

Evaluación de la capacidad de reducción de la carga microbiana de un sistema de intercambiadores de calor concéntricos, aplicados en un proceso de secado por aspersión de alimentos

Felipe Castañeda, Luis García, Concepción Oaxaca, Raquel Arciga y Maria del Carmen Sabino

F. Castañeda, L. García, C. Oaxaca, R. Arciga. M.C. Sabino.
Universidad Tecnológica de San Juan del Río. Av. La Palma 125. Col. Vista Hermosa. San Juan del Río, Querétaro.
fcastanedao@utsjr.edu.mx

M. Ramos., V.Aguilera., (eds.).Ciencias Naturales y Exactas, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2014.

Abstract

Many of the processes of food production are based on thermal treatments as part of their processing of raw materials and / or treatment of food materials preservation. An industry located in Mexico that dehydrated food system has a process that involving heat exchanger concentric tubes whose efficiency must be estimated as part of the quality assurance system. In this study the prediction of log reductions of microbial survival was performed with two linear models, isothermal and non-isothermal. The results point to have a reduced capacity beyond the needs of the industry, with the respective consequences in quality and economy.

17 Introducción

Los tratamientos térmicos son un método usado para la conservación de los alimentos. Lo que se busca es que el alimento:

- Quede exento de organismos patógenos y
- Que tenga una vida de almacenamiento aceptable (Brennan, 1998)

Cualquier tratamiento térmico debe su efectividad a otros factores, tal como:

- La presencia de ingredientes osmóticamente activos como la sal o el azúcar.
- Acidez del producto.
- Actividad de Agua.

Cada tratamiento térmico tiene una función dentro de un proceso completo, pero la principal es la destrucción térmica de los microorganismos deteriorantes. El calor se ha usado tradicionalmente para inactivar células vegetativas en los procesos de pasteurización.

En este estudio, una empresa del área de secado de alimentos tiene un proceso donde recibe su materia prima con una concentración de sólidos (alrededor de 50%), es recibida, y luego fluidizada por medio de agua en un tanque de proceso para luego elevar la temperatura de esta a 60°C. A continuación mediante una bomba de alta presión la materia prima se introduce a un intercambiador de calor de tubos concéntricos para elevar la temperatura a alrededor de 82°C antes de pasar al secador de ciclón a través de una esprea.

Las políticas de calidad de la empresa dictan que el control microbiológico debe de asegurarse en el intercambiador de calor de tubos concéntricos. De esta forma, el estudio del proceso térmico tiene la finalidad de modelar la efectividad del mismo en forma matemática.

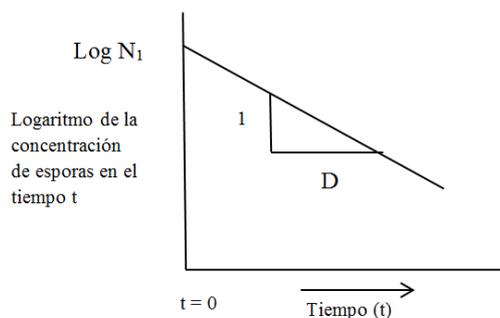
La estabilidad microbiológica y calidad comestible de los alimentos tratados térmicamente resultan afectadas por la temperatura y la duración del proceso térmico. Los alimentos poco procesados pueden ser deteriorados por las bacterias, y los alimentos tratados en exceso son inferiores desde el punto nutritivo y el organoléptico. (Richardson, 2005)

Para determinar los parámetros de un proceso térmico adecuado se requieren:

- Supuestos de la resistencia térmica de los microorganismos deterioradores.
- Conocimiento de la historia térmica de los alimentos durante el tratamiento.

Se supone, para fines prácticos, que las esporas bacterianas al igual que las células vegetativas tienen un orden de muerte logarítmica, es decir, cuando una preparación de esporas dada se mantiene a una temperatura constante suficientemente alta para que tenga lugar la destrucción térmica, el número de esporas por unidad de volumen decrece como en la figura 1.

Figura 17 Relación entre la concentración de esporas y el tiempo de calefacción a temperatura constante. (Brenan, 1998)



De ella se deduce que si la concentración de esporas es N_1 esporas/cc de suspensión en el tiempo $t=0$ y N esporas/cc al tiempo $t = t$:

$$\log \frac{N}{N_1} = -\frac{t}{D} \quad (17)$$

Donde:

D = Tiempo de reducción decimal.

t = tiempo necesario para que la concentración de esporas se reduzca 10 veces ($\log 10 = 1$)

El tiempo de reducción decimal es independiente de la concentración inicial de esporas y depende de la temperatura, de las especies de esporas bacteriológicas, de la historia previa de las esporas y de las técnicas usadas para detectar supervivientes.

Si N_1 es la concentración inicial de una espora bacteriológica particular en un producto alimenticio dado antes de ser tratado térmicamente, la cantidad: $\log \frac{N_1}{N_0} = m$, donde m es denominado “factor de orden del proceso”.

En muchos casos, el logaritmo de los supervivientes con respecto al tiempo aparece como una línea recta o aproximadamente recta durante las 4-5 primeras reducciones decimales. Por tanto, se ha concluido que, en estos casos, la inactivación microbiana es un proceso que sigue una cinética de primer orden (Stumbo, 1973; Texeira, 1992; Jay, 1996; Holdsworth, 1997). De este modo seleccionamos el modelo lineal ya que no se requieren normalmente más reducciones logarítmicas para controlar los procesos de calidad.

Sin embargo, esta visión de usar modelos predictivos lineales usados de forma general ha ido en decadencia en los últimos años. Por ejemplo el Dr. Peleg plantea en su comparación de los modelos de Weibull y de Arrhenius, que el problema mayor es que en el siglo XXI se sigue enseñando esta teoría de la cinética de supervivencia y tanto la industria farmacéutica como de alimentos continúan usando criterios de esterilidad basados en estimar una línea recta en datos que realmente son curvos. (Castro Montero, 2008)

Existen varios trabajos que correlacionan mejor los datos de las curvas de supervivencia de diversos microorganismos, como es el caso de Díaz de Villegas y col. (2011), en el que analizan el modelo de Weibull en la inactivación térmica de *Pseudomonas aeruginosa*, donde dicho modelo puede minimizar el gasto de energía del proceso.

En el trabajo de Bermúdez Aguirre y col. del 2009, el modelo de Weibull vuelve a ser usado con éxito aún cuando la tecnología del tratamiento térmico es realizado por sonicación. En este caso la tecnología se está desarrollando y da mejores resultados en combinación de tratamientos de pasteurización y de sonicación. Aparte de los tratamientos térmicos se usa existen la sonicación y la alta presión hidrostática cuyas curvas de supervivencia corresponden a un modelo cinético de primer orden.

No así el tratamiento por pulsos de campos eléctricos cuya cinética se describe mejor por el modelo de Weibull. Sin embargo comentan Mañas y Pagán (2005) que falta modelar las técnicas para otras condiciones y microorganismos. Estos modelos no lineales se basan en pruebas de laboratorio y en sistemas no alimenticios por lo que su veracidad debe corroborarse en sistemas reales de alimentos, con equipos in situ.

Para determinar el tiempo de proceso para la elaboración de cualquier alimento, se debe de considerar los siguientes factores:

- Resistencia de microorganismos, hongos y mohos.
- Condiciones de calor.
- Condiciones de almacenamiento después del proceso.
- pH del alimento
- Propiedades termo-físicas del alimento.

Una de las formas para producir alimentos altamente seguros es el calentamiento y enfriamiento rápido. (Alvarado, 2011). Sin embargo en el sistema en estudio, las condiciones de pasteurización no aplican, ya que no existe la etapa de enfriamiento, todo es calentamiento hasta después del proceso de secado en el secador.

Existen varios métodos para calcular un procesamiento térmico, sobre todo para la esterilización, tal como el método de la fórmula de Ball (método de calentamiento) o el método General Mejorado (método gráfico). Este método está basado en el hecho de que cada punto de las curvas de calentamiento y enfriamiento, correspondientes a la historia de penetración de calor de un producto, ejerce un efecto letal para el microorganismo contaminante de dicho producto, por lo que el cálculo del proceso térmico implica la integración gráfica del efecto letal de dichos puntos. Este proceso considera el valor temperaturas de calentamiento y enfriamiento del proceso térmico (Colina, 2010). Este sistema consideramos que puede ser aplicado en sistemas de pasteurización.

Un punto a favor de la microbiología predictiva está basada en la premisa de que las respuestas de las poblaciones de microorganismos a los factores ambientales son reproducibles, que por caracterización de los factores dominantes de las respuestas de crecimiento, es posible, desde observaciones anteriores, predecir las respuestas de dichos microorganismos en otras condiciones ambientales similares (Ross y McMeekin, 1994).

Los modelos predictivos son típicamente generados en medios de cultivo líquidos en el laboratorio (Baranyi y col., 1999). Las cepas de *E. coli* O157:H7, *E. coli* CECT 516, *Salmonella typhimurium*, *Listeria Monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, han tenido comportamientos diferentes en varias combinaciones de temperatura, pH y cloruro de sodio.

El pH fue el factor que más condicionó el comportamiento cinético de cada uno de los microorganismos. A dichas conclusiones llega dos Santos (2007) en su tesis de doctorado.

Como consecuencia o como resultado del análisis de miles de curvas de tratamiento térmico, se ha llegado a la conclusión de que la curva de enfriamiento contribuye con cerca de una tercera parte del total de la letalidad del proceso. (dos Santos, 2007)

El método *in situ*, citado con anterioridad, está basado en la valoración de determinados índices de calidad y seguridad del alimento antes y después del tratamiento térmico. El análisis del parámetro bajo investigación puede ser bastante laborioso, llevar mucho tiempo y ser caro, lo cual hace de esta técnica un método inviable de control rutinario. Todo ello hace que los modelos matemáticos utilizados en los últimos años no siempre puedan predecir exactamente la evolución tiempo-temperatura en el interior del alimento, necesaria para establecer los tratamientos térmicos a los que va a ser sometido. (López-Martínez, 2012).

Existen diversos apoyos computacionales, incluso desarrollados por la USDA, que contemplan la termoresistencia de los microorganismos y la composición de los alimentos. (Awua y col. 2007)

Si a los factores de variación mencionados sumamos otros como la ubicación geográfica, las condiciones medioambientales, la calidad microbiológica de la materia prima y la estandarización de los procesos, el resultado es una predicción del tratamiento térmico necesario para alcanzar los objetivos que puede ser cuestionable y con más margen de error que el simple modelado lineal o no lineal.

El objetivo del presente trabajo es el modelado del tratamiento térmico en un intercambiador de calor de tubos concéntricos, considerando que los flujos de los alimentos son laminares y que durante todo el recorrido se va dando la disminución de la cuenta microbiana en un proceso no isotérmico.

17.1 Materiales y métodos

Materiales

Viscosímetro RV Brookfield

Medidor de pH. Sper Scientific.

Sistemas de 5 intercambiadores de calor concéntricos de la empresa en estudio.

Muestras de materiales de proceso alimenticios: Maltodextrinas, puré de tomate, crema láctea, yogurth y concentrado de limón.

Método

Una vez preparadas las cinco muestras a analizar se caracterizó su viscosidad y densidad a la temperatura ambiente y de proceso.

Se midió su pH y se investigó los microorganismos representativos de cada producto. Se investigó la resistencia térmica y el tiempo de reducción logarítmica a la temperatura de referencia de 150°F, es decir pasteurización.

Tabla 17 Grupos de Alimentos según su acidez.(Alvarado, 2011)

Grupos según grado de acidez	Rango de pH	Grupos de alimentos	Microorganismos
Grupo 1: poco ácidos	> 5	Productos cárnicos Productos marinos Leche Hortalizas	Aerobios esporulados Anaerobios esporulados
Grupo 2: semiácidos	4.5 - 5	Mezclas de carne y vegetales Sopas Salsas	Levaduras, mohos y bacterias no esporuladas
Grupo 3: ácidos	4.5 - 3.7	Tomates, Peras, Higos, Piña. Todas las frutas	Bacterias esporuladas. Bacterias no esporuladas. Levaduras y Mohos.
Grupo 4: muy ácidos	pH < 3.7	Encurtidos. Pomelo. Zumos cítricos	

Tabla 17.1 Datos de Termo resistencia de grupos bacterianos, hongos y levaduras a temperaturas de pasteurización. (Alvarado, 2011)

Grupo Bacteriano	Rango Aproximado de termo resistencia D (minutos)	Z°(F)
Microorganismos patógenos y productores de toxinas	D 150	
Mycobacterium tuberculosis	0.20-0.30	8 a 10
Brucella sp	0.10-0.20	8 a 10
Coxiela burnetti	0.5-0.60	8 a 10
Salmonella sp	0.02-0.25	8 a 10
Salmonella senftenberg – SH	0.8-1-0	8 a 12
Staphylococcus aureus	0.2-2.0	8 a 12
Streptococcus pyogenes	0.2-2.0	8 a 12
	D 180	
Clostridium botulinium tipo E (esporoso)	0.10-3.0	0 a 16
Microorganismos responsables de deterioro	D 150	
Hongos, levaduras y bacterias no esporuladas	0.5-3.0	8 a 12

Como se ve reflejado en la tabla No. 3, se midieron las características de los intercambiadores usados para cada uno de los secadores. El tiempo de retención, la empresa lo considera a partir de la temperatura que se reporta en la tabla, que es aproximadamente a la mitad del recorrido de todo el intercambiador de calor.

Tabla 17.2 Datos de intercambiadores proporcionados por la empresa

Intercambiador	Producto	Diametro interno (m)	Tiempo de retención (min)	Flujo m ³ /s	Temperatura (°C)	Temperatura (°F)
Secador 1	Maltodextrina	0.0345	2.5	0.0001	77	150
Secador 2	Puré de Tomate	0.0345	3.66	0.0001	72.25	162.1
Secador 3	Crema Láctea	0.0345	1.527	0.0003	69.965625	157.9
Secador 4	Concentrado de Limón	0.0345	2.831	0.0003	79.56041667	175.2
Secador 5	Yogurth	0.0345	2.553	0.0003	80.5445	177.0

En una primera etapa se calculó el tiempo de reducción decimal con las temperaturas de proceso y las referencias bibliográficas pertinentes (Alvarado, 2011). Con la ecuación siguiente, y despejando D_F ,

$$\log \frac{D_F}{D_{150}} = -\frac{T_1 - T_{150}}{z} \quad (17.1)$$

$$\log D_F - \log D_{150} = -\frac{T_1 - T_{150}}{z} \quad (17.2)$$

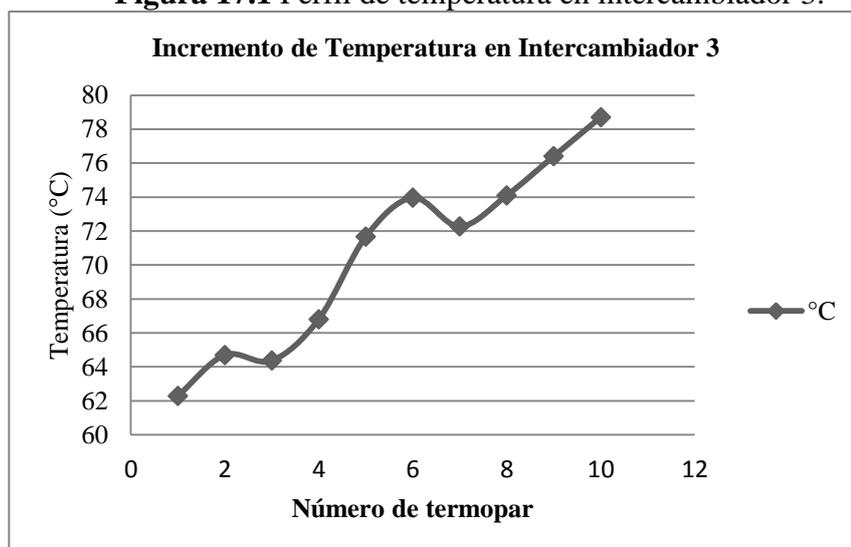
$$\log D_F = \log D_{150} - \frac{T_1 - T_{150}}{z} \quad (17.3)$$

$$D_F = 10^{\left[\log D_{150} - \frac{T_1 - T_{150}}{z}\right]} \quad (17.4)$$

A continuación se estimaron las reducciones logarítmicas para cada producto y el intercambiador correspondiente. Una vez obtenida D_1 a la temperatura de proceso, se divide entre el tiempo de retención de cada pasteurizador (Ver tabla 4^a).

Sin embargo se consideró que dentro de los márgenes de error propios del procedimiento se adicionaban otros que corresponden a la consideración de aplicar dicho procedimiento a un proceso isotérmico, cuando en realidad es un proceso no isotérmico (Ver figura 2). Por lo que se determinó que el modelo a seguir podía ser el propuesto por Colina Irezabal en el 2010, donde calcula por el método general, el valor letal (L) de un proceso de esterilización. En nuestro caso propusimos una modificación al siguiente método de integración que considera que el proceso de los intercambiadores es no isotérmico y que desde que empieza el calentamiento de los productos existe un decaimiento de la cuenta microbiana.

Se consideró que el tratamiento térmico empieza a los 140°F y hasta los 183.2°F, considerando el tiempo de recorrido como el tiempo de retención.

Figura 17.1 Perfil de temperatura en intercambiador 3.

La ecuación que se integra es la siguiente:

$$D_T = \int 10^{\left[\log D_{150} - \frac{T_1 - T_{150}}{z}\right]} = Z \frac{10}{43.2} \left[\frac{T_{150} - T}{z} + a \right] \quad (17.5)$$

Para el cálculo de D_T se divide entre el ΔT ($183.2 - 140^\circ\text{F} = 43.2^\circ\text{F}$) para obtener un valor promedio de todo el proceso que se acerque más a la realidad. Ver tabla 4^b

17.2 Resultados y discusión

Tabla 17.3 Tabla de resultados de reducciones logarítmicas de actividad microbiana.

Viscosidad (cp)/ Ambiente (18°C el yogurt)	viscosidad (cp)/ temp de proceso	pH	densidad g/ml	ρ kg/m ³		Valor D (minutos)	Val or Z (°F)	D Final (minutos)	tiempo de retención (min)	Número de reducciones logarítmicas ^a	Número de Secador	Tiempo de retención total (min)	Valores integrados (D Total en minutos)	Número de reducciones logarítmicas integradas ^b
125	20	7	2.74	2740	961	0.50	8	0.0002108	2.5	11,857	1	5	0.289	17.2
48500	49000	4.1	2.37	2370	0.250	0.50	8	0.0002108	3.66	17,358	2	7.32	0.289	25.2
200	100	6.6	2.53	2530	280	0.50	8	0.0002108	1.53	7,242	3	3.054	0.289	10.5
212.5	14	3.8	1.1824	1182.4	592	0.50	8	0.0002108	2.83	13,427	4	5.662	0.289	19.5
20	295	4.4	1.0295	1029.5	41.2	0.10	8	0.0000422	2.55	60,541	5	5.106	0.007125	716.6

Los alimentos analizados se clasifican según su pH como neutro en el caso de maltodextrinas y Crema Láctea. Como ácidos el Tomate, Yogurt y el concentrado de Limón. En todos los casos, menos en el tomate, consideramos que son fluidos newtonianos en función a su viscosidad.

Las densidades son normalmente altas por la cantidad de sólidos presentes. Con los resultados del número de Reynolds podemos afirmar que los flujos de todos los productos son laminares. Las temperaturas registradas son las temperaturas al centro de los tubos concéntricos.

Los intercambiadores 1, 2, 4 y 5 son dimensionalmente similares, aunque los tiempos de retención en el 2 son más largos en virtud de la viscosidad del tomate procesado. El intercambiador 3 es más corto y por lo tanto sus tiempos de retención son menores.

Las relaciones de tiempo y temperatura marcan los tratamientos térmicos de tal modo que se establecen las diferencias entre las pasteurizaciones y las esterilizaciones. Las temperaturas de proceso de los intercambiadores están arriba en varios casos a los 80°C, con lo cual los tiempos de tratamiento térmico para lograr la reducción decimal se acortan.

Los ciclos de reducciones logarítmicas, en el caso de considerar un proceso isotérmico, tienden a dispararse y dar idea de ser un proceso excesivamente sobrado para las necesidades de la empresa. Sin embargo la empresa considera una temperatura alta y estándar, la cual en realidad no ocurre.

En el caso de los datos correspondientes a un sistema no isotérmico, los datos son más asertivos en cuanto a los números de reducción de ciclos logarítmicos, sin embargo aún así se considera alto sobre todo para el caso del Yogurth.

Aunque los tiempos se extendieran infinitamente las temperaturas de proceso no alcanzarían para destruir ciertos tipos de bacterias que son esporuladas como *Coxiella burnetii*, *Clostridium botulinum*, y/o *Listeria monocytogenes*. Que normalmente no se encuentran en los productos analizados. Por el contrario muchas bacterias patógenas se destruyen con tratamientos térmicos no demasiado enérgicos.

17.3 Conclusiones

En virtud de los resultados obtenidos se considera que para las necesidades de la empresa, las condiciones de tratamiento térmico son excesivas para los productos que se analizaron. Por lo que se puede considerar que puede existir un deterioro en la calidad de los productos al dar más tiempo de tratamiento térmico del requerido.

En cuanto a la calidad microbiológica los productos no deben de presentar problema alguno, tal como se ha reportado hasta el momento en la producción de la empresa. Los resultados así lo demuestran.

Lo que garantiza los tratamientos térmicos son la homogeneidad de las temperaturas reportadas, que a pesar de ser fluidos laminares el tiempo de retención está medido hasta que el centro del fluido alcanzó la temperatura de proceso.

Cualquier proceso de alimentos requiere de un aseguramiento del control de calidad de materia prima, proceso y producto terminado acorde al análisis de riesgos y puntos críticos de control. De esta forma podemos afirmar que los resultados nos dan indicios de ser un proceso microbiológicamente confiable, aunque en cuanto a calidad nutritiva y gasto energético tal vez esté excedido.

En una planta productiva es importante visualizar que existen varios factores que pueden modificar la predicción de sobrevivencia microbiana, incluyendo las matrices alimenticias que modifican la eficiencia de los tratamientos térmicos y las condiciones no constantes de la calidad de la materia prima. Por esta razón se sugirió a dicha empresa realizar periódicamente pruebas microbiológicas *in situ* que corroboren el modelo de predicción de muerte microbiana calculada en forma teórica pero sustentada, para cada producto procesado en su planta. Ellos consideran que como sus análisis hasta el momento son favorables deben redoblar esfuerzos en aceptar materia prima de calidad, para asegurar que su proceso siga siendo eficiente.

17.4 Agradecimientos

Agradecemos a la empresa de alimentos su apertura para la realización de este trabajo que nos deja enseñanzas y mejoras por hacer.

También a la Academia de Química de la Universidad Tecnológica de San Juan del Río, sin cuya participación no se habría podido concluir en tiempo y forma la presentación de este material.

17.5 Referencias

Alvarado Landírez, Eduardo Mauricio. (2011). Estudio del proceso de producción de pulpas de frutas combinadas pasteurizadas y congeladas a mediana escala. Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. Pág. 38-40.

Awuah, G.B.Ramaswamy, H.S. Economides, A. 2007. Thermal processing and quality: Principles and overview. Chemical Engineering and Processing. 46. Pag. 584-602.

Baranyi, J. Pin, C. and Ross, T. (1999). Validating and comparing predictive models. International Journal of Food Microbiology. 13:83-91.

Bermúdez-Aguirre, D. Corradini, M.G. Mawson, R. Barbosa-Cánovas, G.V. (2009). Modeling the inactivation of *Listeria innocua* in raw whole milk treated under thermo-sonication. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 10:172-178.

Brennan, F. (1998). Operaciones de la Ingeniería de los alimentos. Ed. Acribia. España.

Castro Montero Eduardo. (2008). Cálculo de Procesos Térmicos de Alimentos en el siglo XXI. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Depto. de Ciencias de los Alimentos y Tecnología Química.

Colina Irezabal, María Luisa. (2010). Deshidratación de Alimentos. Editorial Trillas.

Díaz de Villegas, María Elena. Bueno-García, Gloria. De Armas-García, Gisela. Torres-Castañeda, Esmérida y Saura-Moncisbaez, Maribel. (2011). Un modelo adecuado de curvas de sobrevivencia microbiana en la inactivación térmica de *Pseudomonas aeruginosa*. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Cuba (ICIDCA). Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. 45, núm. 3, septiembre-diciembre, 2011. Pag. 2-6.

Dos Santos Eduardo, Agatângelo Joaquim. (2007). Estudio del comportamiento cinético de microorganismos de interés en seguridad Alimentaria con Modelos Matemáticos. Tesis doctorado. Universidad Autónoma de Barcelona. España.

Holdsworth, S.D., (1997). "Thermal processing of packaged foods". London: Blackie

López Martínez, María Dolores. (2012). Validación física y biológica de tratamientos térmicos aplicados en un reactor prototipo para la industria alimentaria. Tesis doctorado. Universidad Politécnica de Cartagena.

Peleg, M. Maria G. Corradini, M. G. y Normand, M.D. 2007. The logistic (Verhulst) model for sigmoid microbial growth curves revisited. *Food Research International*. 40. Pag. 808-818.

Mañas, P. and Paga, R. 2005. Microbial inactivation by new technologies of food preservation. *Journal of Applied Microbiology*. 98. Pag. 1387–1399

Richardson, Philip. 2005. *Tecnologías Térmicas para el procesado de los alimentos*. Acribia. España.

Ross, T. and McMeekin, T.A. (1994). Predictive microbiology – a review. *International Journal of Food Microbiology*. 23:241-264.

Stumbo, C.R. (1973). “*Thermobacteriology in food processing*”. Academic Press. Londres.

Texeira, A. (1992). “*Thermal procesing calculations*”. In D.R. Heldman, & L.B. Lund, *Handbook of food engineering*. New York: Marcel Dekker.