

UTILIZACIÓN DEL MODELADO PARA MEJORAR PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES EN EL PROCESO DE COCCIÓN BAJO VACÍO DE MÚSCULOS BOVINOS

Paula Ormando^{a,b}; Sergio R Vaudagna^{a,c}; Axel E.Larreteguy^b.

^aInstituto Tecnología de Alimentos, CIA, INTA. CC77, B1708WAB Morón, Buenos Aires, Argentina, pormando@cniia.inta.gov.ar, svaudagna@cniia.inta.gov.ar, <http://www.inta.cniia.gov.ar>

^bInstituto de Tecnología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas, Universidad Argentina de la Empresa, C1073AA0, Buenos Aires, Argentina, lar@uade.edu.ar, <http://www.uade.edu.ar>

^cConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917 (C1053AAY) Buenos Aires, Argentina.

Palabras Clave: cocción bajo vacío, *Sous-vide*, modelado

Resumen. El presente trabajo involucra el modelado, la simulación computacional y la comparación con resultados experimentales del fenómeno de transferencia de calor durante el proceso de cocción *Sous-vide* (bajo vacío) del músculo Semitendinosus bovino (vulgo peceto). El objetivo último de este desarrollo es contar con herramientas de predicción computacional y procedimientos experimentales confiables para encarar en el futuro inmediato estudios de optimización de la calidad del músculo cocido en base a diferentes estrategias de ciclado térmico durante el proceso de cocción (tecnologías VRT – variable retort temperatura).

Como primera etapa se desarrolló, por un lado, un modelo simple de Diferencias Finitas del proceso térmico, aproximando la geometría cónica del músculo a un cilindro infinito. Por otro lado, se realizaron mediciones experimentales de cocción *Sous-vide* de músculos con procedimientos estándar estática en autoclave.

Los resultados obtenidos muestran discrepancias temporales en la evolución de temperaturas, más allá de las atribuibles a la relativa simpleza del modelo numérico utilizado. Estas discrepancias son inaceptables en el presente proyecto, dado el objetivo final de encarar la optimización de procesos VRT.

Descartando hipótesis, se llegó finalmente a dudar del propio proceso de medición de temperaturas. Se realizó entonces un modelado por Elementos Finitos de la propia termocupla y del músculo circundante, utilizando ABAQUS®. Se encontró que las discrepancias provienen de la enorme diferencia entre las propiedades térmicas del músculo y de las termocuplas (Cu-Const). Las mismas, adecuadas para ensayos estándar, aparecen como inadecuadas para procesos VRT.

Como trabajos futuros se destacan entonces la búsqueda de mejores opciones experimentales que logren precisión temporal en el seguimiento de la temperatura, y el uso extensivo de Elementos Finitos, para capturar el efecto de la geometría tridimensional del músculo en estudio.

1. INTRODUCCION

La conservación de los alimentos a través de la cocción es uno de los métodos tradicionales más difundidos para eliminar microorganismos patógenos y prevenir posibles brotes de ETAs (enfermedades de transmisión alimentarias). Un efectivo proceso térmico efectivo implica el control exhaustivo de potenciales microorganismos patógenos durante la cocción. El tiempo y temperatura al que el proceso deberá ser operado dependerá entonces de la resistencia térmica del microorganismo en cuestión.

Una de las tecnologías de cocción desarrolladas en los últimos años es el sistema de cocción bajo vacío de cocción (*Sous- Vide* en francés, ver por ejemplo Vaudagna 2002), que describe a los productos frescos o parcialmente cocidos, crudos, dispuestos en una bandeja semirígida o bolsa de plástico resistente, a los que se aplica vacío y una posterior cocción lenta y a temperaturas medias (65- 95°C). Una vez realizada esta operación se almacena el producto en frío hasta el momento del consumo. Como ventajas comparativas se mencionan la obtención de atributos sensoriales realzados (particularmente sabor y aroma), la mejora de la textura, la jugosidad y la extensión de la vida útil de los productos. Esta tecnología constituye uno de los esfuerzos más recientes en el desarrollo de sistemas de cocción, posibilitando a las empresas de “foodservices” industrializar la producción de comidas, dado que permitió separar en el tiempo y en el espacio las etapas de preparación y cocción de comidas de las de consumo.

Si bien el envasado al vacío aporta las ventajas antes señaladas, presenta el inconveniente de incrementar el riesgo microbiológico por patógenos anaerobios ó microaerófilos, debido a que genera condiciones favorables para su desarrollo, como la reducción de la presión parcial de oxígeno y la ausencia de microflora aerobia competitiva (Rhodehamel,1992; FAIR, 2001). Aquellos patógenos que por su elevada resistencia térmica y por su naturaleza psicrofílica son considerados de relevancia son *Listeria monocytogenes* y *Clostridium botulinum* no proteolítico (tipos E, B y F). A nivel internacional se recomiendan protocolos de cocción-pasteurización orientados a lograr la inactivación de esos microorganismos (FAIR, 1999). A su vez, Francia ha utilizado tradicionalmente el microorganismo *Streptococcus faecalis* (perteneciente a la clasificación dentro de los estreptococos grupo D) como indicador y base del diseño de los tratamientos de cocción-pasteurización (Church I. J and Parsons A, 1993;FAIR, 1997).

Recientemente, tomando como referencia ese microorganismo, la Comisión de la Unión Europea mediante la Decisión 432/2005 (Official Journal of the European Union, 2005) ha establecido que Argentina, entre otros países, puede exportar carne bovina cocida a la Unión Europea 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 punto de mínimo tratamiento del producto (generalmente el centro geométrico del mismo) por un lapso que garantice al menos un valor de pasteurización VP^{10}_{70} de 40 min, donde el valor de pasteurización sugerido o requerido VP^z_{Tref} indica el tiempo de calentamiento isotérmico (a la temperatura de referencia T_{ref}) necesario para alcanzar un número determinado de reducciones decimales del microorganismo indicador (caracterizado por el parámetro z). Este valor VP de pasteurización del proceso se calcula conociendo la curva de penetración de calor, es decir, la evolución temporal de la temperatura del punto de mínimo tratamiento térmico, aplicando la relación siguiente:

$$VP_{T_{ref}}^z(t) = \int_0^t 10^{\frac{(T(\tau) - T_{ref})}{z}} d\tau.$$

Es bien sabido que el modelado constituye una herramienta importante para reducir tiempo y costos de experimentación, aunque siempre debe incluir una etapa de validación experimental. En el caso que se describe, el modelado de la transferencia de calor tiene la finalidad de predecir la curva de penetración de calor en el punto de mínimo tratamiento de la pieza considerada (centro geométrico) y evaluar posteriormente el VP_{70}^{10} alcanzado, como así también la optimización del proceso antes descrito.

Experimentos realizados por los autores en piezas cárnicas bajo tecnología *Sous-vide* mostraron discrepancias entre modelos computacionales y resultados experimentales, y entre resultados experimentales entre sí, en el seguimiento de las curvas de penetración de calor, dificultando por ende el seguimiento del proceso de cocción.

En el presente trabajo se describe un ensayo experimental de cocción *Sous-vide* de músculos *Semitendinosus* bovino (peceto), se compara la evolución experimental de la temperatura en el centro geométrico de la pieza con la obtenida con un modelado sencillo por Diferencias Finitas, y finalmente se explican las discrepancias encontradas, complementando la explicación con un modelado más detallado del propio proceso de medición utilizando Elementos Finitos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Inserción de Termocuplas Axiales y Radiales

Todos los músculos *Semitendinosus* bovino fueron diseccionados con 48 hs post faena de un frigorífico local que satisfacen las exigencias requeridas en torno a las Buenas Prácticas de Manufactura (BMP) y el sistema de Análisis de Riesgos y Puntos Críticos de Control (HACCP). Luego de eliminar la grasa superficial se envasaron al vacío (Cryovac CN510, Sealed Air Co., Buenos Aires, Argentina), y se almacenaron por 72 hs a $1,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$ hasta su procesamiento. Los músculos crudos desgrasados arrojaron un peso promedio de 1600 ± 125 g y un pH promedio de 5.7 ± 0.2 .

Los músculos se instrumentaron con termocuplas tipo T de Cobre-Constantan (TTT24-Omega Engineering Inc., Stamford, CT) destinadas a medir la evolución de temperatura en el centro geométrico del mismo. En algunos de ellos se colocaron las termocuplas en forma radial, y en otros en forma axial. En todos los casos, se incorporó un dispositivo (stuffing-box) que permite el pasaje de la termocupla a través de la bolsa plástica manteniendo la estanqueidad de la misma y evitando además pérdida de vacío..

Una vez insertada la termocupla en el músculo se envasan al vacío el conjunto; la bolsa contenedora es sellada en un extremo mientras que el otro lado, cuya forma es redondeada y sellada de fábrica, es apto para colocar la parte posterior del músculo (cola). Este envasado bajo vacío, implica que el envase multilaminado se ajuste en forma completa y tome la dimensión cilíndrica del músculo. El sellado impide que los jugos se escapen hacia la cámara del autoclave durante la cocción, obteniéndose como producto final un músculo cocido de un menor volumen, rodeado de jugo en su envase contenedor (ver Figuras 1 y 2).



Figura 1: Músculo insertado con Termocupla Axial.



Figura 2: Músculo insertado con Termocupla Radial

2.2 Procesamiento Térmico de Músculos envasados bajo sistema *Sous-vide*.

Todos los músculos envasados al vacío en bolsas cook-in fueron cocinados-pasteurizados en un autoclave con ducha de agua (Microflow Barriquand, Roanne, France) en batch a 75°C (el equipo se operó en forma estática), en canastos que constan de separadores de plástico resistentes al calor que sirven de soporte y de división entre niveles de las muestras.

Debido a que las piezas más grandes implican un mayor tiempo de tratamiento debido al recorrido que deberá realizar el calor hasta llegar al centro, las muestras de mayor tamaño se colocan en el nivel superior, recibiendo la mayor carga térmica aportada por el agua del autoclave.

La evolución de la temperatura se siguió en el punto de mínimo tratamiento (PMT, centro

térmico) en músculos para el caso axial y radial, además de registrar la temperatura en el interior de la cámara del autoclave, utilizando termocuplas tipo T. Los datos fueron almacenados con un multímetro digital Hydra 2625A data logger (John Fluke Mfg. Co., Inc., Everett, USA), registrándose los mismos cada 30 segundos.

Inmediatamente después del tratamiento térmico, las muestras fueron sumergidas en un baño de agua-hielo para disminuir su temperatura y luego fueron almacenados a $1,5 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ por 18 hs hasta su posterior estudio.

La evolución de temperaturas del autoclave y del centro geométrico de dosr de músculos típicos medidos se pueden ver en la Figura 3. Se destaca la diferencia en la velocidad de respuesta inicial (primeros 30 minutos) entre las mediciones de las termocuplas axial y radial la prematura respuesta de la radial a la bajada de temperatura del autoclave.

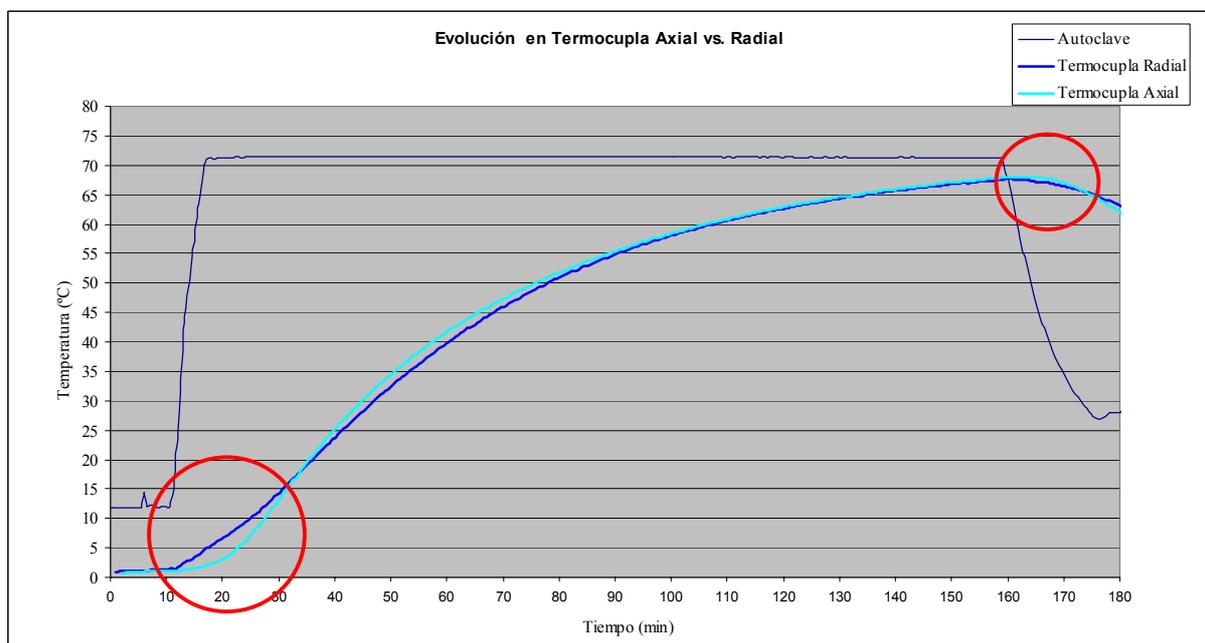


Figura 3: Evolución temporal de la temperatura en el autoclave y en el PMT de dos músculos, una medida con termocupla axial, y la otra con termocupla radial.

3 MODELADO MATEMÁTICO Y NUMÉRICO.

3.1 Diferencias Finitas

Con el objeto de comprender mejor el proceso de cocción y los resultados experimentales obtenidos, se procedió a realizar un modelado numérico simple del proceso.

La ecuación de transmisión de calor en estado transitorio para un material con conductividad térmica constante y uniforme es:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \dot{Q}''' \quad (1)$$

siendo

T: Temperatura (K)

t : Tiempo (min)
 C_p : Calor específico de la carne(J/Kg K)
 ρ : Densidad (kg/m³)
k: Conductividad térmica(W/mK)
 Q''' : Generación de calor (W/m³)

Dividiendo por ρC_p la (1) queda:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \delta''' \quad (2)$$

donde $\delta''' = \frac{Q'''}{\rho C_p}$ y $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$, siendo α el coeficiente de difusividad térmica de la carne (m²/s)

Agregando las condiciones iniciales y de borde, eliminando la generación de calor, y asumiendo simetría de revolución (cilindro infinito) el problema matemático queda expresado de la siguiente manera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \delta''' \\ \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \\ T(R,t) = T_a \\ T(r,0) = T_0 \end{array} \right. \quad (3)$$

dónde T_a es la temperatura de la cámara del autoclave durante el procesamiento térmico y T_0 corresponde a la temperatura inicial de la carne.

A partir de la selección de una de las curvas de penetración de calor registrada durante el tratamiento experimental de cocción-pasteurización de músculos *Semitendinosus* bovino, se modeló la curva de penetración de calor por diferencias finitas, cuyo resultado se muestra en la Figura 4, junto con la temperatura de la autoclave.

Para el modelado por diferencias finitas se utilizaron 14 intervalos (15 nodos equiespaciados) en la dirección radial, y un paso temporal igual al experimental, es decir, 30 segundos.

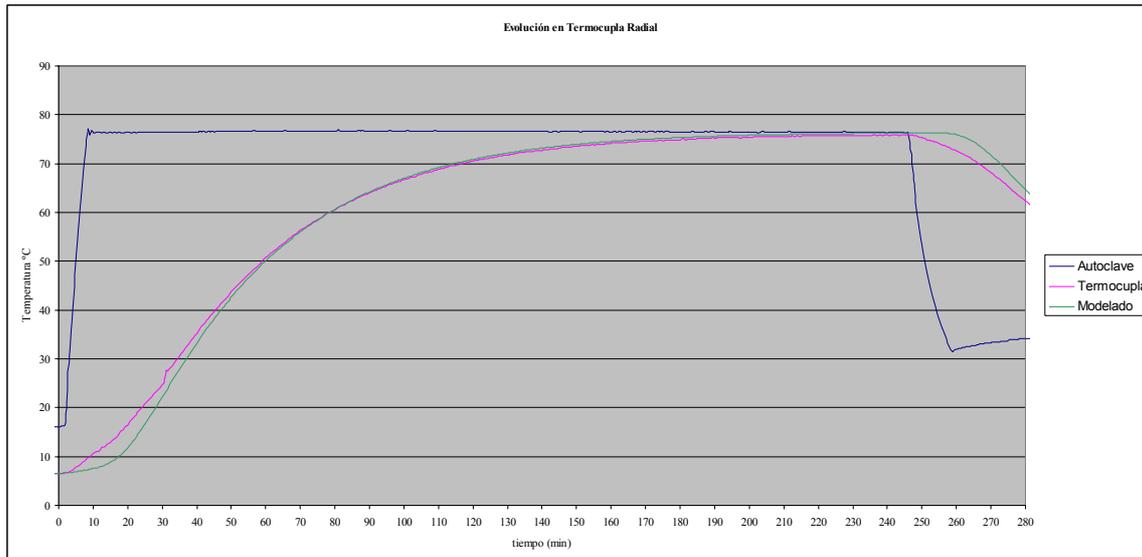


Figura 4 : Modelado de evolución de temperatura en Termocupla Radial.

La curva del modelado obtenida presenta ciertas diferencias con respecto a la curva experimental radial, asemejándose más a la forma que tenía la medición con termocupla axial. Se observa el prematuro ascenso de la medición experimental en la etapa de calentamiento y un prematuro descenso en la de enfriamiento, mientras que el modelo se retrasa en ambos casos, correctamente, unos 30 minutos en registrar cambios apreciables de temperatura en el centro.

3.2 Elementos Finitos

Para explicar mejor la diferencia entre los tiempos de reacción de cambios de temperatura detectados entre los resultados experimentales y el modelo numérico, se decidió explorar la posibilidad, reportada en la literatura en papers tan tempranos como (Ecklund, 1949), de que la propia termocupla actuara como conductor térmico preferencial para transmitir las variaciones de temperatura del autoclave, y que entonces, por así decirlo, se estuviera “midiendo a sí misma”. A pesar de que el área de transferencia de calor a lo largo de la termocupla es muy reducida, el hecho de que la conductividad térmica del cobre sea aproximadamente 1000 veces mayor que la de la carne, hace plausible este efecto de distorsión de las mediciones experimentales (conductividad térmica del cobre 401 W/mK y de la carne 0.456 W/mK).

Se optó por un modelo de elementos finitos axisimétrico con el objetivo de encontrar una respuesta más detallada que explicara la discrepancia entre el modelado y las mediciones experimentales. Para tal fin se modeló una sección de carne en forma axisimétrica, con la inserción de la termocupla tipo T (Cobre- Constantan). Solamente se tuvo en cuenta el cobre como parte de la termocupla debido a su preponderancia en la conductividad térmica.

Se modeló un bloque cilíndrico de músculo rodeando la termocupla, de 100 mm de altura por 50mm de radio, y dónde la termocupla, de radio 0.5mm se inserta desde el extremo superior hasta el centro del cilindro.

Se realizó una simulación de 40000 segundos, con una condición de borde de 70°C en las tapas superior e inferior de la sección de carne, asumiendo transferencia perfecta de calor

entre la carne y el agua del autoclave. Se utilizó una malla estructurada regular de elementos rectangulares convenientemente refinada en las zonas donde se esperaban cambios fuertes de gradiente térmico.

En las figuras siguientes se muestran distintos momentos de la evolución de temperaturas en el interior del cuerpo. Se desprende claramente de las mismas que la evolución de temperatura en el centro térmico es alterada por el dispositivo de medición. A nivel de bibliografía consultada, la medición de curvas de penetración de calor en alimentos se realiza efectivamente con termocuplas tipo T (, [Alstrand and Ecklund 1952](#), [Ecklund 1956](#), [Bee and Park 1977](#)). Es posible sin embargo que en esos casos haya un aislamiento del cable de termocupla en la zona fuera de la carne, de tal manera que el ambiente de la cámara de la autoclave no influya en la correcta medición del centro cárnico, o que simplemente el seguimiento preciso de la temperatura no sea tan crítico como en los procesos VRT que intentamos encarar en lo inmediato.

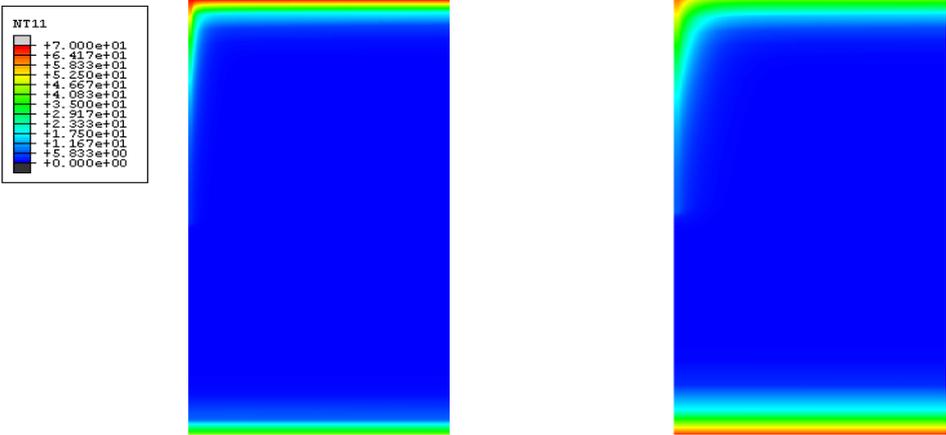


Figura 5.1 y 5.2 : Evolución a los 60 y 120 s

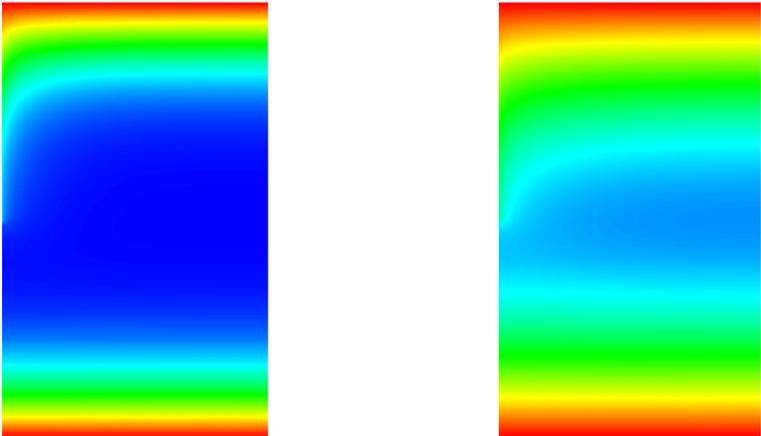


Figura 5.3 y 5.4 Evolución a los 780 y 2820 s

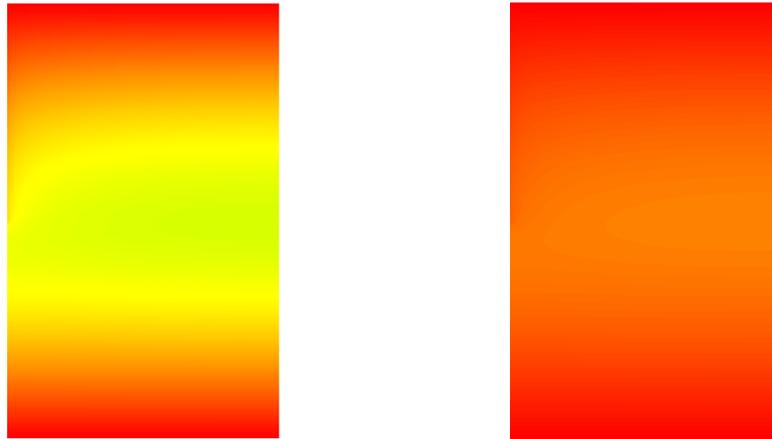


Figura 5.5 y 5.6 Evolución a los 10740 y 16740 s

4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Con el objetivo de profundizar el análisis de la influencia de las diferentes propiedades térmicas entre el producto alimenticio y el cobre de la termocupla, se dispuso la realización de un análisis paramétrico variando tanto el k (conductividad térmica, W/m²K) como el α (difusividad térmica, m²/s) del alimento. Es de destacar que la mayoría de los productos alimenticios poseen conductividades térmicas en el rango de 0.3 a 0.7 W/m²K, mientras que respecto de las difusividades térmicas los valores extraídos de bibliografía parten desde de $1 \cdot 10^{-7}$ hasta un máximo de $2 \cdot 10^{-7}$ m²/s y las densidades entre 700 y 1000 kg/m³. Las propiedades térmicas del Cobre, por su parte, obtenidas de la bibliografía, son las siguientes: $k : 401 \text{ w/m}^2\text{K}$, $\rho:8933 \text{ kg/m}^3$, $C_p : 385 \text{ J/kgK}$, $\alpha : 117 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$.

Del análisis dimensional del problema incluyendo la presencia de la termocupla, se obtiene que, más allá de los parámetros adimensionales que provienen de la definición de la geometría (relaciones de tamaño) y de aquellos que provienen de las condiciones de borde, el problema sólo depende de la relación entre las conductividades térmicas del material de la termocupla y del producto alimenticio, siempre que se adimensionalize el tiempo utilizando el número de Fourier.

Se simularon entonces por Elementos Finitos procesos de medición con termocuplas T. Se consideraron 9 casos, utilizando valores mínimo, medio y máximo tanto de k como de α del alimento, simulando en cada caso considerando la termocupla insertada.

En los gráficos siguientes se pueden observar las evoluciones de la temperatura adimensional

$$T^* = (T - T_0) / (T_a - T_0) \quad (4)$$

siendo T temperatura en el nodo, T_0 : temperatura inicial de O°C y T_a temperatura de autoclave, en función del tiempo adimensionalizado, o Fourier, dado por

$$Fo = (\alpha \cdot t) / l^2 \quad (5)$$

dónde l es una dimensión característica (en este caso 50mm). En todos los casos se utilizó el α correspondiente al alimento para calcular el Fourier

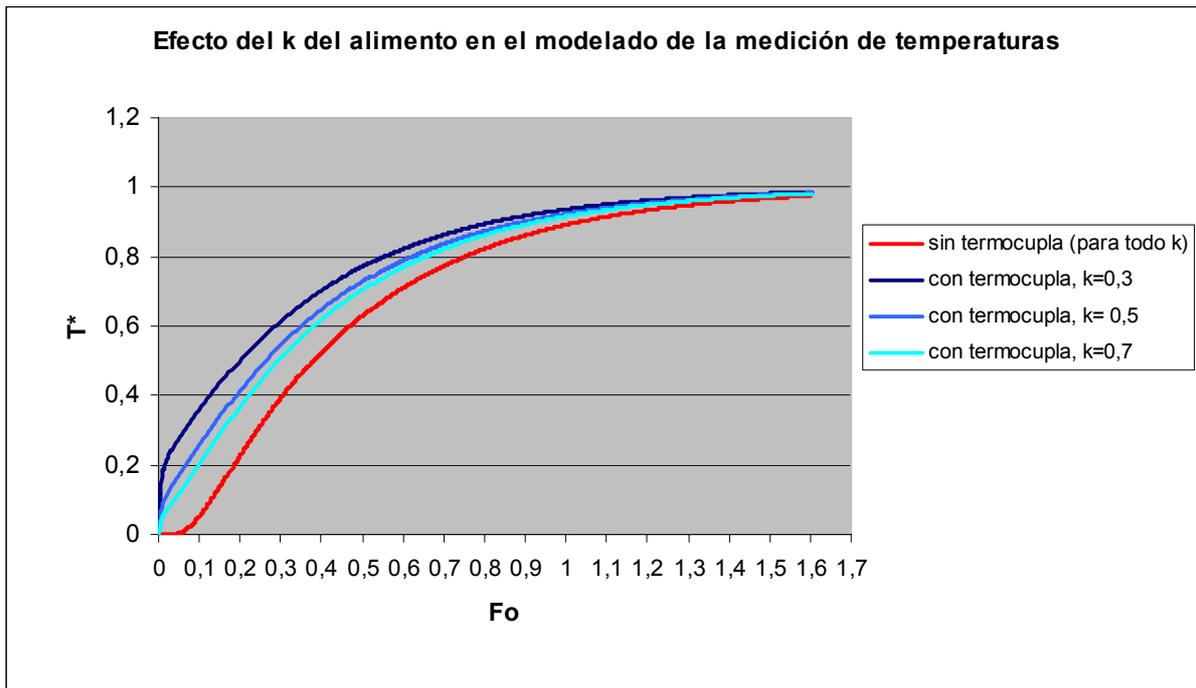


Figura 6: Evolución de la temperatura adimensional en el centro del alimento en función del tiempo adimensional (Fo). Los casos distintos se reducen a tres debido justamente a esta elección del tiempo adimensional.

Para indicar con un solo número la influencia que produce el efecto de la conductividad térmica y la difusividad respecto de los alimentos al ser medidos con un instrumento cuyas propiedades difieren en grandes magnitudes, se calculó la diferencia entre el área bajo cada curva y la respectiva en el caso patrón (sin termocupla), obteniéndose los siguientes errores integrales relativos:

Diferencias de Areas			
Alpha	k (W/m°C)		
	0,3	0,5	0,7
1	0,173620831	0,119371111	0,089687351
1,5	0,173764027	0,119071704	0,089691714
2	0,173899953	0,119111029	0,089778069

Tabla 1 : Error integral relativo para cada caso, medido como área diferencial sobre área del caso sin termocupla

Los nueve casos parecen reducirse a sólo tres al observar los valores de la tabla, pero eso se debe a que se presentan los resultados en función del Fo de cada caso, lo que ya tiene en cuenta la variación de difusividad.

5. CONCLUSIONES

Se han mostrado resultados experimentales y numéricos preliminares, en el marco de un proyecto orientado a investigar técnicas de ciclado térmico (Variable Retort Temperature, VRT) para la cocción de alimentos bajo la tecnología *Sous-vide*.

El modelado matemático y numérico aplicado a la predicción de la transferencia de calor en músculos *Semitendinosus* bovino envasados bajo vacío con posterior cocción lenta facilitó la interpretación de la respuesta térmica de la carne y permitió analizar problemas de los ensayos experimentales.

Se encontraron discrepancias entre los resultados de modelos simples de Diferencias Finitas y de experimentos en la evolución de la temperatura del PMT (punto de menor tratamiento) en procesos de cocción *Sous-vide* en autoclave, para ciclos simples de calentamiento y enfriamiento único. La causa más importante de dichas discrepancias resultó ser la transferencia térmica a través de la propia termocupla, que produce distorsiones en el campo de temperaturas que se desea medir.

A manera de confirmación y cuantificación de estas discrepancias, se realizó un modelado por Elementos Finitos del propio proceso de medición, incluyendo la conducción térmica en la termocupla. Con este modelo, se realizó un análisis de sensibilidad a la difusividad y la conductividad térmica del material a procesar, las cuales fueron variadas entre los extremos típicos encontrados en los alimentos comunes.

Si bien varias referencias a fenómenos como el reportado en este trabajo, y se proponen soluciones y correcciones de diferente naturaleza, es necesario continuar con este trabajo en profundidad ya que lo que se busca es el modelado preciso de procesos VRT, con ciclados de temperatura mucho más elaborados, y es esencial el seguimiento correcto de las temperaturas en el interior de los alimentos a procesar.

Como próximos trabajos de investigación se deberán implementar mejoras al sistema de medición que procure un registro verdadero de la evolución de temperatura, y luego se comenzarán a explorar distintas estrategias de ciclado de temperatura del autoclave para lograr mayor uniformidad especial en el valor de pasteurización y por consiguiente mayor uniformidad en la calidad final del alimento.

REFERENCIAS

- Alstrand D. and Ecklund O. The mechanics and interpretation of heat penetration tests in canned foods. *Food Technology*.6(5):185,1952.
- Bee G. and Park D. Heat penetration measurement for thermal process design Over view .Outstanding Symposia in Food Science and Technology Thermal Processing of Canned Foods.*Food Technology*, 1977
- Church I. J and Parsons A. L. Review: Sous vide cook-chill technology. *Int. Jour. Food Sci. and Technol.* 28:563-574. ,1993.
- Ecklund O. Apparatus for measurement of the rate of heat penetration in canned foods. *Food Technology*. v3 321,1949.
- Ecklund O. Correction factors for heat penetration thermocouples. *Food Technology* v10(1):43,1956.

FAIR CT96-1020. Harmonization of Safety Criteria for Minimally Processed Foods. Inventory Report FAIR. pp. 30,1997.

FAIR CT96-1020 Harmonization of Safety Criteria for Minimally Processed Foods: Rational and Harmonization Report. FAIR Concerted Action FAIR CT96-1020. Disponible en (www.alma.kuleuven.ac.be).1999.

Official Journal of the European Union. Reflexiones sobre la investigación pública en el sector agroalimentario. Grupo CEO SA., 2005.

Rhodehamel E. FDA's concerns with sous vide processing. *Food Technology* 46 (11) 73-76, 1992.

Rybca-Rodgers S Improvement of food safety design of cook-chill foods. *Food Research International* 34: 449-455, 2001.

Vaudagna S., Sánchez G., Neira M., Insani E., Picallo A., Gallinger M. and Lasta J. *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, 425-441, 2002.