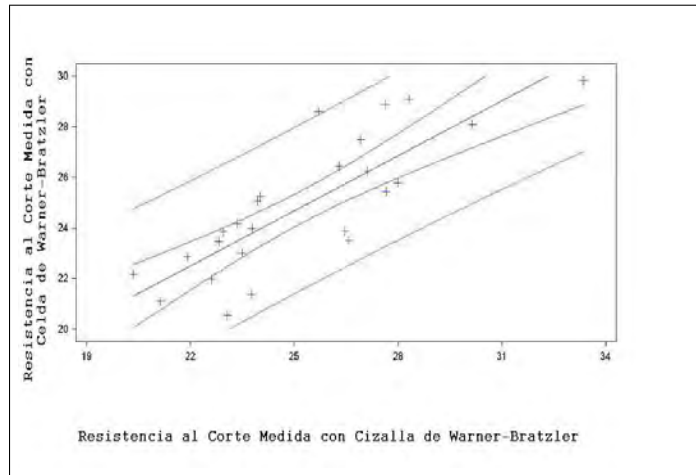


Figura 3.25: Regresión lineal entre los valores de las resistencias al corte medidas con la Celda de Warner-Bratzler (N) y con la Cizalla de Warner-Bratzler (N).

En la **Tabla ??** se presentan los resultados del ANOVA en relación al efecto del tratamiento. Se observa que no hubo efecto de tratamiento sobre ninguna de las 2 formas de medición de las resistencias al corte. La información presentada en **Tabla ??**, confirmó que el modelo de regresión fue válido, ya que la recta de regresión no dependió del tratamiento aplicado (CRT ó VRT).

Tabla 3.9: Resultados del ANOVA para el efecto del tratamiento y los valores medios y desvíos estándar (DS) para la resistencia al corte evaluada mediante dos elementos de corte diferentes.

Parámetro	Efecto de Tratamiento*	Tratamiento	
		CRT Prom. \pm DS	VRT Prom. \pm DS
Resistencia al corte medida con Celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo "V" invertida (N)	0,0636	26,4 \pm 0,8	24,2 \pm 0,8
Resistencia al corte medida con Cizalla de Warner-Bratzler con cuchilla triangular (N)	0,6013	25,2 \pm 0,8	24,6 \pm 0,8

* Valor de p.

Los resultados presentados en la **Tabla ??** indican que no se observó una diferencia

significativa ($p > 0,05$) por efecto del tipo de tratamiento (CRT y VRT) aplicado, como era esperado a priori. Sin embargo, los músculos tratados mediante VRT presentaron una tendencia a valores menores de resistencia al corte.

3.2.2.4. Resistencia al Corte medida con Celda de Warner-Bratzler: Estudio Comparativo entre las Mediciones Realizadas en la Periferia de la Rodaja de Músculos *Semitendinosus* Cocidos-Pasteurizados y de las Mediciones en Toda la Rodaja.

Como se describió en el Capítulo de Materiales y Métodos, se realizó la medición del parámetro resistencia al corte con una Celda de Warner Bratzler (con elemento de corte tipo “V” invertida) en la periferia de una rodaja y en otra rodaja completa del mismo músculo, y se los comparó estadísticamente aplicando análisis de correlación de Pearson. El análisis indicó una relación lineal estadísticamente significativa ($p < 0,05$), directa y con un alto coeficiente de correlación ($r = 0,95$) entre ambas mediciones. La respuesta del modelo de regresión simple indicó que el mismo fue estadísticamente significativo ($p < 0,0001$).

La recta de regresión lineal obtenida presentó un valor de $r^2 = 0,934$ y la misma se estimó como:

$$y = 2,29 + 0,98x \quad (3.2.2)$$

donde;

y = Resistencia al corte en la periferia de la rodaja del músculo *Semitendinosus* bovino cocido-pasteurizado.

x = Resistencia al corte en toda la rodaja del músculo *Semitendinosus* cocido-pasteurizado.

En la **Figura ??**, se presenta la recta de regresión lineal en color azul, las observaciones experimentales indicadas mediante cruces y los intervalos de confianza del 95 % utilizados, para obtener una respuesta media (color rojo) y para predicciones futuras (violeta).

En la **Tabla ??** se presentan los resultados del ANOVA correspondientes a los valores de la resistencia al corte medidos en la periferia de la rodaja y en toda

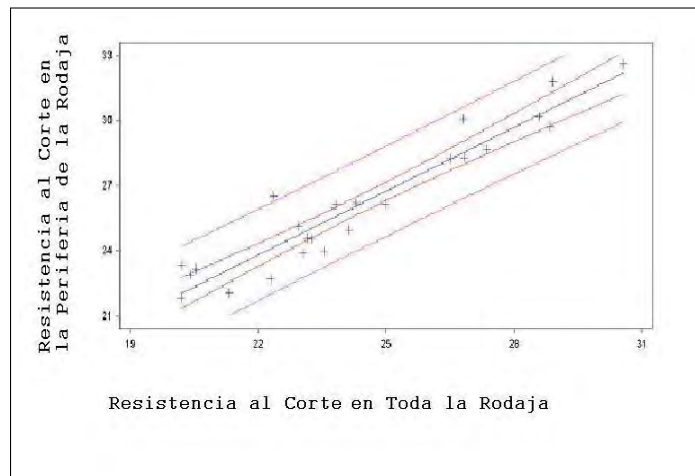


Figura 3.26: Regresión lineal entre los valores de resistencia al corte medidos en la periferia de la rodaja vs. los valores correspondientes a toda la rodaja del músculo *Semitendinosus* cocido-pasteurizado.

la rodaja del músculo *Semitendinosus* bovino cocido-pasteurizado. Asimismo en la **Tabla ??** se presenta la diferencia de la resistencia al corte entre la periferia y el conjunto de la rodaja.

Tabla 3.10: Resultados del ANOVA para el efecto del tratamiento y los valores medios y desvíos estándar (DS) para la resistencia al corte medida en la periferia y en toda la rodaja del músculo *Semitendinosus* bovino cocido-pasteurizado y su diferencia por zona de medición.

Efecto de Tratamiento	Resistencia al corte medida en la periferia de la rodaja	Resistencia al corte medida en toda la rodaja	Diferencias de las resistencias al corte medidas en las dos zonas de la rodaja
CRT	25,6 ± 3,2	24,1 ± 2,8	1,6 ± 0,9
VTR	26,6 ± 3,9	24,7 ± 3,3	1,9 ± 0,9
Valor de p	0,44	0,62	0,37

Los resultados presentados en la **Tabla ??** muestran que no se obtuvieron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los valores de resistencia al corte correspondientes a la periferia y las del resto de la rodaja de los músculos cocidos para las 2 tipos de tratamientos térmicos evaluados (CRT y VRT). Se esperaba que las diferencias entre periferia y centro de las rodajas resultaran significativas, en particular para el tratamiento CRT y que este efecto fuese minimizado por el

tratamiento VRT. Sin embargo, se observó una tendencia a valores mayores de resistencia al corte en la periferia de las rodajas de los músculos correspondientes a los 2 tratamientos térmicos evaluados (CRT y VRT)

En relación con el efecto del tratamiento térmico sobre la textura de las piezas cárnicas, (???) informaron que en el intervalo de 60-100 °C, ocurren simultáneamente 2 fenómenos opuestos: el efecto de ablandamiento (mejora en la ternera) y el efecto de endurecimiento de la carne (endurecimiento de la ternera). Por un lado, se produce la desnaturalización del colágeno que mejora la tiernización de la carne, mientras que por otro lado ocurre el fenómeno de la desnaturalización de las proteínas miofibrilares (actina y miosina), lo que determina el endurecimiento del tejido cárnico. La temperatura del tratamiento juega un papel preponderante sobre la ocurrencia y el predominio de ambos. En el intervalo 40 a 50 °C comienza la desnaturalización de las proteínas miofibrilares, principalmente la fracción liviana de la miosina, ocasionando un aumento en la dureza. Un incremento de la temperatura entre los 60 y 70 °C provoca el encogimiento del colágeno intramuscular, y luego en el rango 70-90 °C ocurre la deshidratación y encogimiento del complejo actomiosina (?).

?, informaron que la selección de la temperatura final de la pieza cárnica durante el procesamiento es crítica ya que influirá sobre la ternera de la carne cocida. Si la temperatura elegida se encuentra por debajo de la temperatura de encogimiento del colágeno, la ternera no disminuirá. Si por el contrario, la temperatura seleccionada supera a la temperatura de encogimiento del colágeno, se producirá un aumento de la contracción de fibras e incremento de la pérdida de peso por cocción. En cambio, si la temperatura seleccionada coincide con la temperatura de encogimiento, no ocurrirán mayores pérdidas de peso por cocción y se incrementará la ternera de la pieza cárnica sometida al procesamiento térmico.

En nuestro caso la superficie de la pieza, particularmente en CRT estuvo expuesta a 75 °C mientras que el centro estuvo expuesto a temperaturas menores, por lo que si hubiese esperado mayor efecto sobre la desnaturalización de la actina en el caso del tratamiento CRT y mayor diferencia en la resistencia al corte entre el centro y la periferia. A su vez, en el caso de VRT la superficie de la pieza solo estuvo a 75 °C aproximadamente 1/3 del tiempo de procesamiento.

3.2.2.5. Análisis de Apreciación Visual.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas pareadas simples y triangulares correspondientes a los 2 bloques del diseño experimental:

Bloque 1:

- Prueba pareada simple:

La prueba fue llevada a cabo utilizando 26 evaluadores ($n=26$), 25 de los cuales indicaron que la muestra correspondiente al tratamiento CRT fue más oscura, con un nivel de significación de $\alpha = 0,1\%$. A su vez, veintidos (22) evaluadores eligieron a la muestra correspondiente al tratamiento VRT como más homogénea, con un nivel de significación de $\alpha=0,1\%$.

- Prueba triangular:

Para esta prueba se utilizaron 26 evaluadores ($n=26$), 15 de los cuales respondieron en forma correcta, con un nivel de significación $\alpha= 0,1\%$.

Bloque 2:

- Prueba pareada simple:

La prueba fue llevada a cabo utilizando 28 evaluadores ($n=28$), 24 de los cuales eligieron a la muestra correspondiente a CRT como más oscura, con un nivel de significación $\alpha=0,1\%$. A su vez, 15 evaluadores eligieron a la muestra correspondiente a VRT como más homogénea, con un nivel de significación $\alpha=0,1\%$.

- Prueba triangular:

Para esta prueba se utilizaron 18 evaluadores ($n=18$), todos ellos respondieron en forma correcta, con un nivel de significación $\alpha=0,1\%$. La prueba triangular se interrumpió en $n=18$ y no se extendió hasta $n=28$ debido a que la misma sería significativa, con independencia de un número adicional de evaluadores.

El color oscuro superficial de la carne cocida difiere del color de su interior, debido al incremento en la concentración del pigmento hemínico, como resultado de la deshidratación superficial y de la migración de los pigmentos solubles. A su vez, participan los productos resultantes de las reacciones de pardeamiento no enzimático como la caramelización de los azúcares y de la reacción de Maillard (?).

Estructuralmente, la mioglobina es una proteína globular compacta (globina), ordenada y plegada de forma casi triangular, enlazada a un grupo hemo. La desnaturalización de la globina en carne vacuna comienza en el rango 55 a 60 °C, y finaliza en el rango 75 °C - 80 °C, produciéndose además el cambio de estado del hierro del grupo hemo que se encuentra en estado férrico (Fe^{3+}), formando el complejo ferrohemocromo, el cual por oxidación se convierte en otro compuesto, denominado ferrihemocromo (de color marrón). A su vez, se produce un incremento de la coloración marrón-rojiza y verde, como consecuencia de concentración de Metmioglobina y Sulfamioglobina. En particular, la cocción *Sous vide* otorgaría un efecto protector evitando la total degradación de la mioglobina, (??). Analizando el conjunto de resultados, se observó que la apreciación visual de las muestras fue significativamente diferente entre ambos tratamientos térmicos (CRT vs VRT). Las rodajas de los músculos cocidos correspondientes al tratamiento CRT fueron significativamente más oscuras (más marrones, menos rojas) que las muestras correspondientes al tratamiento VRT. Con respecto a la distribución del color en la superficie de las rodajas de los músculos cocidos, las muestras correspondientes al tratamiento VRT resultaron significativamente más homogéneas que las correspondientes a CRT. Estos resultados guardan relación con los menores valores de CV_{100}^{33} , obtenidos en el tratamiento VRT en la etapa de simulación del presente Trabajo de Tesis. Los mismos podrían explicarse, considerando el tratamiento térmico aplicado en el escalonamiento de temperatura tipo Delta T (VRT). Se produciría un menor efecto sobre la desnaturalización de la mioglobina como consecuencia de la exposición de la pieza a menor temperatura. también el escalonamiento Delta T determinaría una mejor distribución del color debido al menor gradiente observado entre el centro y periferia y en consecuencia un efecto similar sobre el pigmento.

3.2.2.6. Resultados de Parámetros Cromáticos.

Los resultados del análisis estadístico de los parámetros cromáticos medidos en el espacio X, Y, Z en una rodaja de la zona central del músculo *Semitendinosus* bovino cocido-pasteurizado se presentan en la **Tabla ??**. Los parámetros cromáticos (X, Y, Z) presentaron diferencias estadísticamente significativas en el efecto correspondiente a Zona ($p < 0,01$) y la interacción Tratamiento*Zona ($p < 0,05$).

Tabla 3.11: Resultados del análisis estadístico de los parámetros cromáticos X, Y, Z medidos en una rodaja de la zona central del músculo *Semitendinosus* cocido-pasteurizado.

Fuente de variación	Grados de libertad	Valor de p		
		X	Y	Z
Tratamiento	2 - 1 = 1	0,5142	0,7285	0,9879
Zona	3 - 1 = 2	0,0017	0,0027	0,0046
Tratamiento*Zona	1 * 2 = 2	0,0295	0,0372	0,0382

A su vez, en la **Tabla ??**, se presentan los resultados del análisis estadístico de los parámetros cromáticos medidos en el espacio CIELAB (L^* , a^* y b^*) en una rodaja de la zona central músculo *Semitendinosus* cocido-pasteurizado. A diferencia de los resultados obtenidos para los parámetros X, Y, Z, no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en ninguno de los efectos evaluados, sobre los parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* .

Tabla 3.12: Resultados del análisis estadístico de los parámetros cromáticos L^* , a^* , b^* medidos en una rodaja de la zona central del músculo *Semitendinosus* cocido-pasteurizado.

Fuente de variación	Grados de libertad	Valor de p		
		L^*	a^*	b^*
Tratamiento	2 - 1 = 1	0,8461	0,4599	0,5500
Zona	3 - 1 = 2	0,1834	0,5425	0,7056
Tratamiento*Zona	1 * 2 = 2	0,4306	0,6531	0,6991

En la **Tabla ??** se presentan los valores medios y los errores estándar de los parámetros cromáticos X, Y, Z medidos en una rodaja de la zona central del músculo *Semitendinosus* cocido-pasteurizado. En la **Tabla ??** se presentan los resultados de los valores medios y los errores estándares correspondientes a los parámetros L^* , a^* y b^* .

En general, se observó que el tratamiento VRT resultó más homogéneo que el

tratamiento CRT en relación a la distribución de todos los parámetros cromáticos (X, Y, Z) en las 3 zonas de la rodaja **Tabla ??**. En el caso de los músculos tratados mediante CRT, todos los parámetros cromáticos presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre la parte superior (Zona 1) y el centro de la rodaja (Zona 2). Estos resultados corroboran lo observado mediante el análisis de apreciación visual, debido a que en ese análisis los evaluadores ponderaron a las rodajas de los músculos tratados mediante VRT como las más homogéneas. Según lo presentado en la **Tabla ??** e indicado en párrafos anteriores, no se observaron diferencias significativas en relación a los efectos del Tratamiento, Zona o interacción Tratamiento*Zona sobre los parámetros cromáticos, L^* , a^* y b^* . En consecuencia se concluye que los parámetros cromáticos (CIELAB) analizados presentaron valores medios similares para ambos tratamientos (CRT y VTR) en las 3 zonas evaluadas.

Tabla 3.13: Valores medios y errores estándar correspondientes a los parámetros cromáticos X, Y, Z medidos en una rodaja de la zona central del músculo *Semitendinosus* cocido-pasteurizado.

Tratamientos	Zona correspondiente a las mediciones de parámetros cromáticos X, Y, Z en una rodaja central del músculo **			Error estándar
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	
Parámetro X				
CRT	27,59 ^b	30,90 ^a	30,11 ^{a,b}	1,79
VTR	29,34 ^{a,b}	29,79 ^{a,b}	30,27 ^{a,b}	
Parámetro Y				
CRT	25,58 ^b	29,09 ^a	28,28 ^{a,b}	1,83
VTR	27,34 ^{a,b}	27,79 ^{a,b}	28,30 ^{a,b}	
Parámetro Z				
CRT	20,84 ^b	24,44 ^a	23,65 ^{a,b}	1,81
VTR	22,53 ^{a,b}	22,82 ^{a,b}	23,60 ^{a,b}	

** Según **Figura ??**. Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en el efecto Tratamiento*Zona.

Tabla 3.14: Valores medios y error estándar correspondientes a los parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* medidos en una rodaja de la zona central del músculo *Semitendinosus* cocido-pasteurizado.

Tratamientos	Zona correspondiente a las mediciones de parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* en una rodaja central del músculo **			Error estándar
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	
Parámetro L^*				
CRT	59,01	59,79	59,62	0,74
VTR	59,17	59,96	59,79	0,89
Parámetro a^*				
CRT	13,00	13,00	13,00	0,33
VTR	13,35	13,35	13,35	0,33
Parámetro b^*				
CRT	11,26	11,26	11,26	0,30
VTR	11,53	11,53	11,53	0,30

** . Según Figura ??.

Capítulo 4

Conclusiones

El desarrollo del presente Trabajo de Tesis se dividió en dos partes, una de modelado numérico y otra experimental. La primera incluyó la generación de modelos geométricos de músculos *Semitendinosus* bovino proponiendo una geometría simple controlada por seis parámetros (LX, LY, LZ, a, b, c), de los cuáles los tres primeros representaron las dimensiones de la pieza mientras que los tres restantes caracterizaron a la asimetría propia del músculo. A fin de obtener una geometría simple de un músculo *Semitendinosus* bovino, se comenzó por la generación de una geometría esférica dentro del entorno gráfico del software Abaqus CAE v.6.7-1. Se creó un cuerpo sólido 3D de revolución y deformable. Se generó entonces un músculo *Semitendinosus* bovino patrón de peso promedio (1.800 g), con dimensiones iguales a 10 cm, 7 cm y 30 cm, correspondientes a las dimensiones LX, LY y LZ, respectivamente. Estas dimensiones fueron afectadas por 3 coeficientes de asimetría, cuyos valores 1, 2,5 y 1,5, correspondieron a los coeficientes a, b y c respectivamente. Además de esta geometría patrón, se obtuvieron seis casos más, modificando solamente los parámetros LX, LY y LZ en $\pm 20\%$ en relación a las dimensiones del primer modelo obtenido (músculo patrón).

La primera parte del Trabajo de Tesis también incluyó la etapa de modelado y simulación de ciclos de cocción-pasteurización *Sous vide* a Temperatura Constante de Autoclave (CRT) a 75 °C y Temperatura Variable de Autoclave (VRT) con

escalonamiento de temperatura (Delta T) hasta llegar a 75 °C. Los modelos generados (músculo patrón y geometrías de los casos del 1 al 6) fueron utilizados en las simulaciones de los procesos de cocción-pasteurización CRT y VRT dentro del entorno del software Abaqus CAE v.6.7-1. Esas simulaciones se realizaron en forma adimensional y en dos instancias independientes como procesos de calentamiento y enfriamiento, aprovechando la linealidad del problema térmico, para luego ser ensambladas mediante rutinas en lenguaje MATLAB. Este ensamble se ejecutó de forma de optimizar el proceso de cocción-pasteurización al utilizar la condición establecida en el Protocolo “F” de la Unión Europea, es decir alcanzar el Valor de Pasteurización VP_{70}^{10} de 40 min en el punto de mínimo tratamiento (PMT) de cada geometría modelada.

Otro de los objetivos a propuestos en la primera etapa del Trabajo de Tesis, fue la ubicación del PMT de todas los casos modelados, una vez alcanzado VP_{70}^{10} de 40 min. Asimismo, se evaluó el Valor de Cocción (CV_{100}^{33}) y el tiempo de procesamiento necesario para alcanzar el $VP_{70}^{10} = 40$ min aplicando tratamientos de cocción-pasteurización *Sous vide* de tipo CRT y VRT.

En la parte experimental del presente Trabajo de Tesis, se planteó el estudio de la distribución de parámetros característicos de la penetración de calor (tiempo de calentamiento Δt_{10}^{70} y factor de velocidad de calentamiento f_h). Este estudio se llevó a cabo utilizando cilindros de músculos *Semitendinosus* bovino cocidos-pasteurizados *Sous vide* los cuales fueron procesados en un autoclave con ducha de agua de escala piloto (Steriflow Barriquand modelo Microflow, Roanne, Francia). Este estudio permitió identificar la zona del canasto del autoclave más retrasada en relación al calentamiento y enfriamiento de los músculos.

A su vez, en la etapa experimental se realizó la validación de los tratamientos CRT y VTR simulados en la primera etapa, utilizando el autoclave indicado en el párrafo precedente. Las dimensiones de las piezas reales fueron utilizadas para el diseño de las geometrías de cada uno de los músculos y luego se realizó la optimización de los tratamientos térmicos a partir del análisis dimensional. Se aplicaron las mismas rutinas programadas para los casos del músculo *Semitendinosus* bovino patrón y casos 1 al 6, las cuales fueron implementadas mediante el software de Elementos Finitos Abaqus CAE v. 6.7-1 y el software MATLAB v.7. Ello permitió obtener los

valores de VP_{70}^{10} , CV_{100}^{33} , tiempo de procesamiento y determinar las coordenadas del PMT de cada músculo modelado. Una vez establecidas las coordenadas reales de cada PMT, se llevó a cabo la inserción de termocuplas flexibles tipo T, el envasado al vacío de los músculos y la aplicación de los tratamientos térmicos CRT y VRT con el objetivo de validar los resultados de las simulaciones. Finalmente se realizaron mediciones de parámetros fisicoquímicos y tecnológicos como pH del músculo crudo y del músculo cocido, diferencia de pH y pérdida de peso. A su vez, se realizaron mediciones de la resistencia al corte evaluada mediante Celda de Warner-Bratzler con elemento de corte tipo “V” invertida y Cizalla de Warner-Bratzler con cuchilla triangular. La determinación de la resistencia al corte se realizaron en rodajas de músculos bovinos cocidos-pasteurizados mediante tratamientos CRT y VRT. Además, se midió la resistencia al corte en la periferia y en toda la rodaja de los músculos cocidos-pasteurizados. También se realizó un análisis de apreciación visual de los músculos cocidos a través de un panel sensorial entrenado. Además se midieron los parámetros cromáticos en los espacios X, Y, Z y CIELAB (L^* , a^* , b^*), los cuales fueron determinados en la zona central de rodajas de músculos cocidos-pasteurizados en condiciones CRT y VRT.

La generación de la geometría de músculos *Semitendinosus* bovino a través de un modelo simplificado controlado por seis parámetros (LX, LY, LZ, a, b, c), constituyó un método simple, sencillo y de bajo costo computacional. Este modelo permitió capturar las asimetrías que el músculo presenta en sus ejes x, y, z. Asimismo, se aprovechó la linealidad del problema térmico, para realizar en forma eficiente las simulaciones de los procesos de cocción-pasteurización CRT y VRT para cada geometría generada. Estas simulaciones fueron ejecutadas en dos etapas adimensionalizadas, a fin de poder escalearlas a cualquier dimensión posterior y propiedades termofísicas de interés. Al analizar el efecto de ambos tratamientos, se obtuvieron en todos los casos simulados Valores de Cocción (CV_{100}^{33}) mayores para el tratamiento CRT que para el VRT. A su vez, los casos que más se diferenciaron del músculo patrón fueron aquellos en los que se modificó en forma directa (Caso 2) o indirecta (Caso 6), el parámetro LY que caracterizó a la altura de los músculos. Se esperaría entonces que la aplicación que un tratamiento térmico VRT escalonado (ΔT), permitiría minimizar el efecto del procesamiento sobre los atributos sensoriales, las propiedades nutricionales y los parámetros tecnológicos (pérdidas

de peso y rendimientos).

Respecto al tiempo de procesamiento para alcanzar el $VP_{70}^{10} = 40$ min en el PMT, se concluyó que los tratamientos CRT en los distintos casos simulados (patrón y 1 a 6) presentaron menor tiempo de procesamiento que los mismos casos tratados mediante VRT. En particular se observó, que el efecto de una mayor altura del músculo (LY) determinaría un mayor tiempo de procesamiento para lograr el VP_{70}^{10} en el PMT. A su vez, el análisis de sensibilidad a la variación en las dimensiones del músculo ($\pm 20\%$ respecto a las dimensiones del músculo patrón) demostró que la posición del PMT no se modificó en forma marcada, excepto en el caso correspondiente al aumento de la dimensión LZ.

En la segunda etapa del Trabajo de Tesis se realizó el estudio de la distribución de los parámetros característicos de la penetración de calor en cilindros de músculos *Semitendinosus* bovino en un autoclave con ducha de agua de escala piloto. En este estudio que no fue posible establecer algún patrón de distribución de velocidades de calentamiento de los cilindros, caracterizada tanto por Δt_{10}^{70} como por f_h , para las distintas posiciones evaluadas dentro de cada uno de los 3 estantes del canasto del autoclave. No obstante, las velocidades de calentamiento promedio de los cilindros ubicados en los estantes superior e inferior resultaron significativamente mayores que la correspondiente a los cilindros ubicados en el estante medio del canasto. Se pudo establecer como conclusión general que los procesos de cocción-pasteurización *Sous vide* de piezas cárnicas realizados en autoclaves marca Steriflow Barriquand modelo Microflow, deberían ser controlados monitoreando las curvas de penetración de calor en el centro térmico de piezas ubicadas en la zona central de la cámara del autoclave.

La validación de los procesos de cocción-pasteurización CRT y VRT simulados se realizó en un autoclave con ducha de agua. En el tratamiento CRT, se ejecutó una sola fase de mantenimiento a $75\text{ }^\circ\text{C}$ mientras que en el proceso VRT (escalonamiento de la temperatura tipo Delta T) la fase de mantenimiento térmico fue implementada en dos etapas, a 60 y a $75\text{ }^\circ\text{C}$. Si bien se observaron algunas diferencias entre las curvas experimentales y las simuladas, las mismas pudieron deberse a distintos factores experimentales como la dificultad de insertar correctamente el sensor de temperatura, diferencias entre las difusividades térmicas del alimento y del termopar, y el efecto intermitente de la lluvia de agua de la cámara del autoclave. Otro factor importante

a nivel experimental fue el procesamiento a temperaturas más altas (76,5 - 77,5 °C) que las simuladas (75 °C).

A su vez, en el presente Trabajo de Tesis, sólo se contempló el fenómeno de conducción de calor, sin acoplar la transferencia de masa (difusión de agua desde el centro hacia la superficie del músculo) al modelo simplificado de la geometría del músculo *Semitendinosus* bovino. Por lo tanto, en el modelo postulado no se contempló la pérdida de agua por el efecto del tratamiento térmico ni la reducción de la geometría del músculo *Semitendinosus* bovino. La malla de elementos finitos utilizada para representar a los diferentes modelos de músculos bovinos permaneció inmóvil durante la etapa de simulación de los tratamientos de cocción-pasteurización. Sin embargo, durante la etapa de validación de los tratamientos de cocción-pasteurización simulados (CRT ó VRT) fue observada la reducción de los músculos *Semitendinosus* bovino. La disminución del tamaño habría determinado la modificación de la posición del PMT. La pieza se redujo de tamaño y peso y eso determinaría que el PMT se calentase más rápido en el caso real que en el caso modelado. En consecuencia para igual tiempo de procesamiento se alcanzó mayor temperatura en el PMT del músculo real que en el del simulado.

Al analizar los tiempos de procesamiento térmico experimentales, se observó que en los tratamientos CRT el tiempo necesario para alcanzar el $VP_{70}^{10} = 40$ min fue de 175 y 177 min para los bloques 1 y 2 respectivamente, mientras que para los tratamientos VRT, los tiempos de procesamiento fueron 183 y 179 minutos para los bloques 1 y 2 respectivamente. En este sentido, el efecto positivo del tratamiento VRT se debería a la mejora de los atributos sensoriales y parámetros tecnológicos aún cuando el tiempo de procesamiento resultase mayor que para el tratamiento CRT. Este efecto se vio reflejado en la pérdida de peso por cocción debido a que los músculos procesados mediante el tratamiento CRT presentaron valores significativamente mayores de ese parámetro respecto a los músculos procesados mediante el tratamiento VRT. Se destaca la importancia de la diferencia observada (aproximadamente 5,5 %) en los valores de pérdida de peso, particularmente si se consideran los volúmenes que se procesan diariamente en una planta procesadora de carne. Este resultado favorable se relacionó con la aplicación de una estrategia de ciclado térmico tipo VRT (escalonamiento Delta T).

No se observó efecto significativo del tipo de tratamiento térmico (CRT y VRT) sobre la resistencia al corte de los músculos *Semitendinosus* cocidos-pasteurizados, aunque las muestras tratadas mediante VRT presentaron una tendencia a valores menores de ese parámetro. Además, si bien se esperaban diferencias significativas de resistencia al corte entre la periferia y el resto de la rodaja de los músculos *Semitendinosus* cocidos- pasteurizados CRT, solo se observó una tendencia a valores mas altos en la periferia de las rodajas para ambos tratamientos térmicos (CRT y VRT).

En el análisis de apreciación visual, las rodajas de los músculos cocidos correspondientes al tratamiento CRT fueron valoradas como significativamente más oscuras (más marrones, menos rojas) que las muestras correspondientes al tratamiento VRT. Con respecto a la distribución del color en la superficie de las rodajas de los músculos cocidos, las muestras correspondientes al tratamiento VRT resultaron significativamente más homogéneas que las correspondientes a CRT. Esta observación guarda relación con los menores valores de CV_{100}^{33} obtenidos para el tratamiento VRT en la etapa de simulación y en la etapa experimental. Los mismos podrían explicarse por el tipo de tratamiento térmico aplicado (escalonamiento Delta T) en el caso del tratamiento VRT, debido a un menor efecto sobre la transformación de la mioglobina, pigmento responsable del color rojo de la carne. A su vez, se observó que las muestras correspondientes al tratamiento VRT resultaron más homogéneas que las correspondientes al tratamiento CRT, en relación a la distribución de los parámetros cromáticos (X, Y, Z) en la rodaja del músculo cocido. En el caso de los músculos tratados mediante CRT, todos los parámetros cromáticos presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre la parte superior y el centro de la rodaja. Estos resultados corroboraron lo observado mediante el análisis de apreciación visual, debido a que los evaluadores ponderaron a las rodajas de los músculos tratados mediante VRT como las más homogéneas.

Bibliografía

- Abaqus CAE, v.6.7-1 (2007). SIMULIA, Dassault Systèmes, Francia.
- ACMSF (1992). «Report on Vacuum Packaging and Associated Processes». *Informe técnico*, Advisory Committee on the Microbiological Safety of Food, HMSO, London.
- Adams, H. W y Hardt-English, P.K. (1990). «Determining temperature distribution in cascading water retorts.» *Food Technology*, 44(12), pp. 110–115.
- Akterian, S. G (1995). «Numerical simulation of unsteady heat transfer in canned mushrooms in brine during sterilization processes». *Journal of Food Engineering*, 25(1), pp. 45–53.
- Almonacid-Merino, S.F.; Simpson, R. y Torres, J. A. (1993). «Time-variable retort temperature profiles for cylindrical cans: batch process time, energy consumption, and quality retention model». *Journal of Food Process Engineering*, 16(4), pp. 271–287.
- AMSA (1995). «Research guidelines for cookery, sensory evaluation and instrumental tenderness measurements of fresh meat». *Informe técnico*, American Meat Science Association, Chicago, IL, USA.
- Ansorena, M. R.; Del Valle, C. y Salvadori, V.O (2010). «Application of transfer functions to canned seafood thermal processing». *Food Science and Technology International*, 16, pp. 43–51.
- Arias, M.N.; Sancho, A.M.and Grigioni G.G.; Sanchez, G.; Picallo, A. B; Carduza, F. y Vaudagna, S. (2003). «Physical properties and sensory quality of bifes a la

- criolla meal prepared using Sous vide system». En: 49th International Congress of Meat Science and Technology, Brazil.
- Armstrong, G. A. y McIlveen, H. (2000). «Effects of prolonged storage on the sensory quality and consumer acceptance of sous vide meat-based recipe dishes». *Food Quality and Preference*, 11(5), pp. 377–385.
- Armstrong, G.A (2000). *The stability and shelf-life of food*. capítulo 8. Sous vide products, pp. 173–195. Ed. Kilcast, D., Consultant and P Subramaniam, Leatherhead Food Research, Woodhead Publishing Limited. UK.
- Balaban, M. y Pigott, G.M. (1988). «Mathematical model of simultaneous heat and mass transfer in food with dimensional changes and variable transport parameters». *Journal of Food Science*, 53(3), pp. 935–939.
- Banga, J. R.; Perez-Martin, R. I.; Gallardo, J. M. y Casares, J. J. (1991). «Optimization of the thermal processing of conduction-heated canned foods: Study of several objective functions». *Journal of Food Engineering*, 14(1), pp. 25–51.
- Barriquand, Steriflow (1993). «Microflow main characteristics. C900SR-F». *Informe técnico*.
- Beauchemin, M. (1990). «Sous-vide technology». En: 43 Reciprocal Meat Conference, pp. 103–107. National Livestock and Meat Board, Chicago, IL.
- Bertelsen, G. y Juncher, D. (1996). «Oxidative stability and sensory quality of sous vide cooked products». En: Proceedings of Second European Symposium on Sous Vide, pp. 45–133. Alma University Restaurants/FAIR, University of Leuven, Belgium.
- Bertola, N.C.; Bevilacqua, A.E. y Zaritzky, N.E. (1994). «Heat treatment effect on texture changes and thermal denaturation of proteins in beef muscle». *Journal of Food Processing and Preservation*, 18(1), pp. 31–46.
- Betts, G.D (1998). *Sous vide and cook-chill processing for the food industry*. capítulo 6. Critical factors affecting the safety of minimally processed chilled foods., pp. 131–164. Ed. Ghazala, S. Aspen Publishers, Gaithersburg, MD.

- Bhowmik, S.R. y Tandon, S. (1987). «A method for thermal process evaluation of conduction heated foods in retortable pouches». *Journal of Food Science*, 52, pp. 202–209.
- Califano, A. N.; Bertola, N. C.; Bevilacqua, A. E. y Zaritzky, N. E. (1997). «Effect of processing conditions on the hardness of cooked beef». *Journal of Food Engineering*, 34(1), pp. 41–54.
- Califano, A.N. y Zaritzky, N.E. (1993). «A numerical method for simulating heat transfer in heterogeneous and irregularly shaped foodstuffs». *Journal of Food Process Engineering*, 16(3), pp. 159–171.
- Campbell, S. y Ramaswamy, H.S. (1992). «Distribution of heat transfer rate and lethality in a single basket water cascade retort.» *Journal of Food Process Engineering*, 15, pp. 31–48.
- Chandrupatla, T. R. y Belegundu, A. D. (1999). *Introducción al estudio del Elemento Finito en Ingeniería..*
- Chang, H.C.; Carpenter, J.A. y Toledo, R.T. (1998). «Modeling heat transfer during oven roasting of unstuffed turkeys». *Journal of Food Science*, 63(2), pp. 257–261.
- Chen, C. R. y Ramaswamy, H. S. (2001). «Modeling and optimization of variable retort temperature (VRT) thermal processing using coupled neural networks and genetic algorithms.» *Journal of Food Engineering*, 53(3), pp. 209–220.
- Church, I. J. y Parsons, A. L. (1993). «Review. Sous vide cook-chill technology.» *International Journal of Food Science and Technology*, 28, pp. 575–586.
- Cleland, A. C. y Earle, R. L. (1984). «Assessment of Freezing Time Prediction Methods». *Journal of Food Science*, 49(4), pp. 1034–1042.
- Cleland, D. J.; Cleland, A. C.; Earle, R. L. y Byrne, S. J. (1984). «Prediction of rates of freezing, thawing or cooling in solids of arbitrary shape using the finite element method». *International Journal of Refrigeration*, 7, pp. 6–13.
- Commission-432/2005 (2005). «Protocolo “F”». *Informe técnico*, Official Journal of the European Union.

- Creed, P. G. y Reeve, W.G. (1998). *Sous vide and cook chill processing for the food industry*. capítulo 2. Principles and applications of sous vide processed foods, pp. 25–56. Ed. Ghazala, S. Aspen Publishers, Gaithersburg, MD..
- Creed, P.G. (1998). *Sous vide and cook-chill processing for the food industry*. capítulo 3. Sensory and nutritional aspects for sous vide processed foods, pp. 57–88. Ed. Ghazala, S. Aspen Publishers, Gaithersburg, MD.
- CT96-1020, FAIR (1997). «Harmonization of safety criteria for minimally processed foods.» *Inventory report*.
- CT96-1020, FAIR (1999). «Harmonization of safety criteria for minimally processed foods. Rational and harmonization report. FAIR Concerted Action». *Inventory report*.
- Davey, L.M. y Pham, Q.T. (1997). «Predicting the dynamic product heat load and weight loss during beef chilling using a multi-region finite difference approach». *International Journal of Refrigeration*, 20(7), pp. 470–482.
- Durance, T.; J., Dou y J., Mazza (1997). «Selection of variable retort temperature process for canned salmon». *Journal of Food Process Engineering*, 20, pp. 65–76.
- ECFF (1996). *European Chilled Food Federation*. European Chilled Food Federation.
- Feiner, G. (2006). *Meat products handbook: practical science and technology*. capítulo Whole-muscle brine-injected products. CRC. Woodhead Publishing.
- García, R. M. (2004). *Inferencia estadística y diseño de experimentos*.
- García-Segovia, P.; Andrés-Bello, A. y Martínez-Monzó, J. (2007). «Effect of cooking method on mechanical properties, color and structure of beef muscle (M. pectoralis)». *Journal of Food Engineering*, 80, pp. 813–821.
- Goñi, S.M. y Purlis, E. (2010). «Geometric modelling of heterogeneous and complex foods». *Journal of Food Engineering*, 97(4), pp. 547–554.
- Goñi, S.M.; Purlis, E. y Salvadori, V. O (2008). «Geometry modelling of food materials from magnetic resonance imaging». *Journal of Food Engineering*, 88(4), pp. 561–567.

- Goñi, S.M.; Purlis, E. y Salvadori, V.O. (2007). «Three-dimensional reconstruction of irregular foodstuffs.» *Journal of Food Engineering*, 82, pp. 536–547.
- Grunert, K.G. (2006). «Future trends and consumer lifestyles with regard to meat consumption.» *Meat Science*, 74(1), pp. 149–160.
- Hansen, T.B.; KnØchel, S.; Juncher, D. y Bertelsen, G. (1995). «Storage characteristics of sous vide cooked roast beef.» *International Journal of Food Science and Technology*, 30, pp. 365–378.
- Hayakawa, K. (1970). «Experimental formulas for accurate estimation of transient temperature of food and their application to thermal process evaluation.» *Food Technology*, 24(12), pp. 1407–1417.
- Hayakawa, K. y Ball, C.O. (1971). «Theoretical formulas for temperatures in cans of solid food and for evaluating various heat processes.» *Journal of Food Science*, 36, pp. 306–310.
- Hrdina-Dubsky, D. L. (1989). «Sous vide finds its niche.» *Food Engineering International*, pp. 41–48.
- Huang, E. y Mittal, G. S. (1995). «Meatball cooking - modeling and simulation.» *Journal of Food Engineering*, 24(1), pp. 87–100.
- Huang, L. (2007). «Computer simulation of heat transfer during in-package pasteurization of beef frankfurters by hot water immersion.» *Journal of Food Engineering*, 80(3), pp. 839–849.
- Incropera, F. P. y Dewitt, D. P. (2001). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Hardcover, 5th edition.^a edición.
- IRAM-20008 (2007). «Análisis sensorial. Metodología. Ensayo triangular.» *Informe técnico*, IRAM.
- Keller, T. (2008). *Under Pressure: Cooking Sous vide*. Artisan, NY, USA.
- Laakkonen, E.; Wellington, G. H. y Sherbon, J. N. (1970). «Low-temperature, long-time heating of bovine muscle 1. Changes in tenderness, water-binding capacity, pH and amount of water-soluble components.» *Journal of Food Science*, 35(2), pp. 175–177.

- Mascheroni, R. H. y Calvelo, A. (1982). «A simplified model for freezing time calculations in foods». *Journal of Food Science*, 47(4), pp. 1201–1207.
- MATLAB 7.0, Release 14 (2004). The Mathworks, Inc. USA.
- Meilgaard, M.; Civille, G. V. y Carr, B. T. (1999). *Sensory evaluation techniques*. Boca Raton. New York, 3th ed.^a edición.
- Mossel, D. A. A. y Struijk, C.B. (1991). «Public health implication of refrigerated pasteurized sous-vide foods». *International Journal of Food Microbiology*, 13(3), pp. 187–206.
- Moustakides, G.; Briassoulis, D.; Psarakis, E. y Dimas, E. (2000). «3D image acquisition and NURBS based geometry modelling of natural objects.» *Advances in Engineering Software*, 31, pp. 955–969.
- Nissen, H.; Rosnes, J.T.; Brendehaug, J. y Kleiberg, G.H. (2002). «Safety evaluation of sous vide-processed ready meals». *Letters in Applied Microbiology*, 35(5), pp. 433–438.
- Noronha, J.; Hendrickx, M. y Tobback, P. (1993). «Optimization of surface quality retention during the thermal processing of conduction heated foods using variable temperature retort profiles.» *Journal of Food Processing and Preservation*, 17, pp. 71–91.
- Noronha, J.; Van Loe, A.; Hendrickx, M. y Tobback, P. (1996). «Simultaneous optimisation of surface quality during the sterilisation of packed foods using constant and variable retort temperature profiles». *Journal of Food Engineering*, 30(3-4), pp. 283–297.
- Nyati, H. (2000). «An evaluation of the effect of storage and processing temperatures on the microbiological status of sous vide extended shelf-life products». *Food Control*, 11(6), pp. 471–476.
- Obuz, E.; Powell, T. H. y Dikeman, M. E. (2002). «Simulation of cooking cylindrical beef roasts.» *Lebensmittel - Wissenschaft Und Technology*, 35, pp. 637–644.
- Palka, K. y Daun, H. (1999). «Changes in texture, cooking losses, and myofibrillar structure of bovine M. semitendinosus during heating». *Meat Science*, 51(3), pp. 237–243.

- Peck, M. W. y Stringer, S. C. (2005). «The safety of pasteurised in-pack chilled meat products with respect to the foodborne botulism hazard». *Meat Science*, 70(3), pp. 461–475.
- Pedreschi, F.; Mery, D.; Mendoza, F. y Aguilera, J. M. (2004). «Classification of potato chips using pattern recognition.» *Journal of Food Science*, 69, pp. 264–270.
- Pornchaloempong, P.; Balaban, M.O.; Chau, K.V. y Teixeira, A.A. (2003). «Numerical simulation of conduction heating in conically shaped bodies». *Journal of Food Process Engineering*, 6, pp. 539–555.
- Purlis, E. y Salvadori, V.O. (2009a). «Bread baking as a moving boundary problem. Part 1: Mathematical modelling». *Journal of Food Engineering*, 91(3), pp. 428–433.
- Purlis, E. y Salvadori, V.O. (2009b). «Bread baking as a moving boundary problem. Part 2: Model validation and numerical simulation». *Journal of Food Engineering*, 91(3), pp. 434–442.
- Rearte, D. (2007). «Situación de la ganadería Argentina en el contexto mundial». *Programa Nacional de Carnes*.
- Rees, J.A. y Bettison, J. (1994). *Procesado térmico y envasado de alimentos*. Salinas, R..
- Resurrección, A.V.A. (2004). «Sensory aspects of consumer choices for meat and meat products». *Meat Science*, 66(1), pp. 11–20.
- Richardson, P. (2005). *Tecnologías térmicas para el procesado de los alimentos*.
- Sakin, M.; Kaymak, F. y llicali, C. (2007). «Simultaneous heat and mass transfer simulation applied to convective oven cup cake baking.» *Journal Food Engineering*, 83, pp. 463–474.
- Salvadori, V. O. y Mascheroni, R. H. (1989). «Thawning time prediction for simple shaped foods using a generalized graphical method». *International Journal of Refrigeration*, 12(4), pp. 232–236.

- Salvadori, V.O.; Reynoso, R.O.; de Michelis, A. y Mascheroni, R.H (1987). «Freezing time predictions for regular shaped foods: a simplified graphical method». *International Journal of Refrigeration*, 10(6), pp. 357–361.
- Santos, M. V.; Vampa, V.; Califano, A. y Zaritzky, N. (2010). «Numerical simulations of chilling and freezing processes applied to bakery products in irregularly 3D geometries». *Journal of Food Engineering*, 100(1), pp. 32–42.
- Sanz, P.D.; Mascheroni, R.H.; Dominguez, M. y Garcia de Vinuesa, S. (1986). «Time-temperature prediction curves of foodstuffs by means of the z-transfer function method». *International Journal of Refrigeration*, 9(2), pp. 89–92.
- SAS (2008). *Statistical Package for the Social Sciences*. Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Schellekens, M. (1996). «New research issues in sous-vide cooking». *Trends in Food Science & Technology*, 7(8), pp. 256–262.
- Sheard, M. A. y Rodger, C. (1993). «Optimum heat treatments for Sous vide cook-chill products.» En: *Sous vide cooking symposium proceedings*, pp. 118–126. Lueven, Belgium.
- Simpson, R.; Abakarov, A. y Teixeira, A. (2008). «Variable retort temperature optimization using adaptive random search techniques». *Journal of Food Control*, 19(6), pp. 1023–1032.
- Simpson, R.; Almonacid, S. y A., Teixeira (2003). «Optimization criteria for batch retort battery design and operation in food canning-plants.» *Journal of Food Process Engineering*, 25(6), pp. 515–538.
- Singh, N.; Akins, R.G. y Erickson, L.E. (1984). «Modelling heat and mass transfer during the oven roasting of meat.» *Journal of Food Process Engineering*, 7, pp. 205–220.
- Singh, R. P. y Heldman, D.R (2009). *Introduction to Food Engineering*. Hardcover, 4th edition^a edición.
- Siripon, K.; Tansakul, A. y Mittal, G. S. (2007). «Heat transfer modeling of chicken cooking in hot water». *Food Research International*, 40(7), pp. 923–930.

- SPSS, V-12 (2003). *Statistical Package for the Social Science*.
- Stumbo, C. R. (1965). *Thermobacterology in Food Processing*. Academic Press, New York.
- Szerman, N.; Gonzalez, C.B.; Sancho, A.M.; Grigioni, G.; Carduza, F. y Vaudagna, S.R. (2007). «Effect of whey protein concentrate and sodium chloride addition plus tumbling procedures on technological parameters, physical properties and visual appearance of sous vide cooked beef». *Meat Science*, 76(3), pp. 463–473.
- Szerman, N.; Gonzalez, C.B.; Sancho, A.M.; Grigioni, G.; Carduza, F. y Vaudagna, S.R. (2008). «Optimization of whey protein concentrate and sodium chloride concentrations and cooking temperature of sous vide cooked whole-muscle beef from Argentina». *Meat Science*, 79(3), pp. 557–567.
- Tandon, S. y Bhowmik, S.R. (1986). «Evaluation of thermal processing of retortable pouches filled with conduction heated foods considering their actual shapes». *Journal of Food Science*, 51(3), pp. 709–714.
- Teixeira, A. A.; Stumbo, C.R. y Zahradnik, J.W. (1975). «Experimental evaluation of mathematical and computer models for thermal process evaluation.» *J. Food Science*, 40, pp. 653–655.
- Teixeira, A.A.; Dixon, J.R.; Zahradnik, J.W. y Zinmeister, G.E. (1969). «Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction-heated foods.» *Food Technology*, 23(6), pp. 137–142.
- Tornberg, E. (2005). «Effects of heat on meat proteins - Implications on structure and quality of meat products». *Meat Science*, 70(3), pp. 493–508. ISSN 0309-1740. 50th International Congress of Meat Science and Technology,(ICoMST), 8-13 August 2004, Helsinki, Finland.
- Uyar, R. y Erdogdu, F. (2009). «Potential use of 3-dimensional scanners for food process modeling». *Journal of Food Engineering*, 93(3), pp. 337–343.
- Vandendriessche, F. (2008). «Meat products in the past, today and in the future». *Meat Science*, 78(1-2), pp. 104–113.

- Vaudagna, A.A., S.R.;and Pazos; Guidi S.M.and Sanchez, G.; Carp, D.J. y Gonzales, C. B. (2008). «Effect of salt addition on Sous vide cooked whole beef muscles from Argentina.» *Meat Science*, 79, pp. 470–482.
- Vaudagna, S. R.; Lasta, J.A. y Sanchez, G. (2005). *Ciencia y tecnologías de carnes*. capítulo 19. Nuevas tecnologías, pp. 585–625. Ed. Hui, Y.H. and Guerrero Legarreta, I. and Rosmini, M. R., Limusa S.A. México D.F..
- Vaudagna, S. R.; Sanchez, G.; Neira, E.M., M.S.and Insani; Picallo, A.B.; M.M., Gallinger y Lasta, J.A. (2002). «Sous vide cooked beef muscles:effects of low temperature-long time (LT-LT) treatments on their quality characteristics and storage stability». *International Journal of Food Science and Technology*, 37, pp. 425–441.
- Wang, G.L. y Sun, D. (2003). «Recent developments in numerical modelling of heating or cooling processes in the food industry -a review». *Trends in Food Science and Technology*, 14, pp. 408–423.
- Watier, B. (1988). «L'incidence des nouveaux procédés sur les teneurs en vitamines des aliments». *Information Diététique*, 3, pp. 33–38.
- Watier, B. y Belliot, J. P. (1991). «Vitamines et Technologie Industrielle Récente». *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 26(1), pp. 23–26.
- Zorrilla, S.E. y Singh, R.P. (2003). «Heat transfer in double-sided cooking of meat patties considering two-dimensional geometry and radial shrinkage». *Journal of Food Engineering*, 57(1), pp. 57–65.