

APLICACIONES DE INGENIERIA Y FENOMENOS DE TRANSPORTE AL ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA CONVECTIVA DE CALOR EN ALIMENTOS ENVASADOS**ENGINEERING AND TRANSPORT PHENOMENA APPLICATIONS TO CONVECTIVE HEAT TRANSFER STUDY FOR CANNED FOODS**J. Welti-Chanes^{1*}, O. Gómez-Palomares¹, F. Vergara-Balderas¹ y S. Maris-Alzamora²¹ *Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Universidad de las Américas Puebla, Sta. Catarina Mártir, Cholula, Puebla, 72820, México.*² *Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires*

Recibido 18 Junio 2004; Aceptado 11 Marzo 2005

Resumen

El desarrollo de la Industria de Procesos en las áreas biotecnológicas ha generado un gran interés en el estudio, evaluación y aplicación de los principios fundamentales de la ingeniería y fenómenos de transporte, con miras en un mejor entendimiento y optimización de dichos procesos. En el caso particular de la Ingeniería de Alimentos, la necesidad de mejora en los procesos tradicionales de conservación, y de optimización en el uso de los recursos energéticos, ha hecho que cada vez muchos de dichos principios se adapten para cubrir las necesidades mencionadas. De esta manera en los últimos años se ha profundizado en la aplicación de los fundamentos de transferencia de masa, calor y momentum al análisis de procesos complejos, como es el caso del tratamiento térmico de alimentos envasados en los cuales predomina la convección como mecanismo de calentamiento y enfriamiento. En este trabajo se presenta una breve reseña histórica de la evolución de las aplicaciones matemáticas y computacionales al análisis del calentamiento convectivo de alimentos envasados, de igual manera se da una idea general del estado del arte que guarda este tópico particular como un ejemplo de aplicaciones ingenieriles a temas vinculados con los procesos biotecnológicos, particularmente en la conservación de alimentos.

Palabras clave: fenómenos de transporte, convección, tratamiento térmico, alimentos envasados.

Abstract

Development of Process Industries in biotechnological subjects has aroused a great interest on the study, evaluation, and application of the fundamentals of engineering and transport phenomena for a better understanding and optimization of these processes. For the case of Food Engineering, these fundamentals are adapted to improve the traditional preservation processes, as well to optimize the energy use. In this way, the fundamentals of momentum, heat, and mass transfer are applied to a deep analysis of complex processes. This is the case of thermal process of foods in containers subjected to convection as the main mechanism of heating and cooling. In this work, a brief review of the evolution of mathematical and computational applications to the analysis of convective heating in canned foods is presented. In addition, a general idea of the state of the art of this topic is presented as an example of an engineering application of a subject related to biotechnological processes; particularly, the processing and preservation of foods.

Keywords: transport phenomena, convection, thermal treatment, canned foods.

1. Introducción

El tratamiento térmico de alimentos envasados es uno de los procesos más efectivos para la conservación de alimentos, y sigue siendo ampliamente utilizado para atender la creciente demanda de alimentos a nivel mundial. La esterilización térmica en la

industria envasadora involucra normalmente el uso de altas temperaturas por períodos de tiempo de diversa duración, para así asegurar la inocuidad del alimento, pero en general dichas condiciones de proceso representan gastos excesivos de energía y además pueden afectar negativamente la calidad nutricional y sensorial de los productos procesados. Por

*Autor para la correspondencia: E-mail: jwelti@mail.udlap.mx
Tel. / Fax: (22) 22292728

ello, y con el objeto de reducir los costos energéticos del proceso térmico y mejorar la calidad de los productos envasados, durante las dos últimas décadas del siglo XX y los primeros años del presente, se han incrementado los estudios sobre el análisis de los fenómenos de transporte que se presentan durante el tratamiento térmico de los alimentos, así como el desarrollo de sistemas de simulación de procesos que faciliten el entendimiento del efecto de los variables sobre dichos fenómenos y la efectividad del tratamiento. Uno de los problemas fundamentales para analizar el fenómeno de transferencia de calor en alimentos envasados líquidos, semilíquidos o mezclas de sólidos y líquidos, es el entendimiento de los fenómenos convectivos (de masa y calor) que se presentan dentro del envase y que afectan de manera importante la efectividad del proceso; por ello en éste trabajo se presenta la evolución histórica y algunas de las aplicaciones recientes en el campo de la transferencia convectiva de calor y su vinculación al tratamiento térmico de alimentos envasados.

1.1. Fundamentos de transferencia de calor en alimentos envasados

La transferencia de calor se define como la transmisión de energía desde una región a otra, y es debida al gradiente térmico que existe entre ambas, dicha transferencia es considerada una parte importante en la mayoría de los procesos en la industria química y de alimentos. Como es bien sabido el calor puede transferirse por tres mecanismos: conducción, convección y radiación. Los dos primeros mecanismos son los que participan fundamentalmente en la esterilización de alimentos envasados (Geankoplis, 1998). La transmisión por conducción se presenta a través del intercambio de energía cinética entre las moléculas, sin desplazamiento de las mismas, es decir existe una transmisión de energía

calorífica de las moléculas con mayores niveles de energía a aquellas con un nivel menor con las cuales están en contacto. En el caso de tratamiento térmico de alimentos envasados, dichas moléculas con niveles energéticos elevados se encuentran normalmente cerca de las paredes del recipiente que contiene al alimento, por lo que la energía se transmite hacia al centro del envase, siendo la conducción, un mecanismo común cuando se esterilizan materiales sólidos o muy viscosos y que presenta velocidades de calentamiento lento y tiempos prolongados para elevar la temperatura del producto.

En cambio, en la transferencia convectiva de calor la energía se transmite por una combinación de conducción de la energía almacenada y por el efecto de mezcla y movimiento del alimento líquido; dicho movimiento es promovido por una diferencia de densidades, la cual a su vez es producida en el alimento por el gradiente térmico que existe entre el líquido que se localiza cercano las paredes del envase y aquel ubicado en zonas interiores del recipiente. La convección se presenta en alimentos fluidos no pastosos y que no presentan cambios importantes en viscosidad durante el tratamiento, y en general está ligada a velocidades de calentamiento rápido y tiempos reducidos para elevar la temperatura del producto (Rao y Anantheswaran, 1988).

De acuerdo a lo anterior, y de manera general se puede afirmar que en los alimentos procesados térmicamente el calor se transfiere por una combinación de conducción-convección, y el estado físico del alimento determina el mecanismo predominante de transferencia durante el tratamiento térmico, así en alimentos muy viscosos o semisólidos predomina la conducción, en cambio en alimentos líquidos o semilíquidos el calor se transfiere mayoritariamente por convección, pero también existen algunos alimentos que su

calentamiento inicial es por convección y posteriormente por conducción, debiéndose este cambio principalmente al incremento en la viscosidad de algunos de sus componentes provocando la denominada curva quebrada de penetración de calor (López, 1981).

Actualmente existe un gran número de estudios sobre el análisis y simulación de los mecanismos de la transferencia de calor durante el tratamiento térmico de alimentos envasados, dichos estudios se han orientado al estudio de las relaciones y perfiles de tiempo-temperatura. En la mayoría de los trabajos se ha hecho referencia al mecanismo conductivo de calor (Akterian, 1994), dejando a un lado el fenómeno convectivo sobre el cual existen muy pocos trabajos experimentales. Esta carencia de información es debida entre otras cosas a las dificultades que implica el resolver y comprender las ecuaciones que simulan el fenómeno convectivo de transferencia de calor y su relación con los patrones y perfiles del tiempo y temperatura en las diferentes regiones o zonas del envase que contiene el alimento (Ghani y col., 2002, Welty-Chanes y col., 2005).

1.2. Transferencia de calor por convección en alimentos envasados

La transferencia de calor por convección en un alimento fluido envasado implica inicialmente el intercambio de energía entre la superficie sólida del envase y el fluido, en adición dentro del producto se puede generar intercambio de calor principalmente por dos mecanismos diferentes, la convección libre o natural en la cual el fluido que está más caliente y que está en contacto con la superficie sólida promueve una circulación o flujo natural debido a la diferencia de densidades que resulta del gradiente de temperaturas, y la convección forzada en la que se promueve la circulación del fluido dentro del envase por medio

dispositivos mecánicos o equipos de agitación externa al envase (Datta y Teixeira, 1987, 1988).

En el calentamiento convectivo la velocidad de penetración de calor en el alimento contenido dentro del envase puede incrementarse debido a la agitación externa que provoca procesos de mezcla dentro del mismo, cuando se está realizando el tratamiento térmico. El movimiento del producto dentro del envase mejora la transferencia de calor, y esto facilita el uso de altas temperaturas para la esterilización, y ello puede provocar que el tiempo requerido para el procesamiento sea más bajo. Con todo lo anterior se puede mejorar de la calidad del producto terminado al ser menor el tiempo de procesamiento, e incrementar la capacidad de proceso de la planta, de ahí que exista un enorme interés en conocer más en detalle los fenómenos que rigen la transferencia de calor por convección.

2. Convección natural en alimentos envasados

2.1. Estudios fundamentales

El calentamiento convectivo de alimentos en ausencia de algún tipo de agitación inducida externa es conocido como convección natural, fenómeno que se produce por el gradiente de temperaturas en el líquido ocasionando que en diferentes zonas, el líquido esté con mayor temperatura que en otras, lo que provoca el movimiento espontáneo y la agitación y mezcla del producto dentro del envase.

El análisis de la transferencia de calor por convección natural en alimentos envasados se complica debido a que el movimiento del líquido es primordial en el mecanismo de la transferencia de calor, por ello es importante conocer la distribución de la velocidad del fluido en movimiento para determinar su distribución y el perfil de temperatura resultante. La transferencia de

calor en el líquido en movimiento ocurre simultáneamente y en tal forma que los principios de conservación de masa, momento y energía forman la base para la deducción y aplicación de las ecuaciones de continuidad que gobiernan los procesos de transferencia de calor por convección en alimentos envasados tratados térmicamente (Ozisik, 1980).

Debido a lo complejo de las Ecs. de momento y energía, la solución de problemas de transferencia de calor por convección se dificulta, y en consecuencia la mayoría de los problemas que implican el fenómeno convectivo se estudian experimentalmente y los resultados se presentan en forma empírica, expresándose con grupos adimensionales. La utilidad de los grupos adimensionales en dichas correlaciones consiste en que se pueden combinar muchas variables formando pocos parámetros adimensionales, por lo tanto se reduce el número de parámetros a analizar facilitando la solución de la Ecs. (Ozisik, 1980).

El análisis, para establecer los grupos adimensionales apropiados para un problema de transferencia convectiva de calor, va determinado generalmente por el número de variables con que cuentan las ecuaciones diferenciales ya sea de momento o energía que rigen el proceso físico y por tipo de análisis en 2 o 3 dimensiones. Los números adimensionales que tradicionalmente se usan para la modelación de la transferencia de calor por convección en alimentos envasados son: Reynolds (Re), Prandtl (Pr), Nusselt (Nu), Grashof (Gr) y Rayleigh (Ra). El número de Prandtl ($C\mu/k$), es un factor, que comúnmente aparece en las relaciones experimentales y empíricas generadas para calcular el coeficiente convectivo de transferencia de calor en alimentos envasados, y representa una relación entre el movimiento del fluido y la difusividad de calor, y correlaciona físicamente el espesor relativo de la capa hidrodinámica con el de la capa límite térmica. Otro número

adimensional importante es el de Nusselt (hd/K), el cual relaciona el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) con la conductividad térmica del fluido (k) y una dimensión característica (d), ésta dimensión en muchos de los casos reportados representa el diámetro del envase.

Por otra parte una primera aproximación para entender matemáticamente la transferencia de calor convectiva es la aplicación del denominado análisis dimensional, con el cual se establecen las diferentes correlaciones experimentales de los datos de transferencia de calor. En éste análisis se usan fundamentalmente tres números adimensionales, Re, Pr, Gr, junto con el valor de parámetros importantes como la viscosidad del líquido. La combinación de dichos grupos adimensionales pueden ser usada para obtener información importante para el diseño del proceso térmico, como lo son los gradientes de temperatura entre las paredes del envase y el fluido, además de que se utilizan para entender el efecto del aumento de la temperatura en un fluido (Rao y Anantheswaran, 1988).

Los primeros estudios que trataron de describir el fenómeno convectivo en alimentos envasados fueron realizados por Jones (1931) y Jackson and Olson (1940), en ellos se enfocaban a la determinación de los dos parámetros clásicos empleados para caracterizar el tipo y velocidad de transferencia de calor en un alimento envasado: f (velocidad de transferencia de calor) y j (factor de inercia) de la curva de penetración de calor. Posteriormente y partir de 1960 se generaron estudios sobre el calentamiento y enfriamiento transitorio de alimentos envasados (en ausencia de agitación externa), en los cuales se empezaron a aplicar conceptos de los números adimensionales para el cálculo del coeficiente convectivo de calor considerando diversas geometrías del envase. Los estudios hechos por Blaisdell (1963) mencionaban que

la convección empieza en la superficie lateral del envase, y una capa límite turbulenta era observada por la gran diferencia de temperatura dentro del producto. Se encontró que el tiempo requerido para que iniciara la convección era una función de los números adimensionales Prandtl (Pr), Rayleigh (Ra), Nusselt (Nu), además del módulo de Fourier para el fluido y también de la forma del envase. En otros estudios Evans y Stefany (1966) calcularon el número de Rayleigh (Ra), empleando envases cilíndricos que contenían diferentes solventes, variaron la longitud y diámetro del cilindro, y determinaron los coeficientes de transferencia en función del tiempo. El coeficiente convectivo, para las características del equipo que utilizaron, y considerando un radio del envase comprendido entre 0.75 a 2.0 cm. para una temperatura del medio de calentamiento de 50°C se podría determinar por la siguiente expresión:

$$Nu = 0.55 Ra^{0.55} \quad (1)$$

Por otra parte y dentro de los numerosos estudios orientados a conocer los patrones de flujo y los perfiles de temperatura en procesos de calentamiento convectivo, sobresalen los realizados por Hiddink (1975), quien aplicó un método de haz o luz de partículas para observar los patrones de flujo durante el calentamiento de un fluido en un envase de cilindro construido en parte de vidrio, para ello utilizó pequeñas partículas brillantes suspendidas en el líquido, y pasó a través del fluido, contra un fondo oscuro, un delgado y angosto haz de luz, lo que permitía observar los patrones de flujo y definir las zonas donde existía movimiento. Adicionalmente, y para analizar los perfiles de temperatura Hiddink (1975) monitoreó la temperatura en varios puntos dentro del envase en función del tiempo, y encontró que durante el calentamiento, la transferencia de calor a través de la tapa o fondo del envase produce una estratificación térmica, por lo

que el líquido que se calienta sobre la capa circundante a la tapa asciende y se extiende hacia a la parte superior del envase. El calentamiento de la parte baja del envase provocaba remolinos, y cerca del fondo del envase la penetración de calor aumentaba en ciertos espacios laterales a lo largo de la lata, y conforme continuaba el calentamiento, estos espacios decrecían y las líneas que dirigían el flujo de la capa estratificada iban disminuyendo. Un cambio en la pendiente del perfil de la temperatura fue detectado también en la parte superior de la región de remolino, y también se encontró que el perfil de la temperatura era más uniforme conforme aumentaba el tiempo. De acuerdo a los resultados de estos estudios experimentales Hiddink (1975) determinó la zona de calentamiento lento (ZCL) en el calentamiento convectivo de fluidos, y determinó que el punto frío se encontraba por debajo del centro geométrico del envase. De éstos estudios se generó una correlación para el cálculo del coeficiente convectivo (Ec. 2), en la cual se usó el radio del envase como la dimensión característica en los números de Nusselt y Grashof, y se incluyó el efecto del número de Prandtl.

$$Nu = 0.31 [(Gr)(Pr)]^{0.268} \quad (2)$$

Zechman y Pflug (1989) correlacionaron los datos de transferencia de calor con una Ec. similar a la (2), excepto que supuso que la dimensión característica era la relación del volumen del líquido entre el área superficial de contacto del producto con el envase (V_f/A_f). Utilizando diferentes términos, propuso la Ec. (3) para calcular el valor f para el calentamiento de agua para cualquier tamaño de envase. En dicha Ec. se consideran propiedades del producto, tales como capacidad calorífica, densidad, viscosidad, así como los gradientes de temperatura que se mantienen dentro del sistema a lo largo del proceso.

$$f = 3.34\rho_0(C_{pk})^{0.76} \left[\eta / (g\beta\Delta T\rho^2) \right]^{0.24} (V_f/A_f)^{1.28} \quad (3)$$

Como puede observarse en los modelos anteriores, y hasta hace quince a veinte años, la mayoría de las correlaciones para predecir el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) eran semiempíricas y dependían de las propiedades físicas del fluido, del régimen y de la velocidad del flujo, de la diferencia de temperaturas y la geometría del sistema considerado. Sin embargo en los últimos años el trabajo de investigación se ha centrado en resolver las Ecs. diferenciales parciales que gobiernan el proceso de transferencia convectivo y con ello definir el movimiento de diferentes fluidos y los perfiles de temperatura del mismo dentro de envases diversos. La solución matemática de dichas Ecs. es un problema complejo, ya que el calentamiento por convección natural del alimento provoca que la ZCL esté en diversas regiones, y que dicha zona tenga movimiento continuo debido a la diferencia de temperaturas del líquido dentro del envase sobre todo al inicio del proceso de calentamiento.

Adicionalmente los estudios experimentales muestran que la ubicación de la ZCL depende de la orientación del envase al ser calentado, (posición vertical, horizontal, o ligeramente inclinada), (Datta y Teixeira, 1988). Por todo lo anterior a continuación se presentan algunas de las propuestas matemáticas generadas para describir el movimiento del líquido y los perfiles de temperatura en el mencionado calentamiento convectivo.

2.2. Soluciones numéricas para predecir la temperatura transitoria y perfiles de velocidad en el calentamiento por calor convección natural de alimentos líquidos envasados

Stevens (1972) fue el primero en presentar una solución numérica para las Ecs.

diferenciales parciales (EDP) que gobiernan el calentamiento por convección natural en alimentos líquidos envasados. Las Ecs. que requieren ser resueltas por métodos numéricos son la de la conservación de la energía, las Ecs. de vorticidad y una ecuación para obtener la velocidad transitoria y la temperatura para varios límites del recipiente o para las paredes de la lata. Datta y Teixeira (1987) resolvieron numéricamente las Ecs. monodimensionales gobernantes de la transferencia de calor convectiva de un fluido en un recipiente de radio R y una longitud Z , éstos investigadores involucraron la Ec. de la conservación de masa y energía usando correlaciones de los números adimensionales para un cilindro finito, para así poder calcular el coeficiente convectivo de calor. Posteriormente Datta y Teixeira (1988) presentaron soluciones numéricas para predecir los patrones de flujo transitorio y los perfiles de temperatura durante el calentamiento por convección natural de un líquido en un recipiente cilíndrico tratado térmicamente con vapor a 121°C . El desarrollo del modelo por parte de éstos investigadores para la transferencia de calor por convección natural está basado en el movimiento del líquido, que como ya se revisó anteriormente se debe principalmente a la diferencia de densidades ocasionada por la diferencia de temperatura del líquido provocando una agitación natural que se ve favorecida por la temperatura de las paredes del envase. Entre las EDP que gobiernan tales movimientos del fluido en un espacio cilíndrico son fundamentalmente las Ecs. de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas.

Las EDP fundamentales que han sido resueltas tal y como se menciona anteriormente, incluyen la Ec. de balance de energía, de análisis del momento en dirección vertical y en dirección radial y la Ec. de continuidad. Las condiciones límite para resolver las Ecs. anteriores se han establecido tomando en cuenta la posición del fluido en

diferentes partes del envase. Adicionalmente se considera que inicialmente el fluido se encuentra a una temperatura uniforme

Las Ecs. de velocidad junto con las Ecs. que sirven para evaluar la temperatura se deben de resolver en forma simultánea y puede emplearse el modelo del elemento finito para encontrar la solución correspondiente.

De acuerdo a los trabajos de Datta y Teixeira (1988) los resultados del patrón de flujo al utilizar como fluido modelo al agua, explican que entre más alejado esté el líquido de las superficies o paredes del recipiente menor será su temperatura; el flujo del líquido muestra un comportamiento de recirculación, en el cual inicialmente el líquido comienza a desplazarse de las paredes del envase hacia el interior conforme va aumentando la temperatura, desplazamiento que depende del tamaño del envase. Este desplazamiento puede darse por ambos lados en el envase, y en el fondo del mismo dichos flujos se mezclan y caen uniformemente hacia el centro de la lata en forma radial, formándose pequeñas capas las cuales se van separando a lo largo del flujo circulatorio. Es importante mencionar que este comportamiento varía un poco dependiendo del tiempo de procesamiento, al final los dos flujos formados en ambos lados del recipiente se comienzan a mezclar hasta formar un ciclo circulatorio continuo. La ZCL fue localizada un poco alejada del centro del envase en forma de aros o anillos conformando una región que se ubica cerca fondo del envase, a un 15% de la altura. Durante el calentamiento por convección natural los patrones discontinuos de flujo no siguen el mismo comportamiento durante todo el procesamiento térmico, debido a la flotabilidad del líquido provocado por la diferencia de temperatura, lo que ocasiona que la ZCL que normalmente se ubica en la parte del fondo del recipiente cambie de lugar de una manera secuencial, es decir dicha región se puede ubicar en distintas posiciones

dependiendo del tiempo que lleva el alimento fluido envasado en el tratamiento térmico, esto último provoca la migración de la zona, por lo que los estudios para predecir los patrones de flujo y temperatura transitoria se han realizado con diferentes orientaciones del recipiente o envase, y usando diferentes líquidos de diferente viscosidad, o incluso alimentos muy viscosos y que tienen muy poco espacio de cabeza. Otra contribución importante al estudio de la convección natural en alimentos líquidos de alta viscosidad es el realizado por Kumar y col., (1990), estos investigadores también presentan soluciones numéricas del problema de transferencia de calor. De cualquier forma para relacionar el movimiento complejo del líquido con los cambios de temperatura del producto dentro del envase se requiere de la aplicación de nuevas herramientas de análisis y computacionales como lo es la denominada fluidinámica computacional.

2.3. Uso de la fluidinámica computacional (FDC) en la simulación del tratamiento térmico de alimentos envasados

Actualmente existen simuladores numéricos que predicen el comportamiento de los parámetros que son importantes para optimizar los procesos térmicos, como son: los perfiles de temperatura y concentración, y los patrones de flujo durante la transferencia de calor por convección natural al tratar térmicamente alimentos líquidos envasados. Uno de éstos simuladores es el denominado Fluidinámica Computacional, que emplea el software denominado PHOENICS (1991), y es una herramienta de diseño que ofrece muchas ventajas para evaluar los estudios de penetración de calor, y ayuda a una mejor comprensión de los mecanismos que gobiernan los procesos térmicos, así como los complejos mecanismos físicos y los efectos de las propiedades reológicas de los alimentos (Ghani y col., 2003a, Grijspeerdt y

col., 2003). Adicionalmente con la FDC se pueden realizar las predicciones teóricas de las pérdidas de nutrientes importantes del alimento, como por ejemplo la vitamina C, además el programa permite predecir la velocidad de muerte de microorganismos. (Ghani y col., 1999a, b, 2003b) El uso de FDC permite analizar y resolver a través de técnicas numéricas las EDP que gobiernan los patrones de flujo de calor transitorio y los perfiles de temperatura, lo que ayuda a conocer en detalle el calentamiento y la transferencia de calor en las diferentes zonas del envase que contiene a un alimento, y logra la ubicación de la ZCL o el llamado punto frío, a pesar de que tal y como se ha mencionado antes ésta se encuentra en movimiento continuo durante el progreso del calentamiento. Uno de los parámetros que se obtiene con las herramientas computacionales mencionadas, es la difusividad térmica (α) con la cual se puede calcular el mencionado término f el cual es fundamental para el diseño de procesos térmicos. La relación entre la difusividad y el valor de f en calentamiento convectivo se presenta en la ecuación (13), y refleja el efecto de las dimensiones del envase, radio (R) y altura (H)

$$\alpha = \frac{0.398}{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{0.427}{H^2}\right)f} \quad (4)$$

Uno de los propósitos de obtener la difusividad térmica del alimento de la curva de penetración de calor es precisamente para hacer uso de los parámetros de penetración de calor como f , j , etc., y con ello simular la transferencia de calor en los alimentos envasados. Los avances que muestran el uso del simulador mencionado básicamente se han enfocado en la predicción de la historia de la relación tiempo-temperatura del producto en cualquier zona o punto del envase para diferentes condiciones de

proceso y para diferentes tamaños de recipientes. A continuación se comentan algunos trabajos experimentales para predecir patrones de flujo y velocidades transitorias empleando FDC. Ghani y col. (1999b), realizaron una simulación numérica del calentamiento por convección natural en alimentos envasados con el uso de FDC, considerando un recipiente asimétrico, tratando dos sistemas, uno viscoso a base de carboximetil celulosa de sodio (CMC) y el otro a base de agua, estos investigadores supusieron constantes las propiedades del sistema, excepto la viscosidad y la densidad y resolvieron de manera simultánea las ecuaciones que gobiernan los procesos de transferencia de calor por convección natural, continuidad, conservación de energía y momento en 2 direcciones vertical y radial. Además se supuso que la viscosidad del agua y CMC estaba en función de la temperatura, y que se podría calcular por medio de un polinomio de orden 2, tal y como se muestra en la Ec. (5).

$$\mu = a + bT + cT^2 \quad (5)$$

Para el cálculo de la variación de la densidad con respecto a la temperatura utilizaron la siguiente expresión:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (6)$$

Donde β es el coeficiente de expansión térmica del líquido, T_0 y ρ_0 son la temperatura y densidad de las condiciones de referencia.

El resultado de la simulación mostró que la acción de la convección natural promueve el movimiento de la ZLC o punto frío hacia el fondo del envase. La región y forma de la zona es diferente para el agua y CMC, y se requiere de aproximadamente 10 veces más de tiempo para alcanzar la temperatura de la retorta en el punto frío del

líquido viscoso (CMC) en comparación con el agua. En este estudio la ZLC se localizó al final del tratamiento en forma de aros o anillos a una distancia de 10% al 15% de la altura de la lata tomando como base el fondo, sin embargo, a lo largo del proceso, dicha zona mostró movimiento o migraciones hacia el fondo de la lata. El líquido dentro del recipiente mostró un incremento de la temperatura conforme los puntos eran más cercanos a la parte alta de la lata, también se encontró que la velocidad de calentamiento era mucho más rápida, cuando se supuso que la velocidad es una función de la temperatura, en lugar de ser un constante.

En otro trabajo Ghani y col. (2002) utilizaron FDC para predecir los parámetros térmicos en la esterilización a 121° C en latas cilíndricas metálicas colocadas horizontalmente conteniendo sopa de zanahoria y naranja, y simulando una geometría 3D. Las EDP que describen la conservación de masa, momento y de la conservación de la energía son resueltas numéricamente por FDC empleando el método de análisis del volumen finito. Estos investigadores emplearon las Ecs. de conservación de la energía y de momento en dirección vertical y radial, y generaron algunas modificaciones para considerar un análisis en tres dimensiones en la Ec. de momento en dirección vertical (z), y para el análisis de la tercera dimensión generaron la Ec. de momento en dirección angular (θ) y en la Ec. de continuidad se incluyó la dimensión angular.

El resultado de la simulación mostró la influencia de la convección natural sobre los patrones de flujo y movimiento rotacional del líquido en el envase, provocado por la agitación natural que se produce sobre la ZCL, con ello se analizó y se comparó que el punto frío tiene un cierto movimiento por las regiones de la parte baja del fondo de la lata, ello por la influencia de la formación de flujos secundarios que se registraron en la

experimentación, los cuales no son estimados cuando no se usa el FDC. Además este fenómeno secundario tiene influencia en el movimiento de la ZLC forzando un movimiento de ésta hacia la parte baja de la lata, hasta que finalmente permanece en la región que se ubica cerca del 20-25% de la altura de la lata, específicamente en la parte baja de la lata. Además comparando con los experimentos realizados a envases en posición vertical resultaba evidente, por los patrones de flujo mostrados, que existe un calentamiento mucho más rápido, lo cual es un indicativo de que la posición vertical mejora la transferencia de calor por convección natural en este tipo de alimentos líquidos. Es interesante mencionar los estudios realizados por Ghani y col., (2001), con el mismo tipo de alimento pero envasado en bolsas flexibles y tratado térmicamente, el uso de FDC también generó resultados adecuados para predecir el perfil de temperatura en este caso específico.

En otros trabajos experimentales se ha usado FDC para evaluar la distribución y muerte de microorganismos en alimentos líquidos durante su esterilización térmica, Ghani y col. (1999b) estudiaron la inactivación de bacterias, para ello las Ecs. de movimiento, energía y continuidad, descritas anteriormente, fueron resueltas por los métodos del elemento y volumen finito, y en ellas se incluyeron la concentración y número de bacterias sobrevivientes, adicionalmente se empleó la Ec. de Arrhenius para describir la cinética de inactivación, y para modelar la difusión de la bacteria dentro del alimento se usó la Ec. modificada de la difusión Browniana. Un aspecto interesante de este trabajo es la Ec. (7) empleada para calcular concentración microbiana, en la que se involucran la constante de primer orden de inactivación microbiana (k_t), y el coeficiente de difusión (D) de los microorganismos.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial r} + u \frac{\partial C}{\partial z} = D \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] - k_T C \quad (7)$$

En el estudio se consideró que velocidad de inactivación de microorganismos sigue una cinética de primer orden, y que tal y como se mencionó previamente la constante de reacción (k_t) es una función de la temperatura que se describe por la ecuación de Arrhenius (Ec. 8).

$$k_t = A e^{-E_a/RT} \quad (8)$$

Donde A es el factor de frecuencia de la reacción, t el tiempo de exposición, E_a es la energía de activación, R la constante de los gases ideales y T la temperatura absoluta. Una de las contribuciones de dicho trabajo se refiere a que al modelar la muerte microbiana suponiendo una cierta viscosidad del fluido, se genera una Ec. combinada entre la Ec. de Stokes-Einsten y la de Nernst-Einsten, la cual relaciona la difusividad con la fuerza requerida para el movimiento de partículas esféricas (considerando como partículas esféricas a las bacterias presentes en el fluido) con el coeficiente de difusión D.

$$D = \frac{kT}{6 \pi \eta \mu} \quad (9)$$

Los resultados que obtuvieron mostraron que además de los flujos circulatorios sobre las paredes del envase, característicos del calentamiento por convección natural, existía un pequeño flujo al final del envase en sentido inverso a los flujos laterales, lo que provocaba que la temperatura se incrementara al acercarse a la parte superior de la lata. La ZLC cubría la parte seccional baja de la lata con una pequeña migración hacia el centro del fondo de la misma, ocasionada por la formación de un segundo flujo pequeño, pero en general se estacionaba o se encontraba en alrededor del 10 al 15% en la parte baja del tamaño de la lata. La concentración de las bacterias resultó

dependiente de la distribución de la temperatura y del patrón de flujo del líquido. El efecto de la difusión en la velocidad de esterilización no fue importante, en parte debido a la alta viscosidad del líquido usado en la simulación (Ghani y col., 1999b).

3. Transferencia de calor por convección forzada en alimentos envasados

El uso de agitación externa en alimentos envasados por medio de dispositivos mecánicos puede mejorar el sabor, color y textura del alimento, entre otras cosas; además de que facilita la agitación y evita la separación de los ingredientes del alimento durante el procesamiento térmico (Nicholas y col., 1960). Pero lo más importante es que puede mejorar el proceso de transferencia de calor y hacer el proceso térmico más efectivo. Mansfield (1962) sugirió que existen algunos alimentos que al ser tratados térmicamente en ausencia de agitación, presentan como mecanismo principal de transferencia de calor a la conducción; pero cuando estos eran sometidos a pruebas experimentales en agitadores axiales, se podía inducir el fenómeno convectivo, mencionando entre estos alimentos algunas cremas, espagueti y alimentos sólidos que contienen pequeñas cantidades de sustancias líquidas. Pero en el caso de alimentos que claramente presentan convección existen diversos factores que afectan la transferencia de calor por convección forzada siendo lo más importante: el espacio de cabeza, la relación sólido-líquido, la consistencia del producto, y la velocidad de agitación (Rao y Anantheswaran, 1988). Evidentemente el sistema de agitación influye sobre el proceso convectivo por ello una gran variedad de estudios se han realizado para determinar y analizar la transferencia convectiva de calor en equipos con diferentes mecanismos de agitación y se han generado modelos

matemáticos específicos para analizar los fenómenos de transferencia de calor. La mayor parte de los estudios específicos de convección forzada y su relación con el equipo empleado fueron desarrollados en la década de los ochenta, siendo las contribuciones más recientes aquellas que incluyen el efecto de la convección forzada en presencia de partículas sólidas en un alimento líquido (Sablani y col., 2003)

3.1. Equipos de tratamiento térmico con mecanismos de agitación.

Sterilmatic es una retorta a presión constante, en la cual los envases son transportados sobre rieles dentro de la retorta, los rieles tienen divisiones para dar cabida a cada uno de los envases. Durante el ciclo rotacional del equipo, los envases rotan en la dirección del riel, pero adicionalmente los envases tienen diferentes movimientos rotacionales en los compartimentos, lo que ocasiona su libre giro durante el proceso térmico. Lenz y Lund (1978) desarrollaron una ecuación para describir la transferencia de calor de alimentos líquidos en este tipo de equipos, evaluando efecto del tamaño del envase, la viscosidad del fluido, temperatura del vapor de calentamiento y la velocidad del riel. Estos investigadores estimaron el coeficiente convectivo de transferencia de calor en las paredes de la lata usando un programa computacional y datos experimentales de temperatura y tiempo. Basados en los datos obtenidos generaron la expresión que se presenta en la Ec. (10).

$$Nu = 115 + 15 Re^{0.3} Pr^{0.08} \quad (10)$$

Berry y Bradshaw (1980) encontraron que los factores del equipo Sterilmatic que afectaban la velocidad de penetración de calor en crema condensada eran la magnitud del espacio de cabeza, la velocidad de rotación de la lata, y

la consistencia del producto. Rao y col. (1985), realizaron estudios con productos similares a los de Berry y Bradshaw (1980), e incluyeron estudios con líquidos como la glicerina, y soluciones acuosas de sacarosa con diferentes concentraciones, y evaluaron los coeficientes de transferencia de calor convectiva tanto para líquidos newtonianos como para no newtonianos. El coeficiente de transferencia de calor en la pared del envase (Nu_d) para los fluidos newtonianos y no newtonianos fue determinado tomando como base la siguiente Ec.

$$Nu_d = A [(Gr)(Pr)]^B + C [(Re_d)(Pr)(D/L)]^D \quad (11)$$

En donde las constantes A , B , C y D fueron determinadas de datos experimentales, y sus valores corresponden a 0.135, 0.323, 3.91×10^{-3} , y 1.369 respectivamente para fluidos newtonianos, los parámetros D y L representan el diámetro y longitud del envase, y Re_d es el número de Reynolds medido en la pared del envase.

End-Over-End (EOE) es una retorta continua en la cual los envases rotan alrededor de la línea circular de la autoclave en un plano vertical, la ventaja de este tipo de agitador es que el espacio de cabeza de la lata está en continuo movimiento a lo largo del recipiente, lo que asegura una completa mezcla del contenido de la lata. Este método de rotación fue propuesto por Clifcorn y col., (1950), quienes encontraron que el sistema de agitación utilizando agua como el fluido para experimentar en varias pruebas con diferentes espacios de cabeza, requiere de menor energía mecánica que la rotación por el sistema axial, y el tiempo de subida de temperatura o come up time (CUT) fue menor conforme se incrementaba el radio de rotación en el equipo. El principio de agitación para el contenido de los envases en el sistema EOE viene determinado por la

acción de la fuerza centrífuga y por efecto de la gravedad, y las Ecs. que manifiestan la acción de ambas fuerzas vienen definidas por la máxima velocidad de rotación (N) con relación al radio de rotación (Rr) y dicha velocidad máxima puede ser calculada por las Ecs. (12) y (13).

$$N = \left[\frac{9.8}{\pi 4 Rr} \right]^{0.5} \quad (12)$$

$$N = \frac{0.498}{Rr^{0.5}} \quad (13)$$

Estudios posteriores para evaluar diferentes parámetros en sistemas agitados EOE fueron realizados primeramente por Parchomchuk (1977) quien evaluó el efecto del sistema de agitación con respecto a la velocidad de penetración de calor en soluciones acuosas de alta viscosidad contenidas en envases 603 x 700 y con un espacio de cabeza del 0.5%. Se utilizó un rango de velocidad de 27 a 144 rpm, obteniendo la máxima velocidad de penetración de calor a 40 rpm. Duquenoy (1980) estudió la transferencia convectiva de calor usando diferentes soluciones, con diferentes concentraciones de sólidos del 10 al 80% (p/p), utilizando un intervalo de la relación longitud-diámetro (L/D) para los envases evaluados de 0.936 a 2.02: Al final llegó a la expresión (14) que se presenta en términos de números adimensionales, donde el termino We representa la mitad de la altura del envase.

$$Nu = (17 \times 10^5) Re^{1.449} Pr^{1.19} We^{-0.551} (D/2L)^{0.932} (V_p/V_c)^{0.628} \quad (14)$$

Otras correlaciones para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor para este tipo de agitación vienen dadas en términos de números dimensionales, Naveh y col. (1983) presentaron la siguiente expresión (15).

$$2.319 (Gr Pr)^{0.218} + 4.10 \times 10^{-7} (Re_D Pr D/L)^{1.836} \quad (15)$$

Rao y Anantheswaran (1988) evaluaron la penetración de calor en latas con fluidos modelo empleando el equipo EOE, y encontraron que la velocidad de transferencia de calor era independiente del tamaño y del radio de la lata en un rango de 0-14.9 cm. También encontraron que el volumen del espacio de cabeza en un rango de 3-9% no afectaba significativamente la velocidad de transferencia de calor, por lo que concluyó que la presencia de un espacio de cabeza mínimo brinda la agitación suficiente durante la rotación del alimento en la lata. Basados en sus datos los investigadores desarrollaron la ecuación (16) para predecir los coeficientes de transferencia de calor.

$$Nu = 2.9 Re^{0.436} Pr^{0.287} \quad (16)$$

Por otra parte en los esterilizadores de rotación axial las latas rotan axialmente a lo largo de la retorta, alcanzando velocidades superiores a 500 rpm, Quast y Siozawa (1974) estudiaron la transferencia de calor en estos equipos usando soluciones de sacarosa a varias concentraciones, encontraron que en general los coeficientes de transferencia de calor evaluados eran similares para los diferentes tamaños de lata, y al usar las soluciones más viscosas, dicho coeficiente se incrementaba al incrementar el espacio de cabeza. La Ec. desarrollada (17) para describir la transferencia de calor, incluye los efectos de los números de Reynolds y Prandtl, y de la relación de la longitud con el diámetro (L/D) del envase.

$$Nu_D = 0.55 (Re) (Pr)^{0.33} (L/D)^{0.33} \quad (17)$$

Soule y Merson (1985) estudiaron el efecto de la rotación axial con respecto al coeficiente de transferencia de calor usando líquidos con comportamiento newtoniano, el

medio de calentamiento utilizado fue vapor, el fluido consistía en agua destilada mezclada con aceite de silicón, en envases de tamaño comercial con una proporción de longitud diámetro (L/D) de 1.11, 1.32 y 1.61, el espacio de cabeza de 1 cm e involucrando una nueva variable al efectuar un vacío de 20 in. Sugirieron que el vacío permitía una mejor vaporización y agitación del líquido, los coeficientes de transferencia obtenidos de la experimentación fueron evaluados de acuerdo a la Ec. (18), en donde además de números adimensionales se incluye en el efecto de las dimensiones del envase y del valor de la viscosidad en comparación con la del agua.

$$Nu_D = 0.434 Re_D^{0.57} Pr^{0.278} (L/D)^{0.356} (\eta/\eta_w)^{0.154} \quad (18)$$

En la actualidad, los avances en la mejora de los diseños de autoclaves que promuevan el movimiento del alimento dentro del envase se han basado en los desarrollos anteriormente descritos, por ello las ecuaciones mencionadas en este apartado siguen siendo vigentes para los propósitos de análisis y diseño de procesos térmicos

4. Análisis de la transferencia de calor por convección con la presencia de partículas sólidas

Existen algunos productos alimenticios envasados que contienen partículas sólidas, en los cuales se supone que el calor es transferido primero al fluido y posteriormente del fluido a las partículas. Esto ocasiona que durante el proceso, la presencia de estas partículas altere, entre otras cosas, los patrones de flujo y posiblemente contribuye a mezclar el contenido de la lata debido a su movimiento. Los estudios relacionados con la presencia de partículas se han basado en experimentos con diferentes tamaños de partícula y espacio de cabeza, en algunos alimentos existen correlaciones para

determinar los parámetros de transferencia de calor que incluyen también parámetros sobre las propiedades viscoelásticas del alimento. En un trabajo pionero Lenz y Lund (1978) generaron modelos matemáticos en sistemas con partículas esféricas en retortas sterilmatic y el coeficiente de transferencia de calor para la interfase fluido-partícula fue determinado a través de la ley de enfriamiento de Newton; encontraron que la magnitud de dicho coeficiente es una función de las propiedades de fluido, de la velocidad de rotación de la retorta y desarrollaron una ecuación para predecir el coeficiente de transferencia de calor para la interfase del fluido con la pared del envase en presencia de partículas esféricas, tal y como se muestra en la Ec. (19).

$$Nu = -33 + 53 Re^{0.28} Pr^{0.14} [D_p/R_T(1-\epsilon)]^{0.46} \quad (19)$$

Por otra parte Hiddink (1975) encontró que la presencia de partículas sólidas reduce la velocidad de la transferencia convectiva en fluidos viscosos, midió los perfiles de temperatura dentro del envase lleno con agua y diversos fluidos viscosos. Encontró que las partículas pequeñas reducen el coeficiente de transferencia, entre el medio de calentamiento y el fluido, pero este se incrementaba cuando el diámetro de las partículas se encontraba entre 3 a 6 mm, este efecto del tamaño de las partículas sobre el valor del coeficiente lo atribuyó a la alteración en el flujo de la capa o superficie de contacto del líquido con la pared del envase. Lenz y Lund (1978) evaluaron el coeficiente de transferencia de calor en presencia de diferentes tamaños de partículas, experimentaron con envases conteniendo champiñones, reportaron que el valor del coeficiente de transferencia estaba fuertemente influenciado por el tamaño del alimento y establecieron una ecuación utilizando números adimensionales que

dependían del radio de la partícula, hasta llegar a la expresión (20):

$$Nu = 0.01561[(Gr)(Pr)]^{0.529} \quad (20)$$

En los estudios de Lenz y Lund (1978) y en otros posteriores de Anantheswaran y Rao (1985), Deniston y col. (1987), Fernández y col. (1988), Rao y Anantheswaran (1988) y Stoforos y Merson (1991, 1992), se emplearon termopares rígidos para medir las temperaturas del líquido y las partículas, dichos termopares tenían el inconveniente de limitar el movimiento de las partículas. Más recientemente se desarrolló una técnica para medir el coeficiente convectivo de transferencia de calor utilizando un termopar delgado y flexible (Sablani y Ramaswamy, 1998, 1999, Krishnamurthy y col., 2001). En uno de los estudios más recientes Sablani y col. (2003), realizaron una evaluación detallada de los factores que influyen en la transferencia de calor de alimentos enlatados que contienen partículas y que son sometidos a agitación. Encontraron que cuando el líquido dentro del envase era Newtoniano, su viscosidad y la velocidad de rotación del envase eran los factores que tenían mayor efecto sobre el valor de f del proceso y sobre el parámetro Co/Fo , en donde Co es el denominado factor de cocción en minutos y Fo la letalidad del proceso también en minutos. En ese mismo tipo de fluidos, el factor de inercia de la curva de calentamiento (j) era afectado fundamentalmente por la concentración de partículas y la velocidad de rotación. Con fluidos no-Newtonianos el valor de f era afectado fundamentalmente por la concentración de goma usada en la formulación de los sistemas modelo y por la velocidad de rotación, mientras que j se veía afectado principalmente por la concentración de partículas. Estos investigadores emplearon termopares diseñados especialmente para medir los perfiles de temperatura e interferir al mínimo con el movimiento de las partículas dentro del

envase, adicionalmente presentaron un procedimiento simple para calcular la transferencia convectiva de calor y su relación con la efectividad del proceso térmico. Por otra parte Ramaswamy y Zareifard (2000, 2003) y Zareifard y Ramaswamy (2001) desarrollaron metodologías experimentales y matemáticas que permiten evaluar los coeficientes convectivos de transferencia de calor alrededor de partículas que se mueven y desplazan a través de un tubo cilíndrico.

5. Calidad sensorial y nutricional e inocuidad de alimentos

Desde el punto de vista de la calidad nutricional y en otros aspectos de alimentos sometidos a tratamiento térmico, Holdsworth (1997) resume algunas herramientas de optimización, planteando la máxima retención de nutrientes, así como de otros factores de calidad, a un tiempo de proceso mínimo, con el consiguiente ahorro energético, y concluye que el uso de un perfil de temperatura variable puede ser útil para retener la calidad de alimentos sometidos a calentamiento por conducción. Ideas similares apoyadas por programas de cómputo se pueden usar para el caso de alimentos sometidos a calentamiento convectivo. Es importante determinar los parámetros cinéticos para cuantificar inactivación de microorganismos, enzimas y factores de calidad en el intervalo de temperaturas de interés. Este puede ser un campo de estudio de mucha relevancia para diversos alimentos (Rodrigo, Martínez y Rodrigo, 2002). En cuanto a la inocuidad de un alimento sometido a tratamiento térmico, se requiere la identificación de condiciones del proceso, así como de preparación de un alimento en condiciones extremas (peor caso) que puedan ocurrir durante la producción del alimento, para hacer una evaluación y establecer las condiciones para la obtención de productos seguros.

Conclusiones

Los avances en el conocimiento en áreas específicas de las ciencias e ingeniería, así como los de los desarrollos matemáticos y computacionales han apoyado en los últimos años al entendimiento de muchos procesos de transformación en áreas diversas de la biotecnología. En el campo específico de la conservación y transformación de alimentos, muchos de los conceptos de la ingeniería química y de fenómenos de transporte han sido de gran utilidad para describir cuantitativamente procedimientos cuyo origen era más bien descriptivo. En el caso específico del tratamiento térmico de alimentos, las nuevas orientaciones en mejora de calidad y reducción de gastos energéticos, han motivado a empresas y centros de investigación al desarrollo de estudios detallados de los fenómenos que controlan la transferencia de calor, la destrucción de microorganismos y los cambios de calidad de los productos. Para el caso específico de procesos térmicos en donde la transferencia convectiva predomina la información que se tiene actualmente aún no es suficiente para entender completamente dichos procesos, por ello se requiere conocer lo que se tiene ya resuelto y cual es el vacío del conocimiento que debe cubrirse. En general en el procesamiento de alimentos hay que pasar de las descripciones cualitativas que aún predominan en muchos casos, a aquellas de índole fenomenológica y cuantitativa.

Nomenclatura

A	Área (m^2)
A_c	Absortividad del envase
C_p	Capacidad calorífica ($J/Kg \cdot ^\circ K$)
E_a	Energía de activación (kJ/Kg .)
f_h	Tiempo requerido para alcanzar una reducción de un ciclo logarítmico en la diferencia de temperatura entre el medio de calentamiento y la temperatura del líquido o producto (s)

g	Aceleración de la gravedad (m/s)
h	Coefficiente de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot ^\circ K$)
H	Altura de la lata (m)
j	factor de inercia de la curva de calentamiento, intercepto de la gráfica semilogarítmica de tiempo-temperatura para la curva de calentamiento del alimento
k	Conductividad térmica ($W/m \cdot ^\circ K$)
L	Longitud del envase (m)
L/D	Relación entre la longitud y diámetro del envase
N	Velocidad de rotación
R	Constante de los gases ideales (8.314 $kJ/kg \cdot ^\circ K$)
t	Tiempo (s)
T	Temperatura ($^\circ K$)
T_o	Temperatura inicial ($^\circ K$)
T_s	Temperatura del medio de calentamiento ($^\circ K$)
U	Coefficiente global de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot ^\circ K$), m/s
V	Velocidad, componente en velocidad radial (m/s)
V_c	Volumen del envase (m^3)
V_p	Volumen del líquido (producto) (m^3)
ρ	Densidad (Kg/m^3)
α	Difusividad térmica (k/C_{pp}), (m^2/s)
β	Coefficiente de expansión térmica del líquido ($1/^\circ K$)
η	Viscosidad de un líquido Newtoniano ($Pa \cdot s$)
η_a, μ	Viscosidad aparente ($Pa \cdot s$)
θ	$(T-T_o)/(T_s-T_o)$

Subíndices

o	Valor inicial
i	Valor instantáneo
p	Valor de la partícula
w	Evaluado a la temperatura de la pared del envase
ref	Líquido o material de referencia

Referencias

- Akterian, S.G. 1994. Numerical simulation of unsteady heat conduction in arbitrary shaped canned foods during sterilization processes. *Journal of Food Engineering* 21, 343-354.
- Anastheswaran, R.C. y Rao, M.A. (1985). Heat transfer to model non-Newtonian liquid foods in cans during end-over-end rotation. *Journal of Food Engineering* 4, 21-35.
- Berry, M.R., y Bradshaw, J.G. (1980). Heating characteristics of condensed cream of celery soup in a Steritort: Heat penetration and spore count reduction. *Journal of Food Science* 45 869-874, 879.
- Blaisdell, J.L. (1963). *Natural convection heating of liquids in unagitated food containers*. Ph. D. thesis. Michigan State University, East Lansing.
- Clifcorn, L.E., Peterson, G.T., Boyd, J.M., y O'Neil, J.H. (1950). A new principle for agitating in processing of canned food. *Food Technology* 4, 450-460.
- Datta, A.K. y Teixeira A.A., (1987). Numerical modeling of natural convection heating in canned liquids foods. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, No. 86-6516, St. Joseph, Mi.
- Datta, A.K. y Teixeira, A.A. (1988). Numerically predicted transient temperature and velocity profiles during natural convection heating of canned liquids foods. *Journal of Food Science* 52 (1), 191-195.
- Deniston, M.F., Hassan, B.H. y Merson, R.L. 1987. Heat transfer coefficients to liquids with food particles in axially rotating cans. *Journal of Food Science* 52, 962-966, 979.
- Duquenoy, A. (1980). Heat transfer to canned liquids. *Proceeding of the 3rd International Conference on Engineering & Food and 8th European Food Symposium 1*, 483-489.
- Evans, L.B., Stefany, N.E. (1966). An experimental study of transient heat transfer to liquids in cylindrical enclosures. *Chemical Engineering Progress, Symposium Services* 62, 209-215.
- Fernández, C.L., Rao, M.A., Rajavsireddi, S.P. y Sastry, S.K. (1988). Particulate heat transfer to canned snap beans in steritort. *Journal of Food Processes Engineering* 10, 183-198.
- Geankoplis C. 1998 *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. (1998) (3^a Ed.), CECSA, México.
- Ghani, A.G., Farid, M.M., Chen, X. D. y Richards, P. (1999a). Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 41(1), 55-64.
- Ghani, A.G., Farid, M.M., Chen, X. D. y Richards, P. (1999b). An investigation of deactivation of bacteria in canned liquid food during sterilization using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Food Engineering* 42, 207-214.
- Ghani, A.G., Farid, M.M., Chen, X. D. y Richards, P. (2001). Heat transfer in 3-D pouch during sterilization using computational (CFD). *Journal of Food Engineering* 51, 77-83.
- Ghani, A.G., Farid, M.M. y Chen, X. D. (2002). Numerical simulation of transient temperature and velocity profiles in a horizontal can during sterilization using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 48, 2147-156.
- Ghani, G.A. Farid, M.M. y Zarrouk, S.J. (2003a). The effect of can rotation on sterilization of liquid food using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 57, 9-16
- Ghani, A.G., Farid, M.M. y Chen, X.D. (2003b). Numerical simulation of transient two-dimensional profiles of temperature, concentration, and flow of liquid food in a can during sterilization En: *Transport phenomena in food processing*. (Welty-Chanes, J., Vélez-Ruiz, J. F. y Barbosa-Canovas G.V., Eds.), CRC Press., Boca Raton, Florida, pp.463-482.
- Grijpsperdt, K., Hazarika, B. y Vucinic, D. (2003). Application of computational fluid dynamics to model the hydrodynamics of plate heat exchangers for milk processing. *Journal of Food Engineering* 57, 237-242.
- Hiddink, J., (1975). Natural convection heating of liquids, with reference to sterilization of canned food. *Agricultural Research Report No. 839*, Center for Agricultural Publishing

- and Documentation, Wageningen, Holanda.
- Holdsworth, S.D. (1997). *Thermal processing of packaged foods. Blackie Academic and Professional*. Londres.
- Jackson, J.M. y Olson, F.C.W. (1940). Thermal processing of canned foods in tin containers. IV. Studies of the mechanisms of heat transfer within the container. *Food Research* 5, 409-421.
- Jones, D. E. A. (1931). Heat penetration by convection. *Food Processes Industries* 1, 63-65.
- Kumar, A., Bhattacharya, M., and Blaylock, J. (1990). Numerical simulation of natural convection heating of canned thick viscous liquid food products. *Journal of Food Science* 55 (5), 1403-1411.
- Krishnamurthy, H., Ramaswamy, H.S., Sanchez, G., Sablani, S. y Pandey, P.K. (2001). Effect of guar gum concentration, rotation speed, particle concentration, and diameter of rotation on heat transfer rates during end-over-end processing of canned particulate non-Newtonian fluids. En: *Proceedings of the Eighth International Congress on Engineering and Food*, Vol. I. (J. Weltri-Chanes, G.V. Barbosa-Cánovas y J.M. Aguilera, Eds.), Technomic Pub. Co., Lancaster, pp. 665-670.
- Lenz, M.K. y Lund, D.B. (1978). The lethality-Fourier number method: Heating rate variations and lethality confidence intervals for forced-convection heated foods in containers. *Journal of Food Processes Engineering* 2, 227-271.
- López, A. 1981. *A complete course in canning*. (Vol. I y II). The Canning Trade, Baltimore, MD.
- Mansfield, T. (1962). Factors involved in heat penetration studies of canned foods processed in continuous agitating cookers. *Proceeding of the International Congress on Food Science and Technology* 4, 235-244.
- Naveh, D., Kopelman, I.J., y Pflug, I. J. (1983). The finite element method in thermal processing of foods. *Journal of Food Science* 48, 1086-1093.
- Nicholas, R.C., Pflug, I.J., y Mulvaney, T.R. (1960). Convection in syrup packed products. *Food Technology* 14, 205-207.
- Ozisik N. M. (1980). *Basic heat transfer* (First Ed.). McGraw Hill.
- Parchomchuk, P. (1977). A simplified method of processing of canned food. *Journal of Food Science* 42, 265-268.
- PHOENICS (1991). Part A, Reference manual PIL, Concentration Heat and Momentum limited TR 200 A, Bakery House, London SW 19 SAU, UK.
- Quast, D.G. y Siozawa, Y.Y. (1974). Heat transfer rates during axially rotated cans. *Proceeding of the 4th International Congress on Food Science and Technology* 4, 458-468.
- Ramaswamy, H.S. y Zareifard, M.R. (2003). Dimensionless correlations for forced convection heat transfer to spherical particles under tube-flow heating conditions. En: *Transport phenomena in food processing*. (Weltri-Chanes, J., Vélez-Ruiz, J. F. y Barbosa-Cánovas G.V., Eds.), CRC Press. Boca Raton, Florida, pp. 505-520.
- Ramaswamy; H.S. y Zareifard, M.R. (2000). Evaluation of factors influencing tube-flow fluid-to-particle heat transfer coefficient using a calorimetric technique. *Journal of Food Engineering* 45, 127-138.
- Rao, M.A., Cooley, H.J., Anantheswaran, R.C. y Ennis, R.E. (1985). Convective heat transfer to canned liquid foods in a Steritort. *Journal of Food Science* 50, 150-154.
- Rao, M.A., y Anantheswaran, R.C. (1988). Convective heat transfer to fluids in cans, *Advances in Food Research* 32, 39-84.
- Rodrigo, M., Martínez, A. y Rodrigo, C. (2002). Contribution to kinetics for the development of food sterilization processes at high temperatures: IATA:CSIC results. En: *Engineering and food for the 21st century*. (Weltri-Chanes, J., Barbosa-Cánovas, G.V. y Aguilera, J.M., Eds.), CRC Press. Boca Raton, Florida, pp. 591-604.

- Sablani, S.S. y Ramaswamy, H.S. (1998). Multi-particle mixing behavior and its role in heat transfer during end-over-end agitation of cans. *Journal of Food Engineering* 37, 141-152.
- Sablani, S.S. y Ramaswamy, H.S. (1999). End-Over-End agitation processing of cans containing liquid particle mixtures. Influence of continuous vs. oscillatory rotation. *Food Science Technology International* 5(5), 385-389.
- Sablani, S.S., Ramaswamy, H.S., y Krishnamurthy, H. (2003). Heating behavior of canned liquid/particle mixtures during end-over-end agitation processing. En: *Transport phenomena in food processing*. (Weltri-Chanes, J., Vélez-Ruiz, J. F. y Barbosa-Cánovas G.V., Eds.), CRC Press., Boca Raton, Florida, pp.483-503.
- Stevens, P.M. (1972). Lethality calculations, including effects of product-movement for convection heating and broken heating food in still-cook retorts. Ph. D. thesis, University of Massachusetts, Amherst.
- Stoforos, N.G., y Merson, R.L. (1991). Measurement of heat transfer coefficients in rotating liquid particle systems. *Biotechnology Progress* 7: 267-271.
- Stoforos, N.G. y Merson, R.L. (1992). Physical property and rotational speed effect on heat transfer in axially rotating liquid/particulate canned foods. *Journal of Food Science* 57, 749-754.
- Soule, C.L. y Merson, R.L. (1985). Heat transfer coefficients for Newtonian liquids in axially rotated cans. *Journal of Food Processes Engineering* 8, 33-46.
- Weltri-Chanes, J., Vergara-Balderas, F. y Bermúdez-Aguirre, D. (2005). Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances. *Journal of Food Engineering* 67, 113-128.
- Zechman, L.G. y Pflug, I.J. (1989). Location of the slowest heating zone for natural convection heating fluids in metal containers. *Journal of Food Science* 54 (1), 205-209.