

# Evaluación de tratamientos térmicos en una planta de producción de alimentos

Eduardo Hernández-Ramos<sup>1\*</sup>, Mayda Moya-Guerra<sup>2</sup>, José A. Suárez-Morales<sup>3</sup>

1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca).

Via Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

\* eduardo.hernandez@icidca.azcuba.cu

2. Empresa productora de alimentos Prodal.

27 de Nov. No. 9 e/ Benito Anido y Litoral. Regla. La Habana, Cuba.

3. Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría.

Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba

---

## RESUMEN

La empresa Prodal produce y comercializa una amplia variedad de productos alimenticios de pollo, pavo y pescado. Los productos son agrupados en conformados, embutidos y congelados. En la Unidad Empresarial de Base de Embutidos se puso en marcha en diciembre de 2015 una planta de producción de salchichas envasadas al vacío, única de su tipo en Cuba. Actualmente se desconoce si otros tratamientos térmicos en las operaciones de horneado y pasteurización diferentes a los que se están aplicando, garantizarían la obtención de un producto inocuo, aceptable sensorial y nutricionalmente, que sea comercializable y competitivo en el mercado. Por lo que este trabajo tuvo como objetivo general evaluar tratamientos térmicos, para lo cual se realizó un diseño factorial de experimentos que combinó los tratamientos de ambas operaciones: tres en el horno (TMO 4, TMO 5 y H1) y dos en la pasteurización (agua de calentamiento a 80 y 85 °C). Los productos obtenidos fueron evaluados tomando en consideración criterios sensoriales, nutritivos y económicos. En la operación de horneado fue seleccionado como mejor tratamiento el TMO 5, que consiste en cocción con vapor saturado y temperatura de la cámara 80 °C durante 40 minutos. En la operación de pasteurización el mejor tratamiento fue la pasteurización en agua a 85 °C durante 26 minutos. Este trabajo le brinda a la empresa una herramienta para lograr un producto con mayor calidad sensorial e inocuidad y aumentar la competitividad en el mercado.

**Palabras clave:** tratamientos térmicos, inocuo, pasteurización, horneado.

---

## ABSTRACT

Prodal Enterprise produces and commercializes a wide variety of food products made out of chicken, turkey and fish. These products are divided in three types "Shaped", "Sausages" and "Frozen". On December, 2015 the Sausages Production Unit (SPU) set in motion a Vacuum Packed Plant for Sausages, which is unique in Cuba. Nowadays it is unknown if thermal treatment for baking and pasteurization, different from the ones actually applied, would guaranteed an innocuous product with good nutritional and tasteful properties, besides being competitive in market. For this reason, this research had the main objective of evaluating thermal treatment through an experimental design that combined treatments of both operations: Three processes on the oven (TMO 4, TMO 5 and H1) and two on the pasteurization (Heating Water up to 80 °C and 85 °C). Final products were evaluated according to sensorial, nutritive and economic criteria. During baking operation, the TMO 5 was selected as the best treatment, which consists in baking with saturated steam at 80 °C on the chamber for 40 minutes. Throughout the pasteurization procedure the best treatment was water pasteurization at 85 °C for 20 minutes. This research offers the SPU a tool to achieve products having a more sensorial and innocuous quality, and also to increase competitiveness in the international market.

**Key words:** heat treatments, innocuous, pasteurization, baking.

## INTRODUCCIÓN

La empresa Prodal, situada en el municipio Regla, La Habana, tiene como objeto social la producción de alimentos elaborados a partir de materias primas cárnicas de aves, pescado y mariscos, mezclados con ingredientes alimenticios. Posee una variada gama de productos embutidos, conformados, frescos y congelados, elaborados en cuatro Unidades Empresariales de Base productivas (UEB). Estos productos son distribuidos en una extensa red de sectores de mercado, tanto en moneda nacional como convertible.

En la UEB productora de embutidos se elaboran jamonadas, chorizos, mortadellas, picadillos, jamones y salchichas. Para la elaboración de salchichas se construyó una planta con capacidad superior a las 15 toneladas diarias para satisfacer la demanda de este producto en el país y sustituir las importaciones del mismo desde países como Canadá y Brasil. La principal diferencia de este producto respecto a los similares importados es que se comercializa fresco, pues se hornea, pasteuriza y refrigera, a diferencia de los importados, los cuales son por lo general congelados.

En la planta de salchicha, los especialistas tienen la tarea de obtener un producto con un valor nutricional, sensorial e inocuidad que obtenga la aceptación del pueblo y que pueda competir con otros productos similares existentes en el mercado, por lo que es fundamental definir en cada etapa los parámetros de operación que garanticen la mayor calidad del producto.

Las operaciones tecnológicas que determinan las características antes mencionadas son la cocción y la pasteurización. El incremento de la temperatura en la cocción permite la gelificación de los almidones y coagulación de las proteínas, procesos esenciales para la textura del producto y el mejoramiento de la digestibilidad, y también propicia el desarrollo del color, aroma, sabor e inocuidad del producto al eliminarse o reducirse la carga microbiana presente en las materias primas (1).

En la etapa de pasteurización el principal objetivo es garantizar la inocuidad del producto, pues se eliminan o reducen hasta valores seguros los microorganismos que pudieron contaminar al producto en las operaciones de pelado y envase posteriores a la cocción, por lo cual es, además, muy importante el cumplimiento de las normas de higiene y de los parámetros de operación en los puntos críticos.

En ambas operaciones es necesario aplicar conceptos y correlaciones de operaciones unitarias que son usados en la industria azucarera para controlar, diseñar y diagnosticar, entre otras funciones. El azúcar y algunos de sus derivados son alimentos, por lo que muchos temas tratados en este artículo como la

inocuidad tienen una estrecha relación con la industria azucarera de la actualidad.

Dada la importancia de estas etapas en la producción de salchichas, este estudio se enfocará en evaluar tratamientos térmicos que garanticen la inocuidad de los productos y que a su vez permitan obtener un producto con un valor nutricional y sensorial adecuados para aumentar la competitividad del mismo en el mercado nacional.

## MATERIALES y MÉTODOS

Se empleó masa de perro caliente elaborada a partir de MDM canadiense marca Olymel. Para las pruebas de pasteurización se utilizaron paquetes de productos elaborados en la planta hasta la operación de envase manual.

La simulación de la operación de horneado se realizó en un horno de la planta de desarrollo, marca Gourmet y modelo 1011. Este horno permite realizar ciclos de cocción con aire caliente a diferentes humedades, cocción a vapor con diferentes porcentajes de saturación y combinaciones de estos medios de calentamiento. El vapor es producido en el horno a partir de una atomización de agua que se evapora en la cámara.

La pasteurización fue realizada en una marmitta, en el interior de la chaqueta hay una resistencia eléctrica sumergida en agua. El modelo es MBM BRESCELLO, producido en Italia. La presión máxima en el interior de la chaqueta es 50 kPa. El volumen de agua empleado fue 0,04 m<sup>3</sup>.

En ambas operaciones se empleó un termómetro de marca Testo, que mide en un intervalo de temperatura de -40 a 200 °C a través de una varilla de acero inoxidable con una precisión de 0,5 °C. También fue empleado un equipo de procedencia italiana y marca FOODSCAN para determinación de porcentajes de sales, proteínas, grasas, humedad y colágeno.

### Propuestas de tratamientos térmicos en la operación de horneado

Se realizó un análisis preliminar para el cual se tomaron como referencias el tratamiento que actualmente se realiza en la planta, criterios para productos horneados abordados en la literatura (2) y el ciclo recomendado por el proveedor de las fundas (3). En cada corrida experimental se hornearon aproximadamente 3 kg de producto, que fueron tomados de la planta.

Las salchichas crudas fueron trasladadas hasta la planta experimental y refrigeradas para mantener la temperatura en el intervalo de 15 a 20°C hasta que el horno estuvo listo, basado en el criterio de que la temperatura al comenzar la cocción no debe

ser muy baja para propiciar un buen desarrollo del color durante el tratamiento térmico (2), además de estandarizar el proceso para garantizar siempre similares niveles de pasteurización. Previamente el producto fue pesado para poder determinar los porcentajes de mermas durante el tratamiento.

En la segunda etapa del estudio se realizaron modificaciones surgidas a partir del análisis de los resultados del estudio inicial. El tiempo de duración del tratamiento no fue fijado de antemano. Se calculó el valor de pasteurización según se iba realizando el tratamiento y se interrumpió este cuando se alcanzó el valor  $P_0$  requerido. Este enfoque es comúnmente empleado en estudios de penetración de calor. Se definieron los siguientes tres tratamientos, en los cuales no se fijó la duración de la etapa de cocción con vapor:

- Tratamiento 6 (TMO-4): secado 20 minutos con aire caliente a 65°C, 50% de humedad, cocción con vapor con 100% de saturación y temperatura de la cámara 78 °C.
- Tratamiento 7 (H1): se mantuvo el tratamiento propuesto por el proveedor. Secado con aire caliente a 60 °C y 50 % de humedad durante 15 minutos, cocción con vapor con 80 % de saturación y temperatura de la cámara 80 °C.
- Tratamiento 8 (TMO-5): cocción a vapor con 100 % de saturación y temperatura de la cámara 76 °C.

Una vez definidos los tratamientos se procedió a realizar la segunda etapa del estudio. Se hicieron tres réplicas de cada tratamiento y en cada una de ellas se midió cada un minuto la temperatura en el centro térmico de una salchicha a la cual se le acopló un termómetro Testo 926. A su vez se registró la temperatura de la cámara en igual intervalo de tiempo, valor que se obtuvo de los registros que el equipo muestra en la pantalla cada 10 segundos. Para cada valor de temperatura se calculó la letalidad y el valor de pasteurización acumulado mediante el método de Patasnik (2,4). De esta manera se pudo interrumpir cada ciclo una vez que se hubo alcanzado el valor de pasteurización deseado, tomando como temperatura de referencia 70 °C.

Se realizó la determinación de porcentajes de proteínas, grasas, sales, colágeno y humedad para determinar si se producían afectaciones al producto.

### **Propuestas de tratamientos térmicos en la operación de pasteurización**

Se definieron tres tratamientos de pasteurización a 80, 85 y 90 °C, con el objetivo de reducir el tiempo actual de duración de la operación. Para calcular el valor de pasteurización se hizo necesario conocer la evolución de la temperatura cada un minuto, pero no fue posible determinarla acoplando un termómetro al producto, debido a que eso implicaba perforar

el paquete y permitir la entrada de agua y aire, lo que falsearía los valores de temperatura. Por lo tanto se decidió utilizar un método indirecto, utilizando los coeficientes convectivos de la película existente entre el medio de calentamiento y la superficie del paquete.

Los coeficientes se emplearon para simular los valores de temperaturas en el centro térmico del paquete, mediante la conducción en estado no estacionario (5). De esta manera fue posible calcular los valores de letalidad y pasteurización.

### **Cálculo del coeficiente de convección**

Se evaluó el número de Rayleigh a partir de las propiedades físicas de la película de líquido, evaluadas para la temperatura media entre la temperatura del agua y la superficie del paquete (6). Se calculó el número de Nusselt mediante las ecuaciones correspondientes a placa vertical y placas horizontales inferior y superior. Se emplearon las ecuaciones de esta manera debido a que cuatros lados del paquete tienen una posición vertical y dos horizontal. La superficie horizontal superior correspondió en casi todos los casos a la superficie transparente del contenedor y la inferior a la litografiada. Los paquetes fueron introducidos en la marmita y la mayoría adoptó la posición descrita anteriormente. Finalmente fueron calculados los coeficientes.

Debido a que la conducción en el paquete se produce en estado no estacionario, la temperatura de la superficie va aumentando y por ende la temperatura de la película de líquido en la superficie del paquete. Por esta razón el coeficiente de convección varía durante el tratamiento. Como solución se calculó el coeficiente tomando como referencia temperaturas de la superficie de 13, 23, 33, 43, 53, 63 y 73 °C, intervalo en el que debe variar la temperatura. Esto se realizó con el objetivo de determinar la variabilidad del coeficiente y evaluar si el promedio en este intervalo es un buen estimador del coeficiente de convección, a partir de que los valores calculados de temperatura sean similares o no a los valores medidos experimentalmente.

### **Validación experimental del coeficiente de convección y determinación del centro térmico**

Para validar los resultados obtenidos se realizó un experimento que consistió en pasteurizar 10 paquetes de manera individual durante 10 minutos a las temperaturas estudiadas de 80, 85 y 90 °C. Se midió la temperatura inicial a un paquete, después de haberlos mantenido en agua a temperatura ambiente hasta que la temperatura del agua se estabilizara, pues la temperatura de los paquetes antes de pasteurizarse es por lo general inferior a 15 °C. El objetivo de este proceder fue poder estimar a través de un paquete la temperatura inicial.

Transcurridos 10 minutos se le midió a cada paquete la temperatura en el centro geométrico y en el centro de la salchicha superior e inferior del centro del paquete. Esto permitió validar los coeficientes calculados y determinar a su vez la ubicación del centro térmico, el cual coincidió con el centro geométrico del paquete.

Fue necesario calcular las propiedades físicas, capacidad térmica específica y conductividad térmica. La densidad del paquete fue calculada mediante un experimento de desplazamiento de volumen de agua.

Para la determinación del centro térmico se realizó una prueba de comparación de medias de las temperaturas medidas al cabo de 10 minutos en las posiciones superior, centro e inferior de cada paquete, para un 95 % de nivel de confianza.

Se realizó el cálculo del tamaño de muestra necesario para determinar que las diez observaciones realizadas para cada temperatura eran suficientes para establecer que las medias de los valores de temperatura medidos en el centro térmico eran buenos estimadores de la temperatura al cabo de los 10 minutos para un nivel de confianza de 95 %.

### **Simulación de tratamientos de pasteurización**

El objetivo de realizar un estudio de pasteurización fue poder determinar el tiempo de calentamiento que garantizara un valor mínimo de 2 minutos, tomando como microorganismo y temperatura de referencia a la *Listeria monocytogenes* y 70 °C, respectivamente (7,8,9,10). Se aplicó el mismo criterio que en el horneado, respecto a garantizar el valor de pasteurización en la etapa de calentamiento. En esta operación el único parámetro limitante de la duración del tratamiento fue el valor de pasteurización, pues el producto fue horneado previamente, por lo que todas las transformaciones necesarias ya tuvieron lugar (4).

Se definieron como temperaturas del medio de calentamiento 80, 85 y 90 °C. Una vez calculados los coeficientes de convección para cada una de ellas, se simuló mediante las ecuaciones de conducción en estado no estacionario y el método de Patasnik, la temperatura y el valor correspondiente de letalidad en cada minuto, para determinar en qué tiempo se alcanzaba el valor de pasteurización mínimo de 2 minutos, tomando como microorganismo de referencia a la *Listeria monocytogenes* y temperaturas iniciales del producto en el centro térmico en el intervalo de 4 a 20 °C.

Para validar los resultados de la simulación se calculó el valor de pasteurización mediante el método de Patasnik a partir de valores de temperatura medidos experimentalmente cada 5 minutos. Se introdujeron 7 paquetes de salchicha en agua a las temperaturas estudiadas y cada 5 minutos se extrajo un paquete, al cual se le midió la temperatura en

el centro térmico, de manera que el último paquete extraído se pasteurizara 35 minutos, que es el tiempo de pasteurización actual. El paquete número 8 fue empleado para medir la temperatura inicial.

Lo más aconsejable sería realizar mediciones en intervalos de 1 minuto o menos y de ser posible emplear equipos de medición que incluso se pueden introducir en el producto y permiten obtener valores de temperaturas y directamente el valor P.

El valor de pasteurización calculado fue comparado con el obtenido a partir de la simulación. Se realizó una réplica del experimento.

### **Pruebas sensoriales**

Se realizó una prueba descriptiva simple con escala ordinal de 5 puntos, para determinar si había diferencias significativas entre los tratamientos. Se realizaron pruebas de comparación de medias con un nivel de confianza de 95 %.

Tuvo como base el perfil de atributos definidos para el producto. Mediante la prueba se evaluaron los atributos aspecto externo, aspecto interno, olor, color, sabor y textura. Se emplearon valores discretos en el intervalo de 1 a 5, de menor a mayor intensidad del atributo. Participaron en total 9 jueces. Las evaluaciones se hicieron en grupos de 5 jueces por día, los cuales evaluaron muestras de 2 experimentos, por lo que la duración de la evaluación sensorial fue 3 días.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El objetivo del análisis preliminar fue determinar el tiempo necesario para alcanzar un valor de pasteurización de 45 minutos (2) y una temperatura en el centro térmico de 72°C, por lo cual los tiempos se fueron modificando según los resultados de experimentos anteriores.

La etapa preliminar se inició con el tratamiento TMO. Al transcurrir ese tiempo en el horno de la planta experimental se obtuvo un nivel de pasteurización insuficiente. Se aumentó el tiempo de cocción con vapor en 10 min, dando lugar al tratamiento TMO 1. Se realizaron dos corridas y en ninguna se alcanzaron los objetivos propuestos para la operación.

Se realizó entonces el tratamiento TMO 2, en el que se empleó solamente vapor y una temperatura en la cámara de 74 °C para alcanzar rápidamente temperaturas a las que corresponden valores altos de letalidad y pasteurización acumulada. En ninguno de los experimentos realizados se alcanzaron los niveles de pasteurización.

En la tabla 1 se muestra un perfil de temperatura con el valor de letalidad que se va alcanzando en el tiempo.

Los resultados mostraron que para obtener el valor de pasteurización necesario se debían alcan-

**Tabla 1.** Perfil de temperatura vs tiempo tratamiento TMO 5

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura cámara (°C)</b>	<b>Temperatura CT (°C)</b>	<b>Letalidad</b>
1	52	19,2	8,3E-06
2	61	22,4	1,7E-05
3	71	27,4	5,4E-05
4	79	33,4	0,0002
5	79	40,1	0,0010
6	76	46,4	0,0043
7	74	50,9	0,012
8	78	54,6	0,028
9	79	57,8	0,060
10	77	60,9	0,12
11	75	63,2	0,20
12	77	64,5	0,28
13	79	66	0,39
14	78	67,8	0,60
15	76	69,1	0,81
16	74	69,5	0,89
17	77	69,6	0,91
18	79	70,1	1,02
19	78	71	1,25
20	76	71,5	1,41
21	75	71,4	1,38
22	76	71	1,25
23	79	71	1,25
24	79	71,7	1,47
25	77	72,4	1,73
26	76	72,5	1,77
27	75	72	1,58
28	75	71,5	1,41
29	79	71,5	1,41
30	78	72,2	1,65
31	77	72,9	1,94
32	76	72,9	1,94
33	75	72,5	1,77
34	76	71,9	1,54
35	79	71,8	1,51
36	78	72,4	1,73
37	77	72,9	1,9498446
38	76	72,9	1,9498446
39	75	72,5	1,77827941
40	76	71,9	1,548816619
41	79	71,7	1,479108388
42	78	72,5	1,77827941
43	77	73	1,995262315
		Po	45,95295817

zar temperaturas superiores a 70 °C en el centro térmico y realizar una retención para garantizar el valor P<sub>o</sub>. Para lograrlo se realizó el tratamiento H1 que consistió en secar el producto 15 min a 60 °C y

cocción a vapor a 80 °C durante 30 min, tal y como lo recomendaba el proveedor de las fundas. Este experimento resultó excesivo, pues en la primera réplica el nivel de pasteurización fue de 68 minutos

y el porcentaje de proteínas una vez cocido el producto fue de 8,6 %, inferior al 11,52 % definido como especificación de calidad en Prodal. A partir de este resultado se realizaron dos réplicas de duración total de 37 minutos manteniendo el tiempo de secado y solo en una de ellas se obtuvo el valor de pasteurización. No obstante, la temperatura inicial del producto y del horno fue mayor en la réplica donde se alcanzó el valor  $P_o$ . A pesar de la variabilidad de los resultados este tratamiento garantizó la temperatura en el centro térmico y el nivel de pasteurización fue más cercano al fijado.

El último tratamiento de esta fase exploratoria fue el H1 1, donde se coccionó el producto 30 min con vapor a una temperatura de la cámara de 80 °C, manteniendo la temperatura del HI y adoptando el criterio de no realizar secado si el producto no va a ser ahumado. Solo se alcanzó el valor de pasteurización en una réplica. No obstante los resultados fueron similares al H1, pero en tiempos inferiores.

Debido a que existió variabilidad en las temperaturas iniciales del producto y el horno se realizó un análisis de correlación, para determinar si esta variación incidió en los valores de pasteurización. No se obtuvieron correlaciones significativas para un nivel de confianza de 95 %.

Al ser los resultados inestables se realizaron modificaciones. Se mantuvo el tratamiento H1 y se definieron nuevos tratamientos:

- TMO 4: fusión de TMO y TMO-1
- TMO 5: fusión de TMO-2 y H1-1

Para cada tratamiento se calculó el tiempo medio de duración y se determinó el tamaño de muestra representativo. Se fijó como error de estimación 2, 3 y 5 minutos para H1, TMO 4 y TMO 5 respectivamente, partiendo de que para cada tratamiento una disminución de la duración en esos valores garantizaría aún un valor de pasteurización mínimo de 36 minutos.

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en la segunda etapa. Se realizaron 4 réplicas.

Los menores tiempos de operación correspondieron al tratamiento H1, seguido del TMO 5 y finalmente el TMO 4. Los mayores valores finales de temperatura se obtuvieron en el H1, TMO 4 y TMO 5 respectivamente. Los porcentajes de proteínas fueron superiores en todos los casos al mínimo exigido. Se apreció, además, buen desarrollo del color y de la textura.

En las figuras 1, 2 y 3 se puede apreciar el comportamiento de las temperaturas en la cámara y en el producto en el tiempo.

En el tratamiento TMO 5 se aprecia un ángulo ascendente mayor que en los tratamientos H1 y TMO 4. El producto estuvo expuesto a una temperatura del medio mayor desde el inicio del tratamiento, debido a que no se realizó la etapa de secado. Esto podría explicar puntualmente los pequeños porcentajes de mermas en algunos ciclos del tratamiento TMO5.

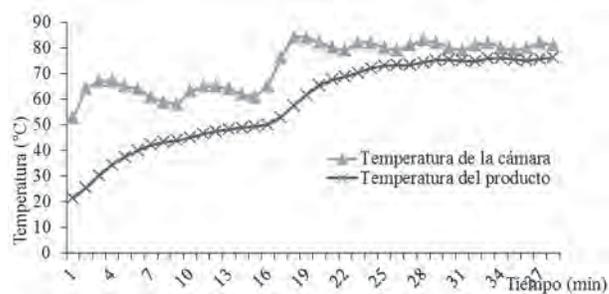
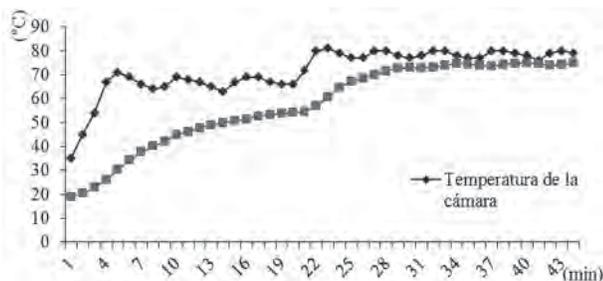


Figura 1. Evolución de la temperatura en ciclo H1.

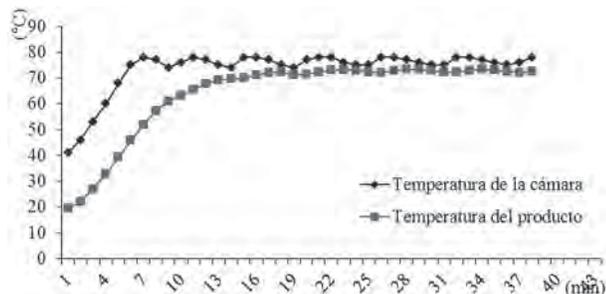
Tabla 2. Resultados de segunda fase de experimentación en el horno

Tratamiento	$P_o$ (min)	Temperatura inicial producto (°C)	Temperatura inicial horno (°C)	Tiempo de secado (min)	Tiempo de cocción (min)	Tiempo total (min)	Temperatura final producto (°C)
TMO 4	45,6	14,5	30	20	28	48	74,5
TMO 4	45,3	20	29	20	24	44	74,9
TMO 4	45,7	20,7	50	20	22	42	74,9
TMO 4	45,04	18,1	30	20	24	44	74,1
H1	49,04	19,2	30	15	23	38	76,2
H1	45,9	15,8	30	15	21	36	76,3
H1	47,7	20,8	33	15	22	37	76,2
H1	46,6	19,1	48	15	20	35	76,1
TMO 5	45,9	18,3	30	-*c	43	43	73
TMO 5	46,2	18,3	30	-	40	40	73,1
TMO 5	46,4	21,2	46	-	36	36	73,4
TMO 5	45,22	18,3	30	-	38	38	72,5

\*c: no se realizó la etapa



**Figura 2.** Evolución de la temperatura del ciclo TMO 4.



**Figura 3.** Evolución de la temperatura del ciclo TMO 5.

No obstante se realizó una prueba de comparación de medias de las mermas entre tratamientos y se obtuvo un valor  $p$  de 0,0652, lo que indicó que no hay diferencias significativas entre las mermas. También se realizó la prueba Kruskal Wallis para comparación de medianas y los resultados fueron similares. El  $p$  valor fue 0,19 por lo que se corroboró que los valores de mermas obtenidos no indicaron diferencias significativas.

### Cálculo del coeficiente de convección en la marmita

Los coeficientes de transferencia de calor fueron empleados para la determinación del perfil de temperatura que se debe desarrollar en el producto y el

valor de pasteurización asociado a este. Los resultados se muestran en la tabla 3.

El comportamiento de los coeficientes es lógico ya que disminuyen al aumentar la temperatura y el coeficiente de la superficie superior es el menor de todos ya que el paquete de salchicha tendía a tener la superficie transparente (superior) contraria a la fuente de calor (fondo del tanque), la marmita trabaja a régimen laminar, por lo que las corrientes convectivas rodeaban el paquete, menos a la cara superior (11).

### Determinación del centro térmico y validación experimental del coeficiente de convección

Como estos valores de coeficientes fueron calculados por ecuaciones empíricas se procedió a validar los resultados a través de un experimento que consistió en introducir un paquete durante 10 minutos en agua a temperatura de 80 y 85 °C. Fue necesario primero determinar el centro térmico del paquete.

Se realizó un análisis de varianza para cada temperatura del medio de calentamiento, donde se analizó si existían diferencias significativas entre las temperaturas medias de cada posición en el paquete. Los  $p$  valores para 80 y 85 °C fueron 0,0 y 0,0001, menores que  $\alpha$  igual 0,05 para un nivel de confianza de 95 %, lo que indicó diferencias significativas entre las temperaturas medias medidas en cada posición.

Se realizó una prueba de Múltiples Rangos que permitió determinar que para temperatura del agua igual a 80 °C la temperatura media fue menor en el centro geométrico del paquete. Indicó además, diferencias significativas entre las filas superior e inferior, siendo mayor en la inferior. Para agua a 85 °C la menor temperatura media correspondió también al centro geométrico y no existió diferencia significativa entre las filas superior e inferior. Por lo tanto se concluyó que el centro térmico coincide con el centro

**Tabla 3.** Coeficientes de transferencia de calor

Temperatura superficie del producto (°C)	Temperatura 80 °C			Temperatura 85 °C		
	h lados (W/m <sup>2</sup> K)	h superficie superior (W/m <sup>2</sup> K)	h superficie inferior (W/m <sup>2</sup> K)	h lados (W/m <sup>2</sup> K)	h superficie superior (W/m <sup>2</sup> K)	h superficie inferior (W/m <sup>2</sup> K)
13	1124	567	1403	1106	591	1168
23	1125	570	1410	1106	595	1170
33	1112	567	1395	1092	593	1160
43	1083	555	1354	1062	584	1135
53	1033	532	1276	1007	565	1093
63	948	490	1141	913	531	1023
73	781	405	883	715,3	470	903
Media	1029	527	1266	1000	561	1093
Desviación estándar	126	60	194	143	46	99

geométrico del paquete, en el punto de unión de las salchichas del medio de las filas superior e inferior.

Una vez determinado el centro térmico se procedió a comparar los valores de temperaturas medidos experimentalmente con los calculados mediante las ecuaciones de conducción en estado no estacionario.

Para cada temperatura del agua se realizaron pruebas de comparación de medias entre las diferencias obtenidas a partir del empleo de los coeficientes menores y mayores en la superficie horizontal del paquete. Los p valores para 80 y 85 °C fueron de 0,25 y 0,23 respectivamente, lo que indicó que

**Tabla 4.** Diferencias entre temperaturas medidas experimentalmente y calculadas con coeficiente de convección menor en superficie horizontal para 80 °C

Medición	Temperatura calculada (°C)	Temperatura experimental (°C)	Error (%)
1	43,5	45,3	3,9
2	43,4	45	3,4
3	43,3	49,4	12,3
4	43,3	45	3,7
5	43,2	44,7	3,2
6	40,2	46,7	13,8
7	40,4	43,9	8,0
8	40,6	46,8	13,0
9	40,8	43,3	5,7
10	40,8	43,9	6,9

**Tabla 5.** Simulación de los tiempos y temperaturas de pasteurización

Temperatura inicial (°C)	Temperatura 80 °C			Temperatura 85 °C		
	P <sub>0</sub> (min)	Temperatura CT (°C)	Tiempo (min)	P <sub>0</sub> (min)	Temperatura CT (°C)	Tiempo (min)
4	2,13	67,56	30	2,38	69,5	27
5	2,26	68,67	30	2,55	69,7	27
6	2,39	68,82	30	2,73	68,89	27
7	2,53	68,97	30	2,93	70,08	27
8	2,67	68,12	30	2,05	69,06	26
9	2,03	68,38	29	2,2	69,27	26
10	2,16	68,54	29	2,37	69,48	26
11	2,3	68,71	29	2,55	69,68	26
12	2,44	68,87	29	2,75	69,89	26
13	2,6	69,03	29	2,96	70,1	26
14	2,76	69,2	29	2,09	69,1	25
15	2,12	68,48	28	2,26	69,33	25
16	2,27	68,65	28	2,45	69,55	25
17	2,42	68,83	28	2,66	69,78	25
18	2,59	69,01	28	2,88	70	25
19	2,77	69,19	28	2,05	69,03	24
20	2,14	68,48	27	2,23	69,27	24

CT: centro térmico

para un nivel de confianza de 95 % no hubo diferencias significativas asociadas al uso de los coeficientes en la superficie horizontal mayor y menor. No obstante se empleó el coeficiente mayor debido a que las medias de las diferencias y las desviaciones estándar son menores.

### Simulación de tratamientos de pasteurización

Una vez calculados los coeficientes de convección se realizó una simulación del proceso de pasteurización a partir del cálculo de la temperatura en el centro térmico cada un minuto. Esto permitió obtener un perfil de temperatura y valores de letalidad y determinar el tiempo de pasteurización necesario para garantizar un valor de P<sub>0</sub> igual a 2 minutos, o sea, un tratamiento equivalente a haber pasteurizado el producto en agua a 70 °C durante dos minutos.

La temperatura de 90 °C fue eliminada del estudio porque los paquetes se abrieron por el área de sellado, debido a la expansión del producto. Se midieron los porcentos de proteínas, grasas, sales, colágeno y humedad antes y después de los tratamientos para determinar si existían afectaciones. No se apreció afectación en el producto.

La simulación se realizó para 80 y 85 °C y temperaturas iniciales del producto en el intervalo de 4 a 20 °C. En la tabla 5 se muestran los resultados y se puede observar que el nivel de pasteurización para siete reducciones decimales de *Listeria monocytogenes* se alcanza en un período de tiempo de 27 a 30 minutos cuando la temperatura del medio es 80 °C

y de 24 a 27 minutos para 85 °C. Esto indicó preliminarmente que la temperatura de 85 °C es mejor desde el punto de vista de que se logra la letalidad deseada en un menor tiempo, lo cual es conveniente para incrementar la productividad de la planta.

Para proponer el tiempo de pasteurización fue necesario conocer el comportamiento de la temperatura inicial del producto. Se hicieron 100 observaciones en 3 días en diferentes horarios de la jornada laboral. Se midió

la temperatura de las salchichas que eran rechazadas en el envase por defectos. De las operaciones de envase y termoformado a la pasteurización solo transcurre un minuto aproximadamente, por lo que se consideró la temperatura medida en estas operaciones como la temperatura inicial del producto en la pasteurización. Además, las temperaturas en el área son inferiores a 20 °C. El límite central fue de 13,92 °C, siendo 12,65 °C y 15,18 °C los límites inferior y superior respectivamente.

Para validar estos resultados los valores medidos se compararon con los calculados mediante las ecuaciones de conducción en estado no estacionario para los mismos intervalos de tiempo. Los resultados para 80 °C son mostrados en la tabla 6.

A partir de los valores medidos experimentalmente se hizo una simulación de posibles valores de temperatura entre los valores extremos de los intervalos de 5 minutos para tener 35 valores de letalidad como si se hubiera medido en un paquete cada un minuto.

La comparación permitió validar los resultados obtenidos mediante la simulación. Los mayores porcentajes de errores correspondieron a la temperatura del agua de 80 °C, pero fueron inferiores al 10 %, por lo que se consideró que la simulación es eficaz para la determinación del  $P_0$  cuando no se pueden realizar mediciones experimentales (tabla 7).

Tomando como temperatura inicial del producto el límite inferior del gráfico de control (12 °C), se definieron los siguientes regímenes de pasteurización:

**Tabla 6.** Validación de tratamiento de pasteurización a 80 °C

Tiempo (min)	Temperatura calculada (°C)	Temperatura real (°C)	Error (%)
5	20,26	20,4	0,67
10	35,68	37,3	4,34
15	48,40	46,7	3,66
20	58,01	59	1,67
25	65,0	63,4	2,53
30	69,91	67,5	3,58
<b>35</b>	<b>73,28</b>	<b>70,9</b>	<b>3,36</b>

**Tabla 7.** Validación de simulación de variables tiempo y  $P_0$

Temp. del agua (°C)	Temp. inicial (°C)	Temp (CT) cálculo (°C)	Temp (CT) exp* (°C)	Tiempo cálculo (min)	Tiempo exp. (min)	$P_0$ cálculo (min)	$P_0$ exp. (min)	Error tiempo (%)	Error temp. (%)
<b>80</b>	13,2	69,09	66,68	29	31	2,6	2,49	6,90	3,49
<b>80</b>	15	68,53	66,4	28	30	2,12	2,17	7,14	3,11
<b>85</b>	14,4	69,1	68,7	25	26	2,09	2,71	4,00	0,58
<b>85</b>	13,7	69,1	70,1	25	25	2,09	2,7	0,00	1,45

\*: experimento

- Pasteurización en agua a 80 °C durante 29 minutos.
- Pasteurización en agua a 85 °C durante 26 minutos.

### Diseño de experimento

Se realizó un experimento que combinó ambas operaciones. Para la operación de horneado se definieron tres niveles: H1, TMO 4 y TMO 5. En la pasteurización se definieron 2: pasteurización en agua a 80 y 85 °C. En la tabla 8 se muestran los experimentos realizados.

**Tabla 8.** Experimentos del diseño factorial

No.	Horneado	Pasteurización
1	H1	85 °C
2	H1	80 °C
3	TMO 4	85 °C
4	TMO 5	85 °C
5	TMO 5	80 °C
6	TMO 4	80 °C

A los productos obtenidos se les realizó una prueba descriptiva simple con escala ordinal de 5 puntos para determinar si había diferencias significativas entre las variantes de tratamientos y las combinaciones de ellos.

### Pruebas sensoriales

Los jueces asignaron una puntuación a la que corresponde una calificación cualitativa del producto de rechazable, aceptable, bueno, muy bueno y excelente. Para cada tratamiento en el horno los jueces dieron las mismas puntuaciones a las dos variantes de pasteurización, lo que indicó que no se percibieron diferencias asociadas al régimen de pasteurización.

En la tabla 9 se resumen las puntuaciones promedio para cada tratamiento.

Como se observa los jueces dieron las mismas puntuaciones a las dos variantes de pasteurización, lo que indicó que no se percibieron diferencias asociadas al régimen de pasteurización.

**Tabla 9.** Resultados de evaluación sensorial

Código	Horneado	Pasteurización	Promedio	Calificación
271	H1	80 °C	4	Muy bueno
991	H1	85 °C	4	Muy bueno
236	TMO 4	80 °C	3,86	Muy bueno
422	TMO 4	85 °C	3,86	Muy bueno
386	TMO 5	80 °C	4,06	Muy bueno
671	TMO 5	85 °C	4,06	Muy bueno

Se realizó una prueba de comparación de medias entre las 10 observaciones de cada tratamiento en el horno. Se obtuvo un p valor de 0,0001 para un nivel de confianza de 95 %, lo que indicó la existencia de diferencias significativas. La prueba de Múltiples Rangos mostró que las diferencias fueron significativas entre el tratamiento TMO 4 y los dos restantes. No se establecieron diferencias significativas entre H1 y TMO 5. A pesar de ser evaluados todos los productos como muy buenos, el tratamiento TMO 4 fue el que menos gustó a los jueces del panel sensorial.

Debido a que se presumía que la mayor influencia de la variedad de tratamientos se percibiría en la textura, se hizo una prueba de comparación de medias para este atributo. El p valor para un nivel de confianza de 95 % fue 0,001, lo que indicó diferencias significativas. La prueba de múltiples rangos mostró que la textura del tratamiento TMO 5 gustó más a los jueces que la obtenida mediante H 1 y TMO 4.

A partir de las pruebas realizadas se concluyó preliminarmente que desde el punto de vista sensorial la mejor variante fue el tratamiento TMO 5 (cocción con vapor de 100 % de saturación y temperatura de la cámara 76 °C).

## CONCLUSIONES

1. Se determinó que los tratamientos en la operación de horneado que garantizaron el cumplimiento de los criterios tecnológicos, nutritivos y de pasteurización, tomando como referencia al D-Streptococo, fueron TMO 4, H1 y TMO 5.
2. Se determinó que la pasteurización a 80 y 85 °C durante 29 y 26 minutos respectivamente garantizó un valor de pasteurización de 2 minutos (7 reducciones decimales), tomando como referencia a la *Listeria monocytogenes*, sin afectaciones a las propiedades nutritivas y sensoriales.
3. Se definió, a partir de los resultados de la evaluación sensorial, nutricional y económica, que los mejores tratamientos térmicos son el TMO 5 en la operación de horneado y la pasteurización a 85 °C. La duración total de los tratamientos es 66 minutos, por lo que se redujo en cinco minutos la duración de los tratamientos actuales, la cual es de 71 minutos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ramaswamy, M. Food Processing Principles and Applications. Taylor & Francis Group L, editor. North and South America. 2006.
2. Mella, R.M.; Santos, R.; Yanez, J.; Volumen, S.; Pacheco, D. Conservación de productos cárnicos por calor La Habana: Instituto de investigaciones para la industria alimenticia. 2004.
3. Viscofan. Ciclos de cocción. In: Corporate V, editor. 2016.
4. Holdsworth, D.; Simpson, R. Thermal processing of packaged foods. second ed. Barbosa GV-C, editor. Washington State University. 2008.
5. Incropera, P.F.; De Witt, P.D. Fundamentos de transferencia de calor 4 ed. 1999.
6. Corporation C. Thermodynamic and Transport Properties of Water and Steam. USA. 1999.
7. Murphy, Y.R.; Duncan, K.H.; Driscoll, H.K.; Breard, L.B.; Berrang, B.M.; Macy, A.J. Determination of thermal lethality of *Listeria monocytogenes* in fully cooked chicken breast fillets and strips during postcook in package pasteurization Food Protection. 2003.
8. Evans, M.; Swaminathan, B.; Graves, L.; Altermann, E.; Klaenhammer, T.; Fink, R. *et al.* Genetic Markers Unique to *Listeria monocytogenes* Serotype 4b differentiate epidemic clone II (Hot Dog Outbreak Strains) from other lineages. Environmental microbiology. 2004.
9. López, V.; Suarez, M. *Listeria monocytogenes* en alimentos: ¿son todos los aislamientos igual de virulentos? Revista Argentina de microbiología. 2006.
10. Melara, A. D. Evaluación del efecto de empaque y temperatura de almacenamiento en la supervivencia de *Listeria monocytogenes* en salchichas artesanales [Maestría en microbiología e inocuidad de alimentos]. El Salvador: Universidad del Salvador. 2014.
11. Kern, Q.D. Procesos de Transferencia de Calor. 31, editor. México. 1999.