

# MODELACIÓN NUMÉRICA DE UN PROCESO TÉRMICO POR MICROONDAS CON ÉNFASIS EN ALIMENTOS

## NUMERICAL SIMULATION OF A THERMAL PROCESS BY MICROWAVES WITH EMPHASIS IN FOODS

HÉCTOR JOSÉ CIRO VELÁSQUEZ

*Ingeniero Agrícola. M. Sc., Profesor asociado. Universidad Nacional de Colombia-Medellín, hjciro@unalmed.edu.co*

JAIR EDUARDO MELÉNDEZ RHENALS

*Ingeniero Mecánico. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Medellín, jemelend@unalmed.edu.co*

JOHN EDUARDO MELÉNDEZ RHENALS

*Ingeniero Mecánico. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia-Medellín, Jemelen0@unalmed.edu.co*

Recibido para revisar 17 de Agosto de 2005, aceptado 1 de Noviembre de 2005, versión final 16 de Enero de 2006

**RESUMEN:** En esta de investigación se simuló un proceso de esterilización térmica por microondas con énfasis en alimentos usando la técnica de diferenciación finita aplicada a volúmenes de control en coordenadas esféricas con dependencia espacial radial y en estado transitorio, donde el efecto electromagnético del proceso de microondas fue modelado a través de la ley de Lambert y cuyo algoritmo de solución fue programado en MatLab. Los resultados de la simulación mostraron que el algoritmo desarrollado es independiente de la red nodal seleccionada, permitiendo cuantificar las curvas de penetración de calor en función de la frecuencia y potencia del campo electromagnético, y para lo cual para una frecuencia de 915 MHz se proporciona un calentamiento más uniforme en el alimento debido a mayores profundidades de penetración de onda con respecto al uso de frecuencias de 2450 MHz.

**PALABRAS CLAVE:** Microondas, Esterilización, Destrucción térmica, Temperatura, Curvas de penetración de calor, Simulación numérica.

**ABSTRACT:** In this research work a thermal sterilization process by microwaves with emphasis in food was simulated using the technique of finite differences applied to volumes of control in spherical coordinates with radial and time dependency, where the electromagnetic effect given by the microwaves was modeled through the equations of Lambert and whose algorithm of solution was programmed in MatLab. The results of the simulation indicated that the algorithm developed is independent of the selected nodal network, allowing to quantify the curves of heat penetration based on the frequency and power of the electromagnetic field, and for which frequencies of 915 MHz provides a more uniform heating in the food due to greater depths of penetration of wave with respect to the use of frequencies of 2450 MHz.

**KEY WORDS:** Microwave, Sterilization, Thermal destruction, Heat penetration curves, Temperature, Numeric simulation.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los tratamientos no térmicos en la conservación de los alimentos, por ejemplo: sistemas de alta presión, microondas, aplicación de campos electromagnéticos, acústicos y calentamiento ohmico entre otros, se están utilizando en la actualidad en diversos procesos de la industrial

agro-alimentaria (Richardson, 2004). Diferentes investigaciones realizadas a nivel internacional muestran que este tipo de tecnología no deteriora de forma significativa la calidad del producto manteniendo en forma óptima sus características físicas, químicas y organolépticas, además de que son más eficientes energéticamente, sin embargo presentan el inconveniente de mayores costos de inversión inicial comparados con los

tratamientos térmicos de conservación convencional.

Las microondas son utilizadas en la industria como una fuente de energía térmica., siendo una forma de energía electromagnética que como las ondas de radio o luz ocupan una parte del espectro electromagnético de potencia o energía, siendo de características de ondas cortas que viajan a la velocidad de la luz. Su uso se ha incrementado debido a los breves periodos de tiempo que utilizan y el calentamiento rápido y uniforme gracias a su penetración dentro de los productos, convirtiéndose así en una alternativa atractiva a los métodos de calentamiento convencional (Karel y Lund, 2003)

Este método es muy utilizado en el secado de pulpa de papel, textiles, acoplamientos de polímeros y extracción de aceites, pero la mayor utilización de las microondas es en la industria alimenticia donde son utilizadas para cocinar, descongelar, secar, pasteurizar y esterilizar los alimentos.

A nivel comercial dos frecuencias de radiación por microondas se han usado ampliamente: 915 MHz y 2450 MHz para sistemas caseros y hornos industriales respectivamente.

Cuando un alimento es sometido a radiación por microondas, calor es producido dentro del alimento debido a la vibración de las moléculas de agua originada por la absorción de energía. Este movimiento a nivel molecular causa fricción, lo cual origina el calentamiento del producto.

Según Bueno et al, (1994), en las técnicas convencionales de esterilización, los efectos puramente térmicos actúan sin discriminación sobre el producto que se esta tratando. Así si se desea obtener un proceso rápido, es necesario calentar a alta temperatura, con los inconvenientes que esto trae consigo como son:

- Riesgo de transformaciones fisicoquímicas por sobrecalentamiento del producto y pérdida de calidad.
- Perdida considerable de eficiencia por disipación de energía.

En procesos térmicos convencionales el gradiente térmico es inverso, es decir la transferencia de calor y de materia se producen en sentidos opuestos. Así el agua que se difunde hacia el exterior presenta una resistencia al paso de calor hacia el interior dificultando con esto un rápido calentamiento.

En Colombia el uso de tecnologías no convencionales tales como la irradiación por microondas y su efecto en los alimento no ha sido considerada hasta el momento como objeto de Investigación. Sin embargo a nivel internacional varios estudios en su efecto letal sobre los microorganismos y sus efectos colaterales en los alimentos y seres humanos y técnicas de simulación han sido reportados por (Fleming, 1944; Nyrop, 1946; Desel, 1960; Goldblith, 1967 y 1968; Swami, 1982; Ayappa et al., 1991, Bueno et al., 1994; Ohlsson y Bengtsson, 2000; Ryyanen, 2002, Irudayaraj, 2001).

Como objetivo principal de la presente investigación se busco predecir la respuesta térmica en coordenadas esféricas de un alimento sólido sometido a un proceso originado por microondas, para lo cual se usó un modelo y su simulación con el fin de entender el fenómeno físico que ocurre.

## 2. METODOLOGÍA

Ya que para productos de naturaleza biológica el estudio de fenómenos de transporte es complejo, las siguientes suposiciones generalizadas fueron aplicadas para desarrollar el modelo de simulación:

- El alimento es de geometría esférica de naturaleza homogénea e isotrópica.
- La temperatura es dependiente de la distancia radial ( $r$ ) y del tiempo ( $t$ ).
- La distribución inicial de temperatura es uniforme y constante
- Los perfiles de temperatura son simétricos durante el proceso de calentamiento.
- La transferencia de calor dentro de la esfera es por difusión pura.
- Las ondas electromagnéticas en el plano  $\theta - \Phi$  son de intensidad uniforme, por ello solo

varían en la dirección de propagación como función de la distancia radial  $r$ , las ondas sufren un atenuación al penetrar la esfera, así la velocidad a la cual decae la onda es función del factor de atenuación  $\beta$ .

- La transferencia de calor fuera de la esfera es causada por la radiación electromagnética y por convección natural.
- Las magnitudes del campo eléctrico incidente (E), y la frecuencia son propiedades de la fuente de energía (magnetron).
- Las propiedades dieléctricas del alimento son función del contenido de humedad y contenidos de sales asociadas.
- El calor específico y la conductividad térmica son dependientes del contenido de humedad del alimento y no de la temperatura.
- No hay evaporación significativa en el alimento.

### 3. MODELO MATEMÁTICO

#### 3.1 Ecuaciones gobernantes y condiciones de frontera.

Para obtener los perfiles de temperatura en estado transitorio para una superficie esférica expuesta a radiación electromagnética, se consideró que en el proceso de calentamiento la superficie del producto recibe calor por parte de las microondas e intercambia calor con el medio por convección mientras que la variación interna de energía en todo instante de tiempo es causada por el balance entre la transmisión interna de calor por conducción y la variación de la energía interna causada por las microondas.

La ecuación de difusión de calor en coordenadas esféricas con dependencia radial en posición, sistema homogéneo e isotrópico con generación de energía volumétrica que gobierna la variación de la temperatura en el proceso térmico en el tiempo está dada por (Incropera y Dewitt, 1999):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{Q}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

En la cual  $T$  es la temperatura del sistema,  $r$  es la posición radial,  $K$  y  $\alpha$  son la conductividad y

difusividad térmica del material y  $Q$  es la energía generada volumétrica. Una condición inicial para el proceso es:

$$T(t = 0) = T_0(R), t \leq 0 \quad (2)$$

Las condiciones de frontera para la expresión (1), son realizadas bajo el supuesto que en la superficie de la muestra no hay evaporación de humedad, la transferencia de energía por convección es utilizada para intercambiar calor con el medio y la radiación por microondas a la cual se expone la muestra es usada para calentar internamente la muestra:

$$-K \frac{\partial T}{\partial r} = q_{\text{irradiacion}} + h(T_s - T_\infty) \\ r = R, t > 0 \quad (3)$$

En la cual  $h$  es el coeficiente convectivo,  $T_\infty$  es la temperatura del fluido que rodea la superficie y  $T_s$  es la temperatura de la superficie. La expresión (3) implica que no hay pérdidas de calor por radiación debido a reflexiones en la superficie de la esfera, ya que se considera que las ondas viajeras penetran perpendicularmente a la muestra.

Además, se consideró aislamiento o volumen adiabático en el centro geométrico de la esfera:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, r = 0, t > 0 \quad (4)$$

La suposición de aislamiento en el centro es considerada debido a que la ecuación del calor muestra una singularidad en el centro, así bajo estas circunstancias es preferible simplificar el problema evitando el termino  $r = 0$  en la formulación del problema.

#### 3.2 Ecuación gobernante para la generación de calor.

De acuerdo a Irudayaraj (2001), los dos mecanismos fundamentales que producen el calentamiento por efecto de microondas son la polarización iónica y rotación bipolar, donde la generación interna de calor en los alimentos

expuestos a una fuente electromagnética es una consecuencia que fundamentalmente depende de varios mecanismos: el principal es la absorción de las microondas por materiales dieléctricos que crean un incremento en su temperatura interna debido a la energía entregada por parte de las microondas.

Como resultado de las pérdidas dieléctricas, las microondas penetran los materiales dieléctricos y actúan como una fuente de calor distribuida volumétricamente en los alimentos. La generación de calor puede ser modelada según la ley de Lambert's, la cual expresa que la energía de las microondas es atenuada exponencialmente como función de la distancia de penetración desde la superficie de la muestra según el factor de atenuación. Dicha expresión es una solución analítica a las ecuaciones de Maxwell para ondas planas incidentes y es válida para alimentos que tienen grandes pérdidas (grandes cantidades de agua con contenidos de sal) (Irudayaraj, 2001).

### 3.3 Ecuación Ley de Lambert's.

Según Irudayaraj (2001), la expresión analítica que describe la distribución energética debido a las microondas en la esfera es la siguiente:

$$P(Z) = P_0 e^{-2\beta Z} \quad (5)$$

En la expresión (5),  $P(Z)$  es la energía que absorbe el alimento como función de la distancia de penetración desde la superficie  $Z$ ,  $P_0$  es la intensidad de radiación en la superficie del alimento y  $\beta$  es el llamado factor de atenuación, este indica la distribución de energía dentro del alimento y es una medida del decaimiento de la energía absorbida. Este factor varía con el tiempo y la posición durante el ciclo de calentamiento en función de la frecuencia de procesamiento y los gradientes de temperatura locales.

En el caso particular concerniente en este estudio la energía absorbida por unidad de volumen en una esfera de radio  $\Delta r$  entre 0 y  $\Delta r$  viene dada por:

$$Q = -\frac{P_{\Delta r} 4\pi(\Delta r)^2}{\frac{4}{3}\pi(\Delta r)^3} = -3\frac{\partial}{\partial r}(P(r)) \quad (6)$$

$P_{\Delta r}$  es la energía neta absorbida en la superficie de la esfera y el término denominador es el volumen de la esfera.

El lado derecho de la expresión (6) se obtiene al hacer que  $\Delta r \rightarrow 0$ , esta expresión es utilizada como el término de generación volumétrica de calor así al sustituir  $P(Z)$  de la expresión (5) en la expresión (6) y tomando derivada obtenemos:

$$Q = 6P_0\beta e^{-2\beta Z} \quad (7)$$

En la expresión (7) el flujo de energía incidente  $P_0$  es debido a las microondas en la superficie y representan la intensidad de radiación transmitida. La energía por unidad de volumen que es la densidad de energía instantánea en un campo eléctrico según Seway 1997 es:

$$P_0 = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_{\max}^2 \quad (8)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $\epsilon_0$  es la permisibilidad del espacio libre. La expresión (8) depende del valor máximo del campo, el cual es una consecuencia del aplicador en el horno microondas (Magnetron) aunque en la práctica  $E_{\max}$  varía según ciertas características como el flujo de corriente y la temperatura superficial en el magnetron, para propósitos prácticos se considero flujo de campo eléctrico constante en la superficie de la muestra tomando un valor de referencia en el aplicador según aplicaciones especiales de la microondas para casos particulares.

### 3.4 Factor de atenuación.

En la expresión (7)  $\beta$  es llamado factor de atenuación de la generación de calor y está dado por la expresión:

$$\beta = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\epsilon'(\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}{2}} \quad (9)$$

El factor de atenuación interviene en la distribución de energía eléctrica dentro del alimento irradiado por microondas y además afecta la eficiencia de la transferencia de energía desde el equipo de procesamiento de microondas al producto. Así el factor de atenuación determinará la distribución de energía dentro de un material biológico (Ayappa et al, 1991).

**3.5 Propiedades dieléctricas de los alimentos.**

La expresión (9) depende fundamentalmente de la frecuencia de operación (f) y de las propiedades dieléctricas de los alimentos:  $\epsilon'$  es la constante dieléctrica relativa e indica la habilidad de los alimentos para almacenar energía eléctrica, mientras  $\epsilon''$  es la pérdida dieléctrica relativa, indica una medida de la habilidad de los materiales a disipar energía eléctrica. Según Rao y Rizvi (1995), dichas propiedades varían con la temperatura y la frecuencia de procesamiento. En los alimentos para propósitos prácticos, estas propiedades son determinadas según los contenidos de agua y sales asociadas, ya que el agua es el mayor componente de muchos alimentos y además es el mayor componente activo dielectricamente. Así estas propiedades son evaluadas con gran precisión como función del contenido de agua, sales asociadas y por los gradientes de temperatura local según las siguientes correlaciones (Rao y Rizvi, 1995):

$$\epsilon' = m_{\text{agua}}(1,10596 - 0,000900 * T) - 15,1288 \quad (10)$$

$$\epsilon'' = m_{\text{agua}}(3,447 - 0,0187 * T + 0,000025 * T^2) + m_{\text{cenizas}}(-57,093 + 0,231 * T) - 3,599 \quad (11)$$

Donde:

$m_{\text{agua}}$  = Es el porcentaje de agua en el alimento.

$m_{\text{cenizas}}$  = Es el porcentaje de cenizas el cual es un indicador del total de sal.

T= Temperatura local en K.

En la expresión (11), el efecto del contenido de cenizas (sales totales) es elevar la pérdida dieléctrica con respecto al agua pura en el alimento, por lo que se aumenta las cargas conductivas que incrementan la pérdida dieléctrica del sistema.

**3.6 Factor de pérdida tangente.**

En la expresión (9) el término (tan $\delta$ ) es el factor de pérdida tangente y se define como:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (12)$$

El factor de pérdida tangente relaciona la constante dieléctrica relativa y la pérdida dieléctrica relativa.

La expresión (12), indica como el material puede ser penetrado por un campo eléctrico y como la disipación de energía eléctrica es convertida en calor. Como los alimentos tienen muy bajo factor de aislamiento térmico, estos generalmente absorben una gran fracción de la energía cuando están en un ambiente expuestos a las microondas resultando esto en la absorción de las ondas y en el calentamiento instantáneo en el alimento (Ayappa et al, 1991).

**3.7 Ecuación de generación interna de calor.**

Sustituyendo (8) y (9) en (7) se obtiene la expresión para la generación interna de calor en la esfera debido a las microondas:

$$Q(r, T) = 6 \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_{\text{max}}^2 \frac{2\pi f}{c} \left( \frac{\epsilon'(\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}{2} \right)^{\frac{1}{2}} * e^{-\frac{2\pi f}{c} \left( \frac{\epsilon'(\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}{2} \right)^{\frac{1}{2}} R - r}$$

$$0 \leq r < R \quad (13)$$

La expresión (13) implica que la energía

generada internamente en la muestra decrecerá progresivamente desde la superficie hasta llegar a su valor mínimo en el centro de la esfera, así para el caso particular de una muestra con contenidos de agua y cenizas conocidos esta expresión es función de la distancia de penetración y de los gradientes de temperatura local en dicha muestra, por lo tanto la evaluación de la expresión (13) a cierta distancia de penetración conocida se realizó con un promedio de temperatura de los nodos adyacentes en dicho nodo de evaluación.

### 3.8 Esquema numérico del modelo.

La transferencia de calor en estado transitorio implica ecuaciones no lineales del tipo parabólico, las cuales poseen propiedades térmicas conocidas y propiedades dieléctricas dependientes de la temperatura en el punto de evaluación.

Para resolver estas ecuaciones se realizó un balance de energía para los volúmenes de control en la esfera, estos satisfacen la conservación de la energía para los nodos a partir de los cuales se puede determinar la temperatura solo en puntos discretos.

El dominio es dividido en un número tal de pequeñas regiones o volúmenes de control para los cuales está asociado un nodo. En cada nodo se realizó el balance de energía asumiendo conducción unidimensional para la variación de la temperatura según la variable radial. Para las ecuaciones en diferencias finitas en los nodos del sistema se utilizó el método implícito con el fin de reducir el tiempo de cálculo con respecto a otros métodos. Este método evalúa el valor de la variable dependiente temperatura en un nuevo tiempo  $i+1$  en lugar del tiempo anterior  $i$ , proporcionando con ello una aproximación en diferencias finitas hacia atrás para la derivada respecto al tiempo. Como resultado se obtuvo un grupo de ecuaciones para cada volumen de control mediante diferenciación finita por el método implícito las cuales fueron resueltas mediante el método de inversión de matrices.

La modelación se realizó para una esfera de radio  $r$  la cual tiene simetría con respecto a la

coordenada azimutal  $\phi$  y respecto al ángulo cenital  $\theta$ , por ello se considera solo un octavo de esfera. Así solo hay dependencia directa respecto a la coordenada radial  $r$  y el tiempo  $t$ . La región tomada fue dividida en  $N$  subregiones cada una con un nodo localizado en el radio medio de estas excepto en los nodos localizados en el centro de la esfera.

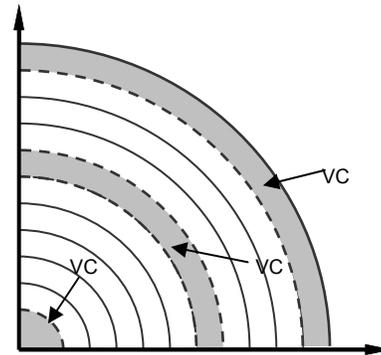


Figura 1. Formulación en volumen de control  
Figure 1. Control volume scheme

### 3.9 Discretización de la ecuación de energía para un proceso por microondas

#### 2.9.1 Balance de energía de la superficie.

En el modelo matemático para el proceso de calentamiento por microondas de esferas se consideró que la temperatura del alimento en todo instante de tiempo es el resultado del balance entre la rapidez de transmisión de calor por conducción radial y la rapidez de variación de la energía interna. Así la ecuación de difusión de calor gobierna la variación de temperatura durante el proceso de calentamiento:

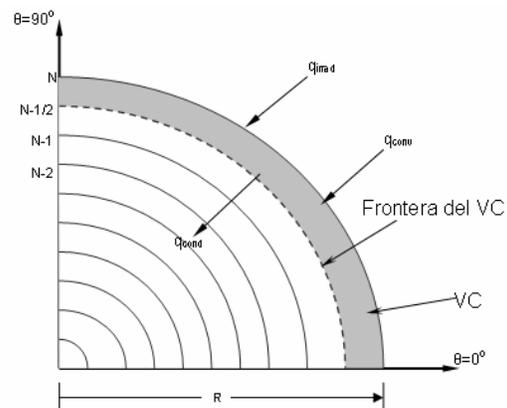


Figura 2. Volumen de control en la superficie.  
Figure 2. Control volume in the surface.

El balance de energía tomando como volumen de control el mostrado en la Figura 2, es:

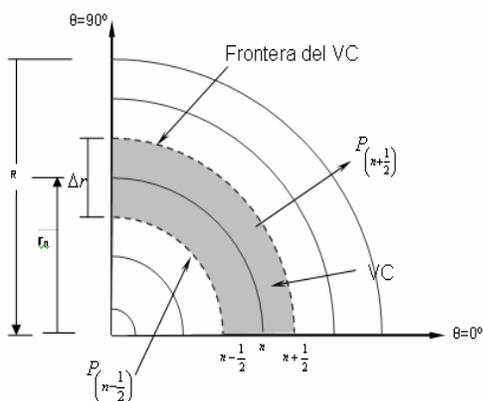
$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = \dot{E}_{alm} \quad (14)$$

En este caso el calor que sale del nodo es por conducción al nodo adyacente N - 1, el calor que entra es por irradiación debido a la fuente de energía electromagnética en la superficie del alimento, y además hay un intercambio de calor entre el medio y el nodo superficial debido a convección natural.

El volumen de control no incluye masa ni volumen, así el término de generación en la expresión no es relevante y solo se trata el fenómeno a nivel superficial.

### 2.9.2 Balance de energía en nodos internos.

Para los nodos internos se considera tanto el calor que ingresa como el que sale por conducción, como también el calor generado internamente debido a la radiación electromagnética el cual es generado volumétricamente y depende fundamentalmente de la expresión de la ley de Lambert `s previamente citada.

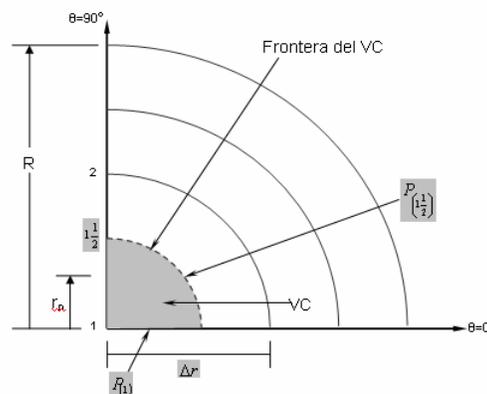


**Figura 3.** Volumen de control en los nodos internos.  
**Figure 3.** Control volume for the internal nodes.

El balance de energía en los nodos internos de la esfera es el siguiente:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} + \dot{E}_g = \dot{E}_{alm} \quad (15)$$

### 2.9.3 Balance de energía en el centro de la esfera



**Figura 4.** Volumen de control para la temperatura en el centro de la esfera  
**Figure 4.** Volume of control for the temperature in the center of the sphere

El balance de energía se realizó alrededor del nodo interior 1 obteniendo así:

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g = \dot{E}_{alm} \quad (16)$$

Para el desarrollo de esta ecuación en la condición de borde se consideró el aislamiento del centro de la esfera por simetría con el método implícito de diferencias finitas se encontró la predicción de la variación espacial y temporal de la temperatura para un octavo de esfera.

Para la condición de frontera se empleó la condición en la cual el nodo central es adiabático. Luego, para el centro de la esfera se tiene:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (17)$$

A partir de las expresiones (14), (15) y (16) se suministraron N ecuaciones algebraicas simultáneas para N temperaturas nodales desconocidas de la siguiente forma se obtuvo un sistema matricial tridiagonal:

$$\begin{pmatrix} d_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & d_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & d_3 & c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & . & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{N-1} & d_{N-1} & c_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_N & d_N \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} T_1^{i+1} \\ T_2^{i+1} \\ T_3^{i+1} \\ . \\ . \\ T_{N-1}^{i+1} \\ T_N^{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ . \\ . \\ b_{N-1} \\ b_N \end{pmatrix} \quad (18)$$

Los coeficientes para  $n = 1$  son:

$$d_1 = (1 + 6F_0) \quad (19)$$

$$c_1 = -6F_0 \quad (20)$$

$$b_1 = T_1^i + 6F_0 P_0 \left( \frac{\Delta r^2}{K} \right) \beta_{1/2} * e^{-2\beta_{1/2} \left( R - \left( \frac{\Delta r}{2} \right) \right)} \quad (21)$$

Para  $n = 2, 3, \dots, N-1$ :  $r_n = i * dr$

$$a_n = F_0 \left( 1 - \left( \frac{\Delta r}{2r_n} \right) \right)^2 \quad (22)$$

$$b_n = T_n^i + 2F_0 P_0 \left( \frac{\Delta r}{K} \right) * \left[ \frac{\left( r_n + \left( \frac{\Delta r}{2} \right) \right)^3}{r_n^2} \beta_{n+1/2} e^{-2\beta_{n+1/2} \left[ R - \left( r_n + \left( \frac{\Delta r}{2} \right) \right) \right]} - \frac{\left( r_n - \left( \frac{\Delta r}{2} \right) \right)^3}{r_n^2} \beta_{n-1/2} e^{-2\beta_{n-1/2} \left[ R - \left( r_n - \left( \frac{\Delta r}{2} \right) \right) \right]} \right] \quad (23)$$

$$c_n = -F_0 \left( 1 + \left( \frac{\Delta r}{2r_n} \right) \right)^2 \quad (24)$$

$$d_n = \left[ 1 + F_0 \left( 1 + \left( \frac{\Delta r}{2r_n} \right) \right)^2 + F_0 \left( 1 - \left( \frac{\Delta r}{2r_n} \right) \right)^2 \right] \quad (25)$$

Para  $n = N$ :

$$a_N = -2F_0 \left( 1 - \left( \frac{\Delta r}{2R} \right) \right)^2 \quad (26)$$

$$b_N = 12F_0 P_0 \left( \frac{\Delta r}{K} \right) \left[ R \beta_N - \left( \frac{R - \left( \frac{\Delta r}{2} \right)}{R} \right)^3 \beta_{N-1/2} e^{-2\Delta r \beta_{N-1/2} \left( \frac{\Delta r}{2} \right)} \right] + 2F_0 B_i T_\infty \quad (27)$$

$$d_N = \left[ 1 + 2F_0 B_i + 2F_0 \left( 1 - \left( \frac{\Delta r}{2R} \right) \right)^2 \right] \quad (28)$$

Teniendo presente lo extenso que resulta la discretización de los nodos en sus balances de energía, lo que hace que en esta publicación se obvie detalles de naturaleza matemática, los autores recomiendan el trabajo de investigación

desarrollado por Meléndez y Meléndez (2005) para su complementación.

#### 4. ESQUEMA DEL ALGORITMO

Para el algoritmo las entradas están conformadas por valores que dependen de las propiedades del alimento y variables térmicas. El proceso es el algoritmo que representa la modelación numérica del fenómeno, por medio del cual se obtienen las salidas que dependen de lo que se quiere obtener (Figura 5).



Figura 5. Estructura del algoritmo  
Figure 5. Structure of the algorithm

##### 4.1 Variables de entrada.

Para realizar la modelación numérica del proceso de microondas, las siguientes variables son relevantes para el proceso:

- Porcentaje de agua
- Porcentaje de cenizas(Sales)
- Calor específico (J/kgK)
- Conductividad térmica (W/mK)
- Densidad (kg/m<sup>3</sup>)
- Temperatura ambiente del horno(°C)
- Temperatura inicial del alimento(°C)
- Frecuencia de operación del sistema (MHz)
- Magnitud máxima del campo eléctrico (W/m<sup>2</sup>)
- Numero del nodo critico
- Tiempo de esterilización (s)
- Coeficiente de transferencia por convección (W/m<sup>2</sup>K)
- Dimensión radial (m)
- Delta de tiempo (s)
- Numero de nodos en dirección radial (adimensional)

##### 4.2 Proceso.

Es el algoritmo que se utilizó para obtener las variables de salida. Para este caso se realizó la programación en MATLAB 6.5, bajo licencia de la Universidad Nacional de Colombia Sede

Medellín, instalado en los bloques 21, 41 y M2.

**4.3 Variables de salida.**

Ya que para el proceso de microondas es de alta importancia conocer la distribución de temperatura del material que esta siendo irradiado, la variable de respuesta del modelo de simulación será la curva de penetración de calor evaluada en el centro térmico del alimento, en este caso para  $r=0$ .

**5. RESULTADOS**

**5.1 Valores variables de entrada.**

Se seleccionan según el tipo de producto (en nuestro caso manzana del tipo Red Delicious). Los valores de las propiedades termo-físicas del producto fueron obtenidos de los valores citados por Rao y Rizvi (1995):

- Porcentaje de agua = 86,0 %
- Porcentaje de cenizas (sales)= 4,0 %
- Calor específico = 3590 J/kgK
- Conductividad térmica = 0,559 W/mK
- Difusividad térmica =  $1,674 \cdot 10^{-7} m^2/s^2$
- Densidad = 884 kg/m<sup>3</sup>

Para la simulación se consideran tres geometrías del producto, definidas por los siguientes radios:

- Radio 1=0,045m
- Radio 2=0,050m
- Radio 3=0,055m

El número de nodos que se utilizó para la simulación en la dirección radial fueron 150, 160, 170, 180, 185 y 190.

Las demás variables de entrada fueron consideradas como:

- Temperatura ambiente del horno microondas=298 K
- Temperatura inicial del alimento = 298 K
- Frecuencia de operación del sistema = 2450MHz y 915MHz.

- Magnitud máxima del campo eléctrico = 1227 V/m ( $I_0=2000W/m^2$ )
- Numero del nodo critico = n (superficial)
- Tiempo de esterilización = 600s
- Coefficiente de transferencia por convección (natural) = 10W/m<sup>2</sup>K

**5.2 Independencia nodal del algoritmo.**

En la Tabla 1, se muestran los valores de temperatura en el nodo crítico de la manzana (nodo superficial), para las diferentes combinaciones de red nodal. Estos valores muestran que para un diámetro de manzana definido, el valor de la temperatura es independiente del número de nodos utilizados para el análisis, se presentan diferencias que no superan el orden del 2%.

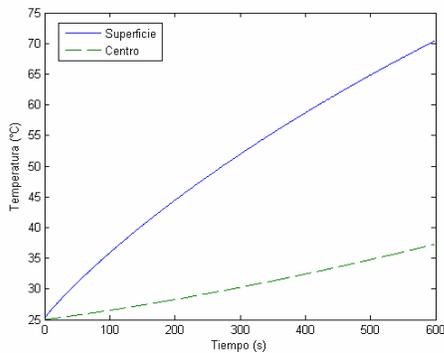
**Tabla 1.** Análisis de independencia nodal para el punto critico  
**Table 1.** Analysis of nodal independence for the critical point.

Radio (m)	Nodos Radial	Temperatura Modelo (°C)
0,045	150	71
	160	71
	170	71
	175	71
	180	71
	185	70
	190	70
0,050	150	73
	160	73
	170	72
	175	72
	180	72
	185	72
	190	72
0,055	150	75
	160	74
	170	74
	175	74
	180	74
	185	74
	190	74

### 5.3 Resultados del modelo de simulación (Variables de salida).

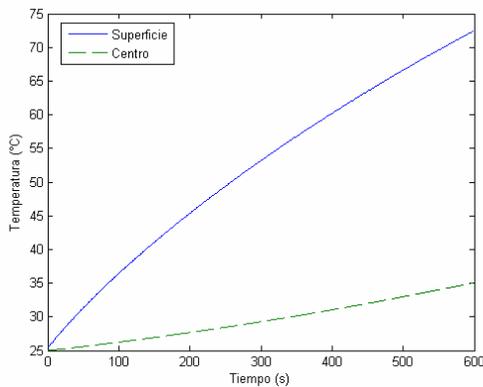
#### 4.3.1 Curvas de penetración de calor.

Las Figuras 6, 7 y 8 muestran los perfiles de temperatura para una frecuencia de procesamiento de 2450MHz, las cuales indican que el producto de mayor diámetro es la que más altas temperatura alcanza en la superficie en el proceso de calentamiento por microondas. Esto debido fundamentalmente a que el proceso térmico por microondas es un fenómeno de calentamiento volumétrico, así mientras mayor sea el volumen en la superficie de la manzana, mayores temperaturas se alcanzarán. También se observa como la manzana de menor diámetro alcanza temperaturas más altas en el centro, debido a la mayor profundidad de penetración de las microondas a diámetros más pequeños.



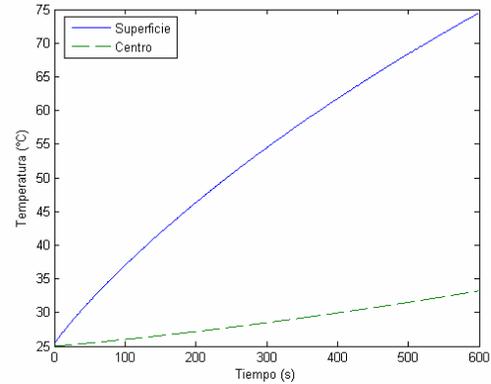
**Figura 6.** Variación de la temperatura en el tiempo para el radio 1.

**Figure 6.** Variation of the temperature with the time for the radius 1.



**Figura 7.** Variación de la temperatura en el tiempo para el radio 2.

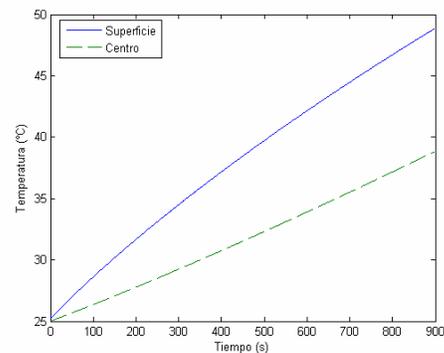
**Figure 7.** Variation of the temperature with the time for the radius 2.



**Figura 8.** Variación de la temperatura en el tiempo para el radio 3.

**Figure 8.** Variation of the temperature with the time for the radius 3.

La Figura 9 muestra los perfiles de temperatura para una manzana de radio 3 con una frecuencia de procesamiento de 915MHz, indicando que a menor frecuencia de procesamiento la profundidad de penetración de las microondas es mayor, calentando el centro del alimento mucho mas que para frecuencias de procesamiento mayor, pero se necesitarían tiempos de procesamiento mayores para obtener altas temperaturas.



**Figura 9.** Comportamiento de la temperatura en el tiempo a 915MHz (radio 3).

**Figure 9.** Variation of the temperature with the time to 915MHz (radius 3).

## 6. CONCLUSIONES

El modelo de simulación que se realizó para obtener los perfiles de temperatura para el proceso de calentamiento por microondas para una geometría particular, en este caso esférica, mostró una independencia de red nodal para el incremento del tiempo seleccionado, por ello el

modelo implementado proporciona un importante avance hacia el estudio y predicción de comportamientos térmicos de alimentos procesados por medio de irradiación por microondas.

Al utilizar frecuencias de procesamiento mayores (2450MHz) se obtienen altas temperaturas en cortos periodos de tiempo en la superficie, pero en el centro no se obtienen incrementos significativos, debido a la atenuación de las microondas y por ende de la energía de calentamiento a medida que estas penetran en el alimento.

Frecuencias de procesamiento menores (915MHz) proporcionan un calentamiento mas homogéneo en todo el alimento, ya que las temperaturas en la superficie no se encuentran muy alejadas de las del centro, esto debido a que para estas frecuencias de procesamiento la profundidad de penetración de las microondas es mucho mayor que para frecuencias mas elevadas (2450MHz), pero los tiempos de procesamiento que se requieren son mayores.

## RECOMENDACIONES

Ya que los productos de naturaleza biológica son altamente anisotropicos, estudiar tal efecto en el comportamiento térmico del material bajo irradiación con microondas.

Extender el análisis a geometrías irregulares, ya que son características físicas propias de los alimentos.

Incluir en el modelo de simulación, el posible efecto de transferencia de masa ocasionado por la irradiación y su efecto en el proceso térmico.

## REFERENCIAS

[1] AYAPPA, K.G; DAVIS, H.T; CRAPISTE, G and GORDON, J. Microwave heating: an evaluation of power formulations En Chemical Engineering science, Vol. 46, No. 4, Gran Bretaña: Editorial Pergamon Press plc, 1991. p. 1005 -1016

[2] BUENO, J.L; GARCÍA, A e IGLESIAS, O. Secado radiativo (secado dieléctrico (II)) En

Ingeniería química, Vol. 26, No.306, España: Dpto. Ingeniería Química Universidad de Oviedo, 1994. p. 150-166

[3] DESEL, M.M. Bacteria in electronically cooked foods En Am. Diet. Assoc. Vol. 37, No. 9, 1960. p. 230 – 233

[4] FLEMMING, H. Effect of high frequency fields on microorganisms En Electron. Eng Vol. 63, No. 1, 1944. p. 230-233

[5] GOLDBLITH, S.A. Effect of microwaves on Escherichia coli and bacillus subtilis En Appl. Microbiol Vol. 15, No. 6, 1967. p. 1371 – 1375

[6] GOLDBLITH, S.A. Thermal and 2450 MHz microwave energy effect on the destruction of thiamine En Food technology, Vol. 22, No. 10. Estados Unidos: Editorial McGraw – Hill, 1968. p. 1266-1268

[7] INCROPERA, F.P and DEWITT D.P. Fundamentos de transferencia de calor. 4 ed. México: Editorial Prentice Hall, 1999. p. 184-218

[8] IRUDAYARAJ, J. Food processing operations modeling. Estados Unidos: Editorial Marcel Dekker, 2001. p. 147-184

[9] KAREL, Marcus and LUND, Daryl B. Physical principles of food preservation. Marcel Dekker, 2003. 603p.

[10] MELÉNDEZ, J y MELÉNDEZ, J. Modelación numérica de un proceso térmico por microondas con énfasis en alimentos. Colombia, 2005. Tesis. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

[11] OHLSSON, T and BENGTTSSON, N. Minimal processing technologies in the food industry. Inglaterra: Editorial CRC Press, 2000. p. 5-10, 23-29

[12] RAO, M. A y RIZVI S.S. Engineering properties of food (2. Ed). Estados Unidos: Editorial Marcel Dekker, 1995. p. 15-20

[13] RICHARDSON, Philip. Improving the thermal processing of food. CRC Press, 2004. 507p.

[14] RYYNÄNEN, S. Microwave heating uniformity of multicomponent prepared foods. Helsinki. University of Helsinki. Department of Food Technology; 2002. p. 86

[15] SERWAY, A. Física. - 4. Ed. México, D.F: Editorial McGraw-Hill;1997. p. 649 – 669, 743-753

[16] SWAMI, S. Microwave heating characteristics of simulated high moisture foods. Massachusetts t, 1982. Thesis M.S. University of Massachusetts