



10561
41

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

“ ANÁLISIS DE CALENTAMIENTO POR
MICROONDAS DE PRODUCTOS DE ALTA HUMEDAD
A PARTIR DE UN MODELO MATEMÁTICO “

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN FISCOQUÍMICA
(METODOS Y METROLOGIA)
P R E S E N T A :

ING. MARIA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO

ASESORES: DR. RICARDO GAITAN LOZANO
DR. JOSE LUIS ARJONA ROMAN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CUAUTITLAN IZCALLI EDO. DE MEXICO

2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

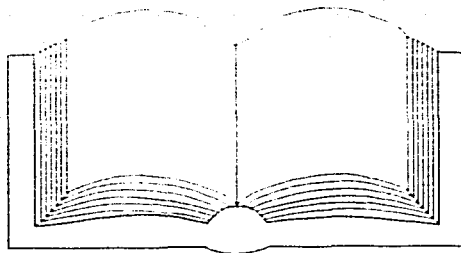
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACION

DISCONTINUA



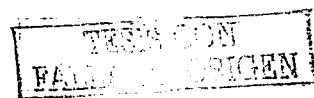
Gracias Señor:

Por la vida hermosa que me diste y por ser conducto para nuevas vidas.

Por hacerme sentir el dolor para valorar lo que tengo.

Por darme la sabiduría para librar los obstáculos.

Hoy comprendo que no hay fracaso ni tropiezo porque siempre estas conmigo a través de los libros.



DEDICATORIAS

A mi esposo, compañero y gran amigo JUAN por el apoyo incondicional, pero sobre todo por el gran AMOR y paciencia que me has dado en estos años, sin ello no hubiera podido continuar. La admiración es el comienzo del AMOR y yo siempre te he Admirado.

A mis 4 pequeños: JORGE ISAAC, YUD LOY, JUAN YAIR y MEI LAN, ustedes son el logro más grande de mi vida, nada vale si no los tengo a mi lado; sin embargo mi deseo de superación es pensando en un mejor futuro para nuestra familia. Por fin hijitos el PREMIO llegó.

A tí MAMA CARMEN, porque tú recuerdo me impulsa cada día más a seguir luchando. Ya cumplí con tu deseo, estoy tranquila y con más energía, llega el momento de continuar mi camino para cumplir mis metas. Siempre estarás conmigo.

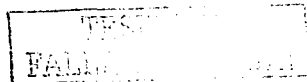
A tí PAPA JORGE porque siempre nos has impulsado a mí y a mis hermanos a tener paciencia para disfrutar los logros obtenidos. Admiro tu gran fortaleza, hoy comprendo todas tus enseñanzas, sin ellas tal vez todo sería diferente.

A mis hermanos:

JORGE porque con todo y lo difícil que ha sido levantarnos, estamos juntos y más fuertes que nunca, espero tú también disfrutes tus logros profesionales y personales.

MARIO ALBERTO sólo faltas tú hermanito eres fuerte y vas a terminar; me sorprende tú madurez y audacia ante la vida, espero sigas en el camino correcto, inteligencia para lograrlo la tienes.

CON TODO MI AMOR MARIA DEL CARMEN



AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Suemi Rodríguez Romo por la gran oportunidad y por sus observaciones, nunca lo olvidaré.

Al Dr. Ricardo Gaitán Lozano, su disposición, comprensión y asesoramiento facilitaron la conclusión de mi trabajo. Gracias.

Al Dr. José Luis Arjona Román por el tiempo invertido estos años y por su asesoramiento en el trabajo. Gracias, sin embargo, fue difícil todo el proceso.

A la M en C. María de la Luz Zambrano Zaragoza, por las observaciones al trabajo, pero sobre todo por sus palabras, todo cambio. Gracias por brindarme tú amistad.

Al Dr. Armando Aguilar por su disposición y aportaciones.

Al Dr. Vladimir Tchijov por su disposición.

Al Departamento de Matemáticas por darme la oportunidad de reintegrarme al personal académico y por el apoyo brindado en este tiempo.

Al QFB. Héctor Coss Garduño e Ing. Gilberto Amaya Ventura por su invaluable amistad.

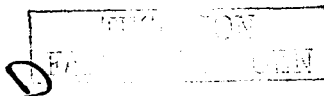
A Rosalía por el tiempo que convivimos en la Maestría, pero sobre todo por la amistad que me has dado y por el tiempo que siempre has tenido para asesorarme.

A mis compañeras Ma. Elena y Marta por los momentos compartidos en la Maestría.

A la **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO** y a la **FES-C** por pertenecer a la máxima casa de estudios.

Siempre y para siempre:

"Por mi Raza Hablará el Espíritu"



SEPTIEMBRE 2002

I N D I C E G E N E R A L

INDICE DE TABLAS	
INDICE DE FIGURAS	
NOMENCLATURA	
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCION	3
OBJETIVOS	5

CAPITULO I ANTECEDENTES

1.1. Las microondas características y procesos de calentamiento.	6
1.1.1. Propiedades dieléctricas.	9
1.1.2. Propiedades de transmisión.	10
1.1.2.1. Coeficiente de atenuación	10
1.1.2.2. Profundidad de penetración.	11
1.2. Aplicaciones de microondas en procesos alimenticios.	12
1.3. Modelos matemáticos y sus aplicaciones	15
1.3. Modelación matemática.	15
1.3.1. Clasificación de los modelos matemáticos.	16
1.3.2. Modelación matemática	18
1.3.3. Modelación matemática aplicada a procesos de calentamiento por microondas.	21
1.3.4. Modelos matemáticos en transferencia de calor.	23
1.3.4.1. Modelo de la segunda ley de Fourier con generación de calor.	23
a) Aplicaciones de la Ley de Lambert.	24
b) Aplicaciones de las Ecuaciones de Maxwell.	25
1.3.4.2 Modelo de calentamiento por microondas considerando pérdidas de calor por convección en la superficie y por evaporación.	28
1.3.4.3. Modelo de transferencia de calor y masa durante el calentamiento por microondas.	30

CAPITULO II DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMATICOS DE SIMULACIÓN

2.1. Diagrama de modelación matemática	35
2.2. Establecimiento del modelo físico y conceptual.	36
2.3. Ecuaciones que rigen el comportamiento	37

2.4. Planteamiento del modelo matemático para la obtención de Q_0 basado en el modelo de Lambert.	39
2.5. Planteamiento del modelo matemático basado en el modelo de Fourier.	46
2.6. Planteamiento del programa para las simulaciones del calentamiento por microondas.	50
2.6.1. Algoritmo de cálculo.	50
2.6.2. Diagrama de operación del programa.	51
2.7. Contrastación del modelo desarrollado para Q_0 .	53
2.8. Análisis de sensibilidad respecto a las condiciones de proceso.	54
2.9. Análisis de sensibilidad respecto a las propiedades del producto.	55
2.9. Comparación de los resultados experimentales con el modelo desarrollado.	55

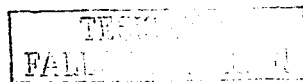
CAPITULO III RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS MODELOS DE SIMULACION

3.1. Desarrollo del programa.	58
3.2. Contrastación del modelo desarrollado para Q_0 .	58
3.3. Análisis de sensibilidad respecto a las condiciones de proceso.	67
3.3.1. Simulaciones considerando 4 niveles de potencia	67
3.3.2. Simulaciones considerando 4 niveles de tiempo de proceso.	71
3.3.3. Simulaciones de diferentes tamaños de producto	74
3.3.3.1. Simulaciones con 9 niveles de radio.	74
3.3.3.2. Simulaciones con 5 niveles de longitud.	76
3.4. Análisis de Sensibilidad respecto a las propiedades del producto.	79
3.4.1. Efecto del cambio de las propiedades del producto sobre los perfiles de temperatura.	81
3.5. Comparación de los resultados experimentales con el modelo desarrollado.	83

CONCLUSIONES	93
BIBLIOGRAFIA	95
ANEXO I: DESARROLLO DEL PROGRAMA DE COMPUTO	98

I N D I C E D E T A B L A S

Tabla 1. Aplicación de las microondas en procesos Industriales.	13
Tabla 2. Clasificación de los modelos matemáticos.	17
Tabla 3. Resumen de los modelos estudiados.	33
Tabla 4. Variables a introducir en el programa.	50
Tabla 5. Variables para la contrastación del Modelo Desarrollado para Qo.	53
Tabla 6. Variables para el análisis de sensibilidad respecto a las condiciones de proceso.	54
Tabla 7. Variables para el análisis de sensibilidad sensibilidad de las propiedades del producto.	55
Tabla 8. Variables para la comparación del modelo.	56
Tabla 9. Valores iniciales de geles de alginato de sodio.	58
Tabla 10. Valores de Qo y ΔT a un R= 0.04m.	59
Tabla 11. Valores de Qo y ΔT a un r= 0.005.m	61
Tabla 12. Valores de Qo y ΔT a un r= R.	61
Tabla 13. Análisis de residuales	64
Tabla 14. Valores ΔT y residuales a un r=R.	65
Tabla 15. Propiedades termofísicas de alginato de sodio.	67
Tabla 16. Condiciones iniciales de las simulaciones.	67
T vs r, considerando 4 niveles de Po.	
Tabla 17. Resultados de las simulaciones de calentamiento por microondas durante 40s.	68
Tabla 18. Resultados de las simulaciones de calentamiento por microondas con Po= 800 W.	71
Tabla 19. Resultados de las simulaciones de calentamiento por microondas durante 50 s con γ y L=0.025m Po= 800 W.	74
Tabla 20. Resultados de las simulaciones de calentamiento por microondas durante 50 s con Po= 800 W y R=0.05m.	77
Tabla 21. Porcentajes de variación para el análisis de sensibilidad.	79
Tabla 22. Propiedades termofísicas de papa y carne.	80
Tabla 23. Porcentajes de variación para el análisis de sensibilidad.	81
Tabla 24. Efecto del cambio de las propiedades del producto sobre los perfiles de calentamiento.	82
Tabla 25. Datos de alginato de sodio al 1%	83
Tabla 26. Valor de Po para diferentes tamaños de producto.	84
Tabla 27. Resultados de VC experimentales y simulados.	85
Tabla 28. Comparación de los modelos de Lin (1995) y el desarrollado.	91



I N D I C E D E F I G U R A S

Figura 1. Interacción del campo eléctrico con las moléculas de agua.	7
Figura 2. Interacciones de los constituyentes de alimentos con agua en presencia de un campo eléctrico a frecuencias de microondas.	9
Figura 3. Proceso de modelación general.	19
Figura 4. Proceso de modelación particular.	20
Figura 5. Comparación en los modelos: Ley de Lambert y Ecuaciones de Maxwell.	28
Figura 6. Condiciones simétricas del cilindro.	36
Figura 7. Modelo Físico del calentamiento por microondas de un cilindro.	37
Figura 8. Representación de un cilindro y las partes que lo conforman.	39
Figura 9. Representación de la potencia incidente en un cilindro.	43
Figura 10. Esquema de diferencias finitas explícitas.	46
Figura 11. Incremento de temperatura en función De r con $R=0.04$ m.	60
Figura 12. Incremento de temperatura en función de R, $r=0.005$ m.	62
Figura 13. Incremento de temperatura en función de r con $r=R$.	63
Figura 14. Incremento de temperatura en función De radio en el nodo $r=R$ con radio límite.	66
Figura 15. Simulación de calentamiento por microondas durante 40 s de geles de alginato de sodio al 1 % a diferentes potencias.	69
Figura 16. Simulación de calentamiento por microondas $P_o=800$ W de geles de alginato de sodio al 1 % a diferentes tiempos de proceso	72
Figura 17. Simulación de calentamiento por microondas durante 50s de geles de alginato de sodio al 1 % a diferentes radios, $P_o=800$ W y $L=0.025$ m.	75
Figura 18. Simulación de calentamiento por microondas durante 50s de geles de alginato de sodio al 1 % a diferentes longitudes, $P_o=800$ W y $R=0.05$ m.	78
Figura 19. VC vs distancia radial de un cilindro de Alginato de sodio de $R= 0.02$ y $L=0.025$ m.	87
Figura 20. VC vs distancia radial de un cilindro de Alginato de sodio de $R= 0.03$ y $L=0.025$ m.	88



N O M E N C L A T U R A

- A** = Area de flujo [=] m^2
A_E = Area del envolvente [=] m^2
A_T = Area total del cilindro [=] m^2
A_C = Area de la circunferencia [=] m^2
B = Inducción magnética [=] Wb/m^2 .
C = Capacitancia con el dieléctrico [=] F
c = Constante de velocidad de la luz en el vacío [=] m/s
Co = Capacitancia sin el dieléctrico [=] F
Cp = Calor específico [=] $J / kg \ C$
D = Desplazamiento eléctrico [=] C/m^2 .
D = Difusividad de humedad [=] m^2/s
Dp = Profundidad de penetración [=] m
dV = Diferencial de volumen [=] m^3
dM/dt = Velocidad de difusión [=] kg/s
dT/dt = Velocidad de calentamiento [=] C/s
 $\partial M / \partial z$ = Pérdida de humedad respecto a la posición [=] kg/m
 ∂V = Parcial de volumen [=] m^3 .
 ΔH_v = Calor latente de vaporización [=] J/kg
E = Energía interna de un sistema [=] J/kg
E = La intensidad de campo eléctrico [=] V/m
f = Frecuencia [=] $1/s$ ó Hz
H = Intensidad del campo magnético A/m
h = Coeficiente convectivo [=] $J / m^2 \ C \ s$
h_m = Coeficiente convectivo de transferencia de masa [=] m/s
j = $\dots -1$
J = Flujo presente [=] A/m^2 .
k = Conductividad térmica [=] $J/m \ C \ s$
M = Masa [=] kg
M = Contenido de humedad [=] kg/kg
Ma = Contenido de humedad del ambiente [=] kg/kg
Ms = Contenido de humedad en la superficie [=] kg/kg
Mv = Velocidad de flujo de masa de vapor de agua [=] kg/sm^2
P = Presión [=] Pa
PM = Peso de la muestra [=] g
Po = Potencia incidente [=] W
Pr = Potencia en dirección radial [=] W
P_z^L = Potencia absorbida a una según Lambert [=] W/m^2 .
P_z^M = Potencia absorbida según Maxwell [=] W/m^3 .
P_{ir} = Potencia en dirección radial [=] W
P_{jo} = Potencia en dirección tangencial [=] W
P_{kz} = Potencia en dirección axial [=] W



Q_0 = Calor generado [=] W/ m³
 r = Distancia radial [=] m
 R = Radio [=] m
 Re = Parte real
 S = Vector Poynting (Densidad de potencia) [=] W/m² .
 T = Temperatura [=] C
 T_{∞} = Temperatura dentro de la cavidad del horno [=] C
 T_{sa} = Temperatura en la superficie del alimento [=] C
 T_i = Temperatura en el nodo i [=] C
 $T_i^{t+\Delta t}$ = Temperatura en el siguiente paso de tiempo [=] C
 T_i^t = Temperatura en tiempo anterior [=] C
 T_{sa} = Temperatura de la superficie del alimento [=] C
 t = Tiempo [=] s
 V = Volumen del sistema [=] m³
 VC = Velocidad de calentamiento [=] C/s
 VCs = Velocidad de calentamiento simulada [=] C/s
 x = Espesor [=] m
 z = Dirección axial [=] m

ADIMENSIONALES

K'' = Constante de pérdida
 K' = Constante dieléctrica relativa
 RAR = Razón de área radial.
 $\tan \delta$ = Tangente de pérdida

LETRAS GRIEGAS

α = Difusividad térmica [=] m²/ s
 α' = Coeficiente de atenuación [=] 1/m
 Δ = Intervalo
 ϵ' = Constante dieléctrica del material
 ϵ'' = Constante de pérdida
 ϵ_0 = Constante dieléctrica del vacío 8.85×10^{-12}
 λ = Longitud de onda [=] m
 μ_0 = Permeabilidad en el espacio libre [=] H/m
 ∇^2 = Laplaciano
 ρ = Densidad [=] kg/m³
 ω = Frecuencia angular [=] rad/s
 θ = Dirección tangencial [=] rad.

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un modelo matemático para evaluar el calor absorbido por microondas (Q_0) basado en la ley de Lambert y resuelto analíticamente; así mismo se resolvió por diferencias finitas la segunda ley de Fourier para analizar por simulaciones el calentamiento por microondas de geles de alginato al 1 % de forma cilíndrica.

Los resultados de la contrastación de Q_0 con el modelo de Lin, (1995) mostraron similitud en su comportamiento a un radio mínimo de 0.018m.

De las simulaciones realizadas se obtuvo que a tiempos y potencias mayores, el calentamiento en el centro aumenta, presentando una no-uniformidad en la distribución de temperaturas. A mayores radios, la absorción de microondas es independiente del tamaño del producto, lo cual se relaciona con el valor de profundidad de penetración. El modelo mostró mayor sensibilidad al variar la difusividad térmica, no siendo así para el coeficiente convectivo.

Los datos obtenidos de velocidades de calentamiento a partir del modelo para Q_0 mostraron una tendencia en el comportamiento, similar con el modelo resuelto por diferencias finitas.

La comparación de resultados experimentales con los simulados, en el que sólo se involucra la transferencia de calor por microondas se aplica a cilindros de alginato de sodio al 1% de $R= 0.02m$ y $0.03m$ a una $L= 0.025$.

Los datos simulados de Q_0 para alginato de sodio al 1% mostró resultados similares, en un radio de 3 cm, con el modelo de Lin , resuelto por el método de elemento finito.

ABSTRACT

A mathematical model was developed in this work to value the microwave absorbed heat (Q_0) based in the Lambert's law and solved analitically; likewise the Fourier's second law was solved by finite difference to analyze by simulation the microwave heating of cilindrical alginate gel to 1 %.

By contrast of Q_0 results with Lin's model (1995) showed that resembling in this behavior in a minimal radius of 0.018 m.

The simulations done giving in a greater timing and power, that heating increasing in the center, showing a non-uniformity in the temperature distributions. With increasing radius the microwave absorption is independent of product size, wich is related with the penetration depth value. The model showed greater sensibility with change in the termic diffusivity, while not with the convect coefficient.

The attainment data of heating velocity by the Q_0 model showed a tendency in the behavior, similar with solved model by finite difference.

The experimental with simulated results, in that only involved the microwave heat transfer it's applied to sodium alginate cilynder to 1% with $R=0.02m$ and $0.03m$ and $L= 0.025$.

The Q_0 simulated data for sodium alginate showed similar results for radius of 3 cm, with Lin's model solved by finite element method.

INTRODUCCION

En la actualidad, el emplear energía de microondas como medio de calentamiento en hornos caseros es de gran utilidad ya que ofrece diversos beneficios, entre los que se encuentra el ahorro de tiempo en el proceso. En la industria no se ha tenido mucho éxito debido a los altos costos de energía y del equipo, así como de su mantenimiento.

Las microondas son reflejadas por el metal, atraviesan el aire, diferentes tipos de vidrio, papel y materiales plásticos, y son absorbidos por diferentes componentes de los alimentos.

La rapidez de operación del proceso de calentamiento por microondas es la principal ventaja, debido a que penetran en el interior del alimento y no sólo en la superficie.

Actualmente el emplear modelos matemáticos es de gran utilidad, para simular procesos de calentamiento por microondas aplicados a alimentos y la finalidad de aplicar como herramienta la modelación matemática en tales procesos es, comprender el comportamiento del sistema, disminuir los costos de experimentación, en cuanto a tiempo, material y equipo, extrapolar condiciones de proceso y así mismo establecer estrategias de control.

De los estudios realizados, el establecimiento de modelos matemáticos han permitido con simulaciones por computadora poder analizar el fenómeno de calentamiento por microondas, determinando los parámetros que ocasionan un sobrecalentamiento y por consiguiente una no-uniformidad de calentamiento, sin embargo no se ha establecido claramente las limitantes de los modelos.

Dentro de las consideraciones teóricas de primordial interés en el establecimiento de modelos para predecir tiempos de calentamiento

en alimentos, es la determinación del calor absorbido por microondas, el cual puede ser evaluado a partir de las ecuaciones de Maxwell aplicadas a la deducción de ecuaciones de ondas electromagnéticas. Como una solución particular a las ecuaciones de Maxwell se emplea la ley de Lambert.

El emplear el modelo de Lambert implican ciertas limitaciones ya que sólo es aplicable para determinadas dimensiones de muestra, se considera 2 o 3 veces mayor que el valor de su profundidad de penetración.

Dentro de los estudios realizados se han obtenido modelos matemáticos en los cuales no se establece límites en las dimensiones del producto, lo que a su vez depende de la profundidad de penetración y por consiguiente de su composición.

Es de gran importancia establecer correlaciones para procesos de calentamiento por microondas en productos con alta humedad en los cuales se determine el radio límite para una geometría cilíndrica, para con ello establecer las dimensiones del producto en el que se puede describir el calor absorbido según el modelo de Lambert; lo cual puede ser aplicable, porque matemáticamente es de menor grado de complejidad emplear el modelo de Lambert que puede ser resuelto a partir de métodos analíticos de menor grado de complejidad, a diferencia de los métodos para resolver las ecuaciones de Maxwell que requieren de métodos más complejos.

Por lo anterior el problema en estudio es, modelar el proceso de calentamiento por microondas de productos de alta humedad manteniendo constante la frecuencia del horno y considerando las propiedades dieléctricas y térmicas independientes de la temperatura.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estimar tiempos y temperaturas de calentamiento por microondas de sólidos de alto contenido de humedad, a partir de un modelo matemático, basado en la Ley de Lambert, con el fin de establecer sus límites de aplicación en función del radio de un cilindro.

OBJETIVOS PARTICULARES.

Obtener un modelo matemático del calor absorbido por microondas basado en la ley de Lambert en función del radio y contrastarlo con otro modelo.

Establecer un modelo matemático a partir de la segunda ley de Fourier, realizando un análisis de sensibilidad.

Determinar velocidades de calentamiento por microondas de los modelos obtenidos y compararlos con resultados experimentales, estableciendo los límites de aplicación.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.1 Las Microondas características y procesos de calentamiento.

Las microondas son ondas electromagnéticas de energía radiante que difieren de otras radiaciones electromagnéticas, como las ondas de luz y las radioondas, por su longitud de onda y su frecuencia. Las microondas se localizan entre la radiación infrarroja y las ondas de radio, con longitud de onda de 1 mm a 30 cm. Debido a su corta longitud de onda, las microondas habían sido útiles en sistemas de radar, aunque no tardó en dársele aplicación a procesos de calentamiento.

Debido a que las microondas son ondas electromagnéticas, están compuestas de un campo eléctrico y un campo magnético.

En la industria alimentaria las microondas son generadas por un dispositivo conocido como "**magnetron**", el cual es un diodo cilíndrico que convierte la energía eléctrica de 60 Hz en ondas electromagnéticas de 2450 MHz o 915 MHz. El magnetron tiene una frecuencia de emisión definida aunque puede variar la potencia, por ejemplo, para el procesamiento de alimentos a nivel doméstico, se emplean magnetrones de 400 a 750 W y de 5 kW, que colocados en serie pueden alcanzar potencias de 100 kW, para hornos industriales. (Chávez, 1991)

Algunos materiales dieléctricos, como el agua, contienen dipolos permanentes debido a su distribución de cargas positivas y negativas que cuando son excitados por un campo eléctrico o magnético a bajas frecuencias, las moléculas de agua tienden a orientarse y estar en fase con el campo generado, lo cual no produce rotación de las mismas (figura 1a); sin embargo, al penetrar las microondas, debido

a que los niveles de frecuencias son muy altos, las moléculas de agua rotan en su intento de alinearse con el campo eléctrico primero en una dirección (figura 1b) y posteriormente en la dirección opuesta (figura 1c), ocasionando colisiones entre ellas las cuales ocurren millones de veces por segundo, provocando una fricción intermolecular que genera calor en el interior del material, el cual es transferido por conducción.

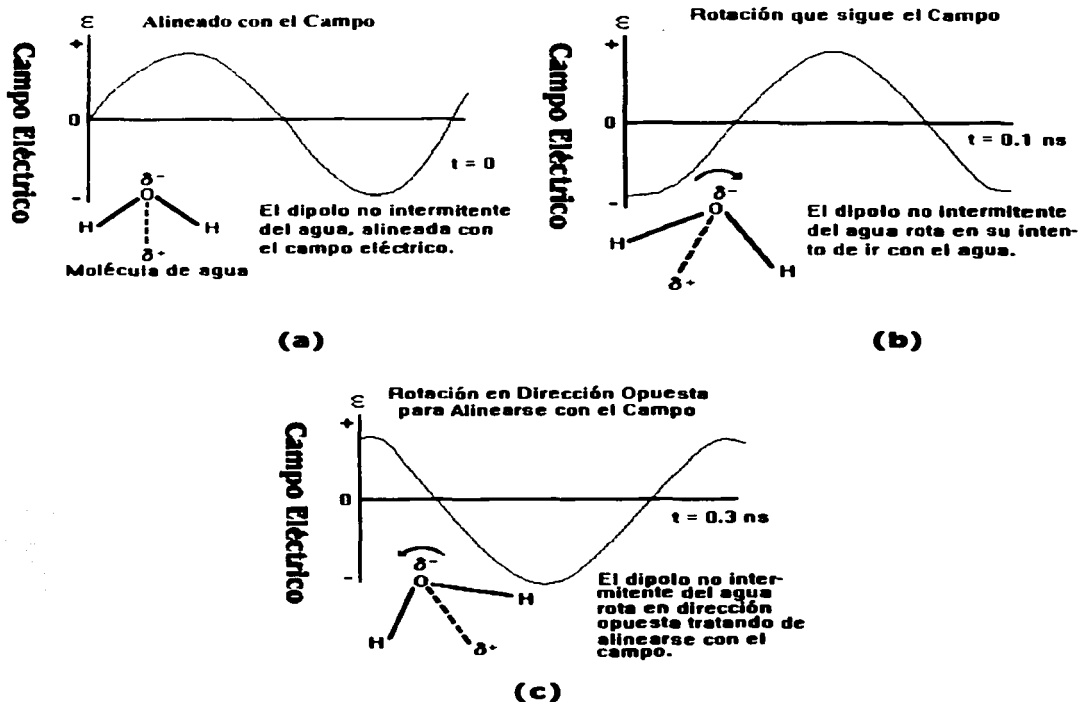


Figura 1. Interacción del campo eléctrico con las moléculas de agua.

Se menciona solamente la presencia de un campo eléctrico, porque la permeabilidad de los alimentos a los campos magnéticos es muy baja su influencia sobre el comportamiento de las microondas se considera nula. (Decareau, 1986).

La respuesta de las moléculas de agua con la presencia de un campo eléctrico esta limitada por el grado al cual se encuentra ligada a los otros componentes químicos del material. (Decareau, 1986).

En la mayor parte de las regiones acuosas la actividad dieléctrica del alimento se debe a la cantidad de agua libre y a las concentraciones de sales presentes en forma iónica; la actividad dieléctrica puede ser mayor o menor dependiendo de la unión que tenga el agua con proteínas, lípidos y contenido de minerales no disueltos. El efecto de las sales disueltas aumenta la actividad eléctrica. Los dipolos del agua parecen estar rotando en el campo eléctrico a menos que se vean impedidos por proteínas, carbohidratos o efectos de sales ligadas. Por ejemplo, los efectos de carga en la superficie son ilustrados para agua y sales ligadas en la región de monocapa. Aunque el equilibrio de enlace puede ser significativamente afectado en la región superficial cercana a las macromoléculas disueltas, el efecto de pH no parece ser significativo. Las sales libres con capas de hidratación de agua ligada se ven que migran por difusión. Los azúcares disueltos y alcoholes se han visto que se enlazan con el agua. Tal comportamiento se ilustra en la figura 2. (Rao y Rizvi, 1986).

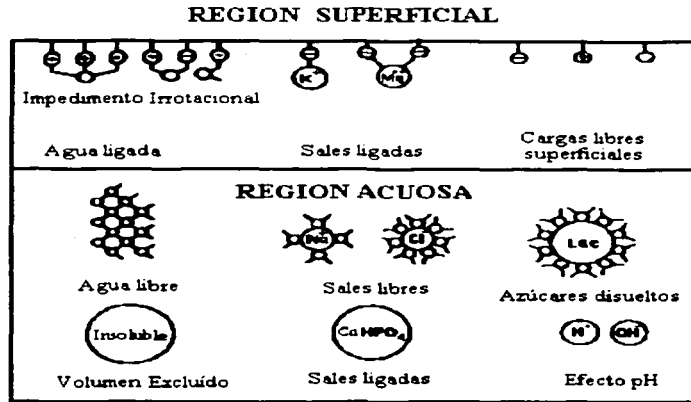


Figura 2. Interacciones de los constituyentes de alimentos con agua en presencia de un campo eléctrico a frecuencias de microondas.

1.1.1. Propiedades Dieléctricas .

Los materiales biológicos pueden entenderse como capacitores no ideales porque tienen la facultad de almacenar y disipar energía eléctrica de un campo electromagnético a través de un grupo de propiedades eléctricas expresadas como un número complejo llamado permisividad dieléctrica, el cual tiene un componente real denominado **constante dieléctrica (K')** y un componente imaginario conocido como **factor de pérdida (K'')**. En consecuencia la K' y K'' indican, respectivamente la habilidad de un material para almacenar energía eléctrica y su capacidad para disiparla en forma de calor (Mudgett, 1982).

Las propiedades dieléctricas del material, constante dieléctrica y factor de pérdida se definen por la siguiente ecuación:

$$K^* = K' - jK''$$

K' = Constante dieléctrica del material

K'' = Constante de pérdida

$$j = \sqrt{-1}$$

Las propiedades dieléctricas de alimentos y otros materiales biológicos a frecuencias de microondas son, para muchos propósitos básicos determinados por su humedad, sólidos y contenido de sales a diferentes frecuencias y temperaturas. (Mudgett, 1986).

Existe un factor que relaciona la K' y K'' , al cual se le llama tangente de pérdida ($\tan\delta$) o factor de disipación cuya relación se expresa:

$$\tan \delta = \frac{K''}{K'}$$

Ec.1.2

La $\tan \delta$ relaciona la habilidad del material a disipar la energía eléctrica por calor con la capacidad de ser penetrado por un campo eléctrico. El ángulo formado entre la corriente cargada y la corriente perdida es δ . (Mudgett, 1982; Sánchez, 1985).

1.1.2. Propiedades de transmisión.

Las propiedades dieléctricas básicas están relacionadas a otras propiedades que afectan la distribución de la energía eléctrica dentro del producto.

1.1.2.1. Coeficiente de atenuación.

La distribución de la energía dentro de un material biológico es relacionada por un coeficiente de atenuación (α') en el que se involucra la K' y la $\tan\delta$. El valor de α' varía con el tiempo y posición durante el ciclo de calentamiento, como una función de la frecuencia y del gradiente de temperaturas. (Mudgett, 1982)

$$\alpha'' = \frac{2f\pi}{c} \cdot \frac{K'' \cdot (1 + \tan^2 \delta) - 1}{2}$$

Ec.1.3

α' = Coeficiente de atenuación [=] 1/m
 c = Velocidad de la luz [=] m/s
 f = Frecuencia del horno [=] 1/s

El factor de atenuación determina la absorción de energía dentro del dieléctrico como una función de la profundidad a partir de su superficie.

1.1.2.2. Profundidad de penetración.

El valor de α' es comúnmente expresado como el recíproco de la profundidad de penetración (D_p), y mide la profundidad a la que el campo eléctrico decrece 1/e (37 %) de su valor en la superficie. La importancia principal de la profundidad de penetración es que mide la profundidad a la que la onda electromagnética puede penetrar en un medio conductor (alimento). (Datta, 1990).

Por consiguiente la profundidad de penetración se expresa en la siguiente ecuación como:

$$D_p = \frac{1}{\alpha'}$$

Ec.1.4

ó bien

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{K' \sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1}}$$

Ec.1.5

Las magnitudes relativas de la profundidad de penetración y las dimensiones del producto determinan la uniformidad del calentamiento. Si la profundidad de penetración es mucho mayor que el tamaño del producto existirá una mínima variación en la velocidad de calentamiento de un punto superficial respecto a otro situado en el interior del producto y el calentamiento será uniforme. De modo inverso, si la profundidad de penetración es muy pequeña comparada al tamaño del producto el calentamiento estará restringido a la superficie del mismo, y en el caso extremo, para el cual la profundidad de penetración sea mínima, el calentamiento del material se llevará a cabo de manera muy similar a como sucede en los procesos tradicionales, por consiguiente es deseable que el tamaño de los productos sea limitado a niveles consistentes con sus profundidades de penetración a la frecuencia del proceso. (Mudgett, 1982; Mudgett, 1986, Shiffmann, 1986).

1.2. Aplicaciones de microondas en procesos alimenticios.

Los procesos aplicados a alimentos en los cuales se emplea energía de microondas ofrecen diversas ventajas sobre procesos de calentamiento por conducción, como una mayor uniformidad en las temperaturas de calentamiento y reducción en el tiempo de proceso. Tales ventajas se ven reflejadas en un aumento en la demanda de los hornos caseros; sin embargo no ha tenido mucho éxito a nivel industrial por el elevado costo de energía y equipo, además que en algunos procesos no ofrece ninguna ventaja sobre la calidad del producto terminado. (Mudgett, 1982).

Se han realizado estudios sobre operaciones unitarias en las que se emplea energía de microondas, las cuales se compararon con los métodos tradicionales de calentamiento por conducción, con la finalidad de mostrar alternativas de futuras aplicaciones. (Ver tabla 1)

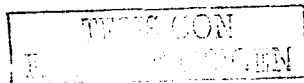


Tabla 1 Aplicación de las microondas en procesos industriales

PROCESO	APLICACION	VENTAJAS	DESVENTAJAS	ALTERNATIVAS
<u>Escaldado</u> Rosenberg, y Co. 1987a.)	Inactivación de enzimas en frutas y vegetales, maíz, patatas.	-Menos pérdida de vitamina C.	-Elevados costos de operación.	A nivel casero puede ser de gran utilidad, por ejemplo para desactivar la peroxidasa que ocasiona oscurecimiento en aguacate.
<u>Precocido y Cocido</u> (Decareu, 1986)	Jamón, patés de carne y aves, patatas.	-Incrementa la producción ya que no hay pérdida de producto por sobrecocida. -Menos pérdida de humedad en el precocido. -Reducción en el tiempo de cocción.	-En el cocido de los productos hay pérdida de humedad muy altas.	Llevar a cabo un precocido en microondas y posteriormente un calentamiento por método convencional para reducir las pérdidas de peso por humedad.
<u>Secado</u> (Decareu, 1986: Rosenberg y Bogl, 1987b.)	Papa, condimentos, pasta de tomate, bocadillos, arroz, huevo.	-En el caso de pastas se logra menos endurecimiento de la superficie. -Se emplea 1/3 menos de energía en el secado de pastas. -Reduce 2/3 partes del tiempo.	-No tuvo mucho éxito el secado de papa ya que hubo problemas con el control de la materia prima.	Emplear un pre-secado de pastas por microondas para eliminar más rápido el agua y evitar la proliferación de microorganismos y secado por método convencional para evitar que se quiebre la pasta.
<u>Pasteurización</u> (Decareu, 1986; Schlegel, 1992)	Pan rebanado y empacado, leche, cerveza, yoghurt, vino.	-Se obtiene mayor vida de anaquel. -Ahorros en costos de transportación debido a que hay entregas menos frecuentes. -Menos alteraciones en el color y sabor.	-En leche el proceso es muy complejo y más costoso.	Es difícil sustituir el método convencional por microondas debido a los costos y al manejo del producto.
<u>Esterilización</u> (Harifinger, 1992)	Alimentos empacados bajo presión como rebanadas de carne, pastas.	-Mejora la calidad del producto. -Reduce personal	Es elevado el alto costo de proceso y no puede aplicarse a productos enlatados.	Es difícil sustituir el método convencional por microondas debido a los costos y al manejo del producto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Continuación de la tabla 1.

PROCESO	APLICACION	VENTAJAS	DESVENTAJAS	ALTERNATIVAS
<u>Descongelado y atemperado</u> (Decareu, 1986)	Carnes de res, puerco pescado.	-Minimiza el crecimiento microbiano y descomposición en las regiones cercanas a la superficie. -Poca o ninguna pérdida de peso. -Incrementa la retención de jugos en carnes. -Menos espacio. -Reducción de cargas de trabajo. -Las pérdidas por goteo se reducen del 5-10%. -Ahorro de días en el tiempo.	-Durante la descongelación la capa externa puede absorber cantidades significativas de energía de microondas y producir un sobrecalentamiento cerca de la superficie.	El proceso de temperado ha tenido más éxito que el de descongelación, por lo que a nivel casero se recomienda que se utilice las microondas sin llegar a la descongelación total para evitar sobrecalentamiento en la superficie.
<u>Horneado</u> (Rosenberg y Bogl, 1987b.)	Panes, galletas, donas.	-Inactiva rápidamente la α -amilasa impidiendo que rompa el almidón.	-No se alcanza la formación de dorado.	-Emplear las técnicas convencionales y microondas. -Combinar con radiación infrarroja para dorar la superficie.

De las operaciones unitarias en las cuales se emplea energía de microondas, que ofrecen mayores ventajas y con posibilidades de alternativas son, cocido/precocido de microondas y temperado/descongelación (Ver tabla 1). En los procesos de cocción por microondas existen muchos avances, ya que por medio de modelos matemáticos y desarrollo experimental, se han establecido control en el peso de la muestra, forma, tiempos y potencias, sin embargo todavía existen limitaciones para minimizar el sobrecalentamiento, por ejemplo en productos de forma de placa (charolas) no se ha podido controlar sobrecalentamiento en las esquinas. Con respecto a la descongelación ocurre un problema difícil de resolver, que es el sobrecalentamiento del producto en la superficie, originándose zonas descongeladas y otras congeladas; esto ha restringido su empleo a nivel industrial y en algunos casos también caseros, sin embargo por las múltiples ventajas que ofrece, es conveniente realizar un estudio termodinámico y térmico detallado

del proceso de descongelación, para que en un futuro se puedan controlar las variables involucradas, y con ello poder resolver el problema con la ayuda de modelos matemáticos ya establecidos.

Una alternativa para disminuir los tiempos de proceso de descongelación, es someter el producto a un proceso de atemperado para aumentar la temperatura del producto sin llegar al punto de descongelación. Se ha observado que el proceso es más eficiente a potencias bajas o en hornos de microondas donde se regule un encendido-apagado del magnetrón.

1.3. Modelos matemáticos y sus aplicaciones.

Al referirnos a modelos matemáticos, en ocasiones lo traducimos a ecuaciones sin comprender su representación real.

Para entender la representación de un modelo matemático es importante ligar el concepto de modelo con la ciencia, y su definición según Neelamkavil (1987): "Un modelo es una representación simplificada de un sistema con el propósito de incrementar nuestra habilidad de entender, predecir y posiblemente controlar el comportamiento del sistema "

La definición **física** del modelo es la representación real de un objeto, sistema o proceso, mientras que la definición **conceptual** nos representa la traducción y simplificación de la estructura del modelo físico, es decir una vez definido el sistema que se quiere modelar se analizan los fenómenos involucrados y se realiza una serie de suposiciones con respecto al comportamiento del sistema con la finalidad de facilitar el planteamiento matemático.

Un modelo matemático es un conjunto de expresiones matemáticas que representa el funcionamiento de un proceso, de manera que al darle los valores de ciertas variables de entrada, calcula los valores del resto de las variables y parámetros del proceso.

Los modelos matemáticos son ampliamente usados en el campo de la ingeniería, física, química, sistemas biológicos, etc. Estos modelos generalmente se emplean para realizar un estudio sobre sistemas complejos donde pueden ocurrir diversos cambios simultáneos; tal es el caso de los procesos en los cuales pueden existir cambios de temperatura en función del tiempo. (Wastney, 1998)

1.3.1. Clasificación de los modelos matemáticos.

Existen diversas clasificaciones de los modelos matemáticos, las cuales se van a englobar en tres grupos, empíricos, análogos y fenomenológicos. (Ver tabla 2).

Es importante mencionar que la clasificación de los modelos se realizó basada en procesos en los que se involucra transferencia de calor.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 2. Clasificación de los modelos matemáticos.

MODELO	CARACTERISTICA	EJEMPLO
Empírico	Se comporta como una función y por lo general se obtiene de datos experimentales.	Con los datos obtenidos de temperatura con respecto al tiempo, en la posición "x" de un producto, que se calienta empleando energía de microondas; es posible establecer matemáticamente el tipo de función que involucra las dos variables.
Análogos	Se elaboran por analogía, al comparar el proceso en estudio, con procesos en los cuales se conoce su comportamiento.	La analogía que existe al comparar dos procesos son: el flujo de electrones en los circuitos eléctricos por medio de conductores, es análogo al fenómeno de conducción en la transferencia de calor cuando un cuerpo frío se calienta.
Fenomenológico	En este modelo se utilizan métodos teóricos basados en la conservación de masa, energía, momentum, etc. para proponer la forma del modelo matemático.	El modelo de la ley de Fourier con un término de generación de calor explica el proceso de calentamiento por microondas; resuelto matemáticamente por medio de métodos numéricos y/o analíticos.

(Özilgen, 1998).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

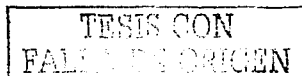
1.3.2. Modelación matemática.

La modelación matemática representa el proceso de desarrollo de un modelo o de un conjunto de ecuaciones para representar simultáneamente la estructura y el comportamiento de un sistema.

La modelación de sistemas biológicos difiere fundamentalmente de la modelación de sistemas físicos, porque la estructura del sistema físico es conocida y la del sistema biológico generalmente es muy compleja.

En todo sistema en estudio, es necesario definir, sobre la base de consideraciones teóricas, que estructura es la que va a representar el sistema modelo, con el fin de simplificar su estudio y facilitar su planteamiento matemático; sin embargo no se puede dejar a un lado el tipo de sistema que se quiere estudiar; por ejemplo, el patrón de calentamiento de agua pura en un horno de microondas es diferente al de agua con sal y/o azúcar; la adición de nuevos ingredientes implica interacciones entre los componentes.

Las suposiciones que se realizan al sistema, representan la formulación de una hipótesis, porque a través del proceso de modelación (Figura 3) se comprueba si se acepta, se modifica o se rechaza, de acuerdo a los resultados que se obtengan con el modelo matemático y comprobando con resultados experimentales.



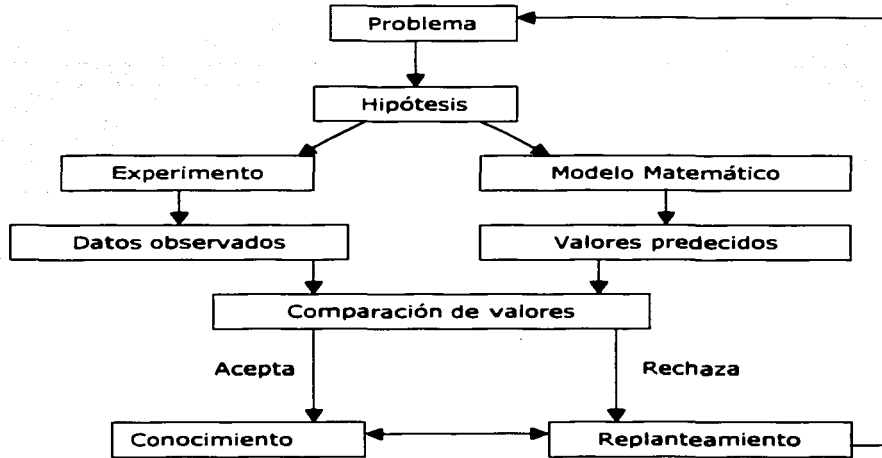


Figura 3. Proceso de modelación general. (Wastney, 1998).

La figura 3 representa el proceso de modelación, empleando el método científico, el cual puede ser aplicado a todos lo tipos de modelos científicos, sin embargo particularizando al modelo en estudio, el diagrama queda según la figura 4.

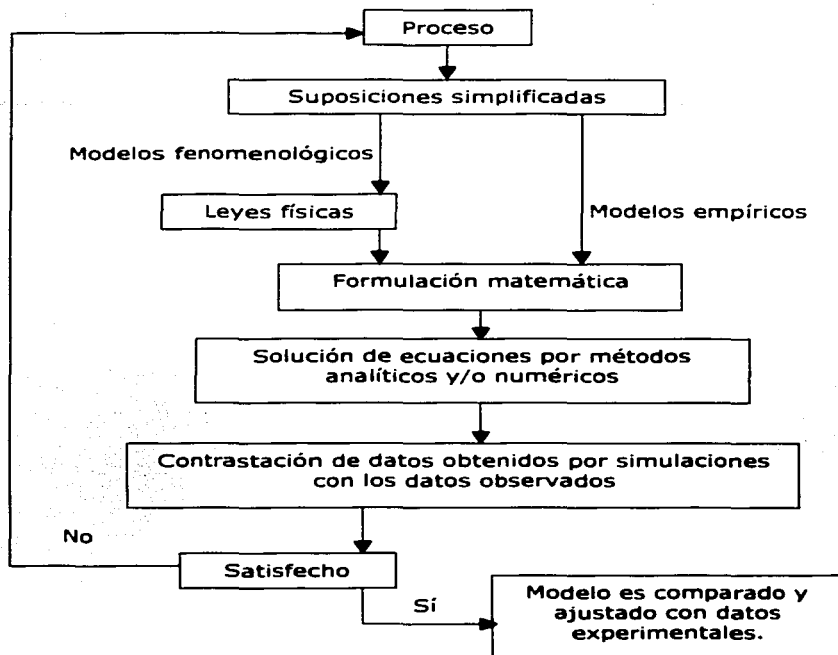


Figura 4. Proceso de modelación particular (Özilgen, M. 1998).

El proceso de modelación de la figura 4 indica que los datos simulados por computadora del modelo desarrollado se van a contrastar con datos simulados por modelos propuestos y con datos experimentales.

En el capítulo II se expone el diagrama ampliamente y se relacionará con los objetivos propuestos.

1.3.3. Modelación matemática aplicada a procesos de calentamiento por microondas.

Para formular un modelo matemático es de gran importancia conocer las variables que influyen en el comportamiento del sistema. Durante el proceso de calentamiento por microondas las propiedades dieléctricas y térmicas de alimentos son determinadas por su composición (humedad, sólidos, sales, etc.), las cuales varían con la temperatura y en el caso de las propiedades dieléctricas existe variación con la frecuencia.

Modelos matemáticos donde se explica el calentamiento por microondas caen en la clasificación de modelo fenomenológico ya que durante el proceso de calentamiento se involucran fenómenos de transferencia de calor que están ligados con teorías basadas en la conservación de la energía, tal es el caso del modelo de la segunda ley de Fourier.

Para muchos casos prácticos el término de "generación de calor" por microondas que se encuentra involucrado en la segunda ley de Fourier se explica y resuelve a partir de las ecuaciones de Maxwell, aplicadas a la deducción de ecuaciones de ondas electromagnéticas. Como una solución particular de las ecuaciones de Maxwell para ondas planas conductoras se aplica, para evaluar el calor absorbido por microondas la Ley de Lambert la cual se comporta como una función con decaimiento exponencial.

Es importante hacer mención que existen leyes dentro de la transferencia de calor por radiación que pudieran explicar el fenómeno, sin embargo para aplicaciones en alimentos no se han empleado o existe escasa información.

Los modelos matemáticos de calentamiento por microondas existentes han considerado la transferencia de calor conductivo, con generación interna de calor y pérdida de calor convectivo y

evaporativo en los límites de superficie. La temperatura inicial del producto, aire y la presión de vapor de agua en la superficie del producto y aire son necesarias para describir las condiciones iniciales y de frontera. (Lin, 1995).

Los estudios relacionados al modelado del proceso de calentamiento por microondas comienza con Ohlsson y Bengtsson (1971). Usaron la técnica de diferencias finitas para modelar el calentamiento con microondas en placas infinitas de jamón salado y carne. Los perfiles de temperatura de la predicción de modelos numéricos y mediciones experimentales comparados, mostraron resultados esperados. Ellos también mostraron que la conductividad térmica del material y el coeficiente de transferencia de calor superficial influían en la transferencia de calor durante el proceso de microondas. (Zhou y Co. 1995).

Kirk y Holmes (1975) predijeron perfiles de temperatura de sustancias con alto contenido de humedad a un determinado tiempo, empleando para su resolución el método de diferencias finitas. Los perfiles predichos concordaron con las temperaturas medidas en geles de 1% de ión-agar en agua.

Swami (1982) también empleó el método de diferencias finitas para describir el calentamiento por microondas de alimentos con alto contenido de humedad en materiales de forma cilíndrica y rectangular. El modelo predice que una distribución de temperaturas está acorde con las mediciones experimentales para muestras de gel con alto contenido de humedad y diferentes concentraciones de sales.

El análisis de la transferencia de calor y masa durante el calentamiento por microondas fue conducido por Tong (1988) y Wei y Co. (1985). El material de prueba usado fue pan, panecillos y bisquet. El modelo predice temperaturas comparados favorablemente con valores experimentales, que están dentro del 5% de los trabajos

de Tong. Tanto Tong (1988) y Wei y Co. (1985) usaron la formulación de diferencias finitas a una dimensión. Taoukis, y Co. (1987) también emplearon diferencias finitas a una dimensión para modelar un proceso de descongelación de cilindros de carne empleando el método de migración de isotérmicas modificado y describiendo el campo electromagnético por la Ley de Lambert.

Chen y Co. (1990) resolvió por medio de derivadas el término de generación de calor y propuso un modelo formulado por elemento finito axisimétrico para analizar la distribución de temperaturas de patata en forma cilíndrica.

1.3.4. Modelos matemáticos en transferencia de calor.

1.3.4.1. Modelo de la segunda ley de Fourier con generación de calor.

Durante la transferencia de calor por microondas se considera que los mecanismos presentes son conducción y radiación, el modelo que rige tal comportamiento es la ecuación de la segunda ley de Fourier con un término de generación de calor.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q_0$$

Ec.1.6

ρ = Densidad [=] kg/m³

C_p = Calor específico [=] J / kg C

$\partial T / \partial t$ = Velocidad de calentamiento [=] C/s

k = Conductividad térmica [=] J/m C S

$\nabla^2 T$ = Laplaciano de Temperatura [=] C/m²

Q_0 = Calor generado [=] W/ m³

El término Q_0 , se le denomina calor "generado" por radiación; en realidad es la transformación de energía electromagnética, proveniente de las microondas, a calor.

Los modelos matemáticos varían en función de las condiciones frontera que se establezcan, sin embargo todos ellos parten de la ecuación 1.6.

El Q_0 deberá ser evaluado en función de la potencia incidente en el material y de sus propiedades dieléctricas; para ello se mencionan los modelos que existen.

a) Aplicación de la Ley de Lambert.

En este modelo se considera la generación de calor Q_0 como un decaimiento exponencial de la superficie al interior del producto; así mismo se puede considerar Q_0 como una potencia de microondas que es atenuada exponencialmente como una función de la distancia de penetración dentro de la muestra.

$$P_z^L = P_0 e^{-2\alpha'z}$$

Ec.1.7

P_0 = Potencia incidente [=] W/m^2

P_z^L = Potencia absorbida a una distancia según Lambert [=] W/m^2 .

El valor de α' se determina a partir de la ecuación 1.3. (Datta y Co. 1992 y Ayappa y Co. 1991b.)

La Ley de Lambert es válida, para muestras semi-infinitas y su uso requiere una estimación de la intensidad de la potencia transmitida. Este modelo ha sido empleado para predecir perfiles de temperatura durante el calentamiento por microondas, tal como lo han realizado Ohlsson y Bengtsson (1971), Stuchly y Hamid (1972), Nykvist y Decareau (1976), Taoukis y Co. (1987) y Chan y Co. (1973). Los autores en trabajos anteriores han mostrado que la Ley de Lambert puede ser aplicada sólo en muestras que son 2 o tres veces mayor que la profundidad de penetración de microondas. Emplear la ley de Lambert, para la resolución de Q_0 , presenta limitaciones para

describir el patrón de calentamiento de alimentos, debido a que depende en gran medida del tamaño del producto; sin embargo se han realizado diversos estudios que presentan resultados favorables y comparables con los resultados obtenidos experimentalmente. Las ecuaciones de Maxwell, que gobiernan la propagación de radiación electromagnética en un medio dieléctrico, son las más viables para la resolución del problema (Ayappa y Co. 1991a,b).

b) Aplicación de las Ecuaciones de Maxwell.

El valor del calor generado o potencia absorbida puede obtenerse a partir de su relación con la intensidad del campo eléctrico, el cual puede derivarse de las ecuaciones de Maxwell que describen la propagación de las ondas electromagnéticas, las cuales están compuestas de un campo eléctrico y uno magnético que depende del espacio y del tiempo, tal como se muestra en las ecuaciones 1.8. y 1.9 (Datta , 1990).

$$\text{rot}E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

Ec.1.8

E= La intensidad de campo eléctrico [=] V/m

B= Inducción magnética [=] Wb/m².

$$\text{rot}H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

Ec.1.9

H= Intensidad del campo magnético [=] A/m

J= Flujo presente [=] A/m².

D= Desplazamiento eléctrico [=] C/m².

t= Tiempo [=] s

La densidad de potencia está asociada con el flujo de energía de las ondas electromagnéticas que es representada por el vector "S" Poynting que también se le conoce como el Teorema de Poynting.

$$S = \frac{1}{2} E \times H$$

Ec.1.10

Con el teorema de Poynting se permite evaluar la potencia disipada en el medio, la cual es expresada:

$$\int_S \mathbf{S} \cdot \mathbf{n} \, ds = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* \, dv + i\omega \int_V \left(\frac{\mu_0}{2} \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* + \frac{\epsilon_0 \epsilon''}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* \right) dv$$

Ec.1.11

\mathbf{S} = Vector Poynting (Densidad de potencia) [=] W/m² .

ϵ' = Constante dieléctrica del material

ϵ'' = Constante de pérdida

ϵ_0 = Constante dieléctrica del vacío 8.85 x 10⁻¹²

ω = Frecuencia angular [=] rad/s

\mathbf{E} = La intensidad de campo eléctrico [=] V/m

V = Volumen [=] m³

μ_0 = Permeabilidad en el espacio libre [=] H/m

La ecuación 1.11. representa que la densidad de potencia neta a través de una superficie S encerrada dado un volumen, es igual a la potencia disipada en el medio (parte real) más el almacenado en un campo eléctrico y magnético (parte imaginaria).

Aplicando el teorema de divergencia a la ecuación 1.11. queda:

$$\nabla \cdot \mathbf{S} = -\frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* + i\omega \left(\frac{\mu_0}{2} \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* + \frac{\epsilon_0 \epsilon''}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* \right)$$

Ec.1.12

De la ecuación 1.12. sólo se considera como la potencia absorbida según Maxwell la parte real. (Ayappa y Co. 1991b)

$$P_Z^M = -\text{Re}(\nabla \cdot \mathbf{S})$$

Ec.1.13

P_Z^M = Potencia Absorbida según Maxwell [=] W/m³

Re=Parte real

La ecuación 1.13. representa:

$$P_Z^M = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' E^2$$

Ec.1.14

El calor absorbido por microondas Q_0 es igual a la potencia absorbida, según el modelo de Maxwell. (Ayappa y Co. 1991b)

En la ecuación 1.14. se observa que la potencia absorbida está en función de la intensidad de campo eléctrico, que a su vez depende de diversos factores:

1) Cierta tipo de ondas estacionarias causan que la distribución espacial del campo dentro de la cavidad sea desigual. El campo eléctrico es cero a la posición de los nodos y no se genera calor en el alimento. En los antinodos el campo eléctrico es máximo y la absorción de calor es mayor.

2) El tamaño global del alimento influye en su campo eléctrico interno. Cuando las microondas son raramente reflejadas desde las paredes metálicas del horno, pueden directamente ser dirigidas al alimento, pero podrían alcanzar otra pared sin encontrarse con el alimento. Así, una fricción de la energía de microondas o es disipado por las paredes o regresa al magnetrón, por lo que la energía disipada aumenta con los volúmenes de la carga.

3) El campo eléctrico presente en el alimento puede ser afectado por el diseño del envase, se ha observado que un envase de aluminio de multicompartmento en el que cada componente tiene la parte superior cubierta por aluminio, la presencia del mismo material como único, da una mayor distribución de campo eléctrico. Tales envases controlan la potencia total de absorción, así como la distribución de energía, por consecuencia los alimentos en diferentes compartimentos pueden ser calentados aproximadamente a la misma temperatura final con un perfil de calentamiento más uniforme. (Shiffmann, 1992)

4) Afectan al campo eléctrico el diseño del horno y las propiedades dieléctricas del material. (Datta ,1990)

La figura 5 representa las diferencias y similitudes de los modelos de Lambert con el de Maxwell,

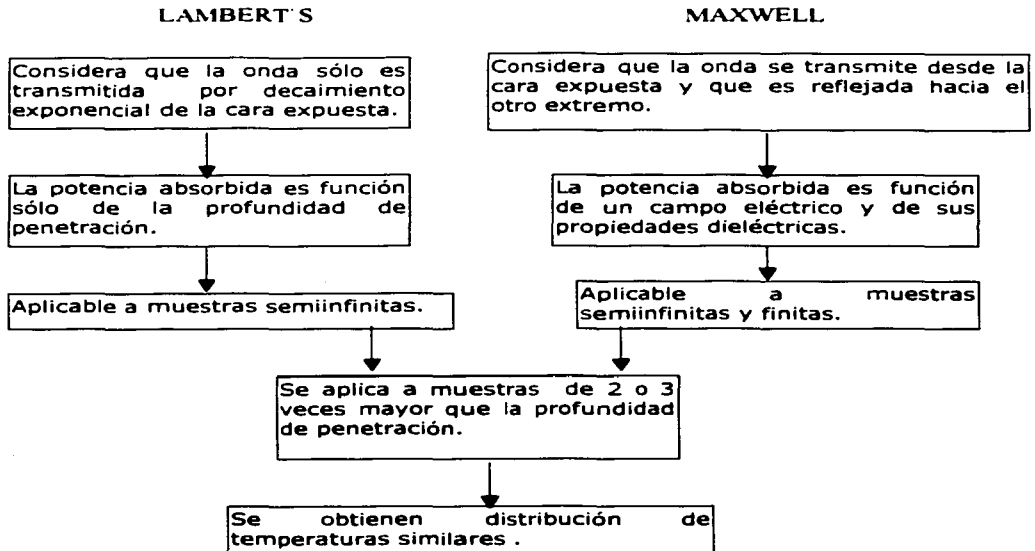


Figura 5. Comparación en los modelos: Ley de Lambert y Ecuaciones de Maxwell.

1.3.4.2 Modelo de calentamiento por microondas considerando pérdidas de calor por convección en la superficie y por evaporación.

En éste modelo se parte de la ecuación 1.6.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q_0$$

La condición frontera que se establece en la superficie del alimento es:

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = h (T_a - T_{sa}) - \frac{Mv\Delta H_v}{A}$$

Ec. 1.15

k = Conductividad térmica [=] J/m C s

$\partial T/\partial t$ = Velocidad de calentamiento [=] C/s

h = Coeficiente convectivo [=] J/ m² C s

T_a = Temperatura del ambiente (En la cavidad del horno) [=] C

T_{sa} = Temperatura de la superficie del alimento [=] C

Mv = Velocidad de flujo de masa de vapor de agua [=] kg/s m²

ΔH_v = Calor latente de vaporización [=] J/kg

A = Area [=] m²

En el lado derecho de la ecuación 1.15. el término se refiere a una pérdida de calor por convección de la superficie del alimento hacia el exterior (cavidad del horno); y el segundo término es la pérdida de calor por evaporación del agua.

El modelo (ecuación 1.15) fue aplicado por Chen, y Co. (1993). Ellos resolvieron el modelo mediante el método de elemento finito, considerando el sistema cilíndrico, bidireccional y axisimétrico; además evaluaron Q_o a partir de la ley de Lambert. Determinaron matemáticamente los perfiles de temperaturas con respecto al tiempo, comparando los valores simulados con datos experimentales de papa y obtuvieron desviaciones a temperaturas superiores a los 80 C. Ellos asumieron tal comportamiento a que no consideraron el sistema en tres dimensiones y al efecto que pudo ocasionar el empleo de la Ley de Lambert.

Lyn y Co. (1995) resolvieron el modelo de igual forma, analizando además para geometría rectangular. El modelo matemático fue verificado analíticamente con un software comercial TWODEPEP, obteniéndose resultados favorables. Realizaron un análisis de

sensibilidad mostrando que la variación en la difusividad térmica, propiedades dieléctricas y potencia incidente de microondas originan una variación significativa en las temperaturas. La validación del modelo la realizaron con geles de alginato de sodio a diferentes concentraciones, los resultados mostraron que los valores simulados y los experimentales en la geometría rectangular son muy similares, sin embargo en la geometría cilíndrica los valores predichos fueron más altos que los obtenidos experimentalmente. Se observó distribuciones de temperaturas axisimétricas, lo cual no se predijo con el modelo. Tal comportamiento pudo deberse a que con la ley de Lambert no se describe totalmente la distribución de la potencia de las microondas alrededor de la muestra. Así mismo consideran que es necesario realizar un análisis en tres dimensiones y considerar la transferencia de masa.

1.3.4.3. Modelo de transferencia de calor y transferencia de masa durante el calentamiento por microondas.

Los autores consideran que es importante considerar la transferencia de masa, porque se ha determinado que la difusividad de la humedad varía considerablemente con la humedad del material alimenticio, debido a las interacciones entre la estructura compleja de los polímeros del alimento (almidón, celulosa o proteína) y el agua. Fish (1957), usando un método de isotermas de sorción, encontró que la difusividad de humedad de los geles de almidón aumenta considerablemente al aumentar la humedad. Saravacos (1967), usando la misma técnica, encontró que la variación de la difusión de humedad con el contenido de humedad depende de la estructura física del material. (Karathanos, y Co. 1990).

Como el estudio se realizó sobre la base de dos fenómenos, transferencia de calor y masa, se estableció para cada una condiciones de frontera diferentes.

En el caso de transferencia de calor se parte de la ecuación 1.6.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + Q_0$$

La condición frontera que se estableció es igual a la ecuación 1.15.

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = h (T_a - T_{sa}) - \frac{Mv\Delta H_v}{A}$$

En el caso del fenómeno de transferencia de masa se parte de la segunda ley de Fick.

$$\frac{dM}{dt} = D \nabla^2 M$$

Ec. 1.16

$\partial M / \partial t$ = Velocidad de difusión [=] kg/s

$\nabla^2 M$ = Laplaciano de Masa [=] kg/m²

D = Difusividad de humedad [=] m²/s.

La condición frontera que se estableció es, pérdida de humedad debido a una difusión de agua del producto hacia el exterior, que es originada por el aumento de temperatura dentro del producto.

$$D \frac{\partial M}{\partial z} = h_m (M_a - M_s)$$

Ec. 1.16.

$\partial M / \partial z$ = Pérdida de humedad con respecto a la posición [=] kg/m

h_m = Coeficiente convectivo de transferencia de masa [=] m/h

M_a = Contenido de humedad del ambiente [=] kg/kg

M_s = Contenido de humedad en la superficie [=] kg/kg

Zhou, y Co. (1995) emplearon el modelo matemático (ecuación 1.16.) y lo resolvieron numéricamente por el método de elemento finito para geometría rectangular y cilíndrica en 3 dimensiones. El valor de Q_0 lo evaluaron a partir de la ley de Lambert.

Ellos establecieron una ecuación de potencia absorbida en función del peso de la muestra, ya que se encontraron variaciones de la potencia absorbida a diferentes pesos. El modelo lo verificaron analíticamente con un software comercial mostrando resultados favorables. La validación del modelo la llevaron a cabo con muestras de papa, calentando las muestras hasta 60 s. Los resultados mostraron variación entre los valores simulados y los experimentales del 15.5 % para placa y 11.4 % para cilindro. En los valores de humedad la diferencia fue para placa del 2.4% y en cilindro 2.1%. Observaron que en datos experimentales las temperaturas son menores que las simuladas con el modelo, aludiendo tal efecto a una distribución de potencia en el horno no uniforme, lo cual no se consideró en el modelo.

El resumen de los modelos aplicados a procesos de microondas de productos cilíndricos, en los que emplean ley de Lambert para describir el calor absorbido por microondas y método de elemento finito se muestran en la Tabla 3.

Al revisar la tabla 3 de los modelos en estudio sólo, los obtenidos por Zhou, y Co, (1993) y Lin, (1995) verificaron el modelo por métodos analíticos y con software comercial, así mismo indican la realización de pruebas de sensibilidad a sus modelos; el no realizar un análisis de sensibilidad al modelo ocasiona una vaga explicación de las desviaciones que mostraron los valores predichos respecto a los experimentales.

Tabla 3. Resumen de los modelos estudiados

AUTOR	SISTEMA	CONDICIONES FRONTERA	VALIDACION/COMPARACION
Chen, y Co. (1993)	Bidireccional (Axisimétrico) Homogéneo Isotrópico	<ul style="list-style-type: none"> *Pérdida de calor por convección. *Pérdida de calor por evaporación del agua. 	<p>Producto: Papa</p> <ul style="list-style-type: none"> *Se determino calentamiento en el centro en diámetros de cilindro 3.5 cm y una relación D/L=1. *La comparación de los valores experimentales y simulados se desvió significativamente después de 80 C, a 15 s de iniciado el proceso de calentamiento. *Sólo se realizó comparación de resultados.
Lyn Y. E. y Co. (1995)	Bidireccional (Axisimétrico) Homogéneo Isotrópico	<ul style="list-style-type: none"> *Pérdida de calor por convección. *Pérdida de calor por evaporación del agua. 	<p>Producto: Geles de alginato de sodio</p> <ul style="list-style-type: none"> *Existe variación de temperaturas asimétrica debido a una no-uniformidad de la distribución de potencia incidente en la superficie. *Los resultados simulados, validados con los experimentales mostraron calentamiento en el centro en radios pequeños (2 y 3 cm) a los 30 s y relaciones D/L=1.2, 2.4. *En radios mayores el aumento de temperatura en el centro es menos predominante. *No se indica claramente la relación existente entre los resultados simulados y experimentales. *El método de elemento finito fue verificado con un software comercial los resultados mostraron una diferencia máxima de temperatura del 0.14%. *El modelo fue sensible a cambios en difusividad térmica y absorción de potencia.
Zhou L. y Co. (1995)	Tridireccional Homogéneo Isotrópico	<ul style="list-style-type: none"> *Pérdida de calor por convección. *Pérdida de calor por evaporación del agua. *Pérdida de humedad debido a la evaporación. 	<p>Producto: Papa</p> <ul style="list-style-type: none"> *Distribución no uniforme en la potencia incidente del horno. *La validación de los datos simulados y experimentales mostraron un 15% de diferencia relativa. *Máxima diferencia de temperatura 8.7 C después de 60 s a una potencia de 370 W. *El método de elemento finito fue verificado con un software comercial los resultados mostraron una diferencia máxima de temperatura del 0.14%. *Se observo calentamiento en el centro en cilindros de radio de 2.5 cm y relación D/L= 1.25. *No se realizó análisis de sensibilidad.
Vilayannur y Co. (1998b)	Tridireccional Homogéneo Isotrópico	<ul style="list-style-type: none"> *Pérdida de calor por convección. *Pérdida de calor por evaporación del agua. *Pérdida de humedad debido a la evaporación. 	<p>Producto: Papa</p> <ul style="list-style-type: none"> *Se observó calentamiento en el centro del cilindro a los 14 s a una potencia de 313 W a un diámetro de 3 cm y relación D/L=0.6. *La validación de los datos de temperaturas simulados y experimentales con un máximo de porcentaje de error del 22 % y una desviación estándar de 2.8 C. *El modelo fue sensible a cambios en el volumen del producto.

Zhou y Co. (1993) y Vilayannur y Co. (1998b), establecen las mismas condiciones de frontera y la descripción del comportamiento de calor absorbido en el producto son similares. Los resultados mostraron respuestas diferentes, en el caso de Zhou y Co. (1995) las diferencias entre los resultados experimentales y teóricos fueron a los 60 s, sin embargo en el modelo de Vilayannur y Co. (1998b) fue a los 14 s. Tal hecho puede deberse a la relación D/L que se maneja ya que en ambos modelos la relación es diferente, lo cual influye en las dimensiones del producto y por consiguiente en su volumen.

Chen, y Co. (1993) aparentemente no llevaron a cabo una validación porque no se indica con claridad los métodos de experimentación ni el control del producto, sin embargo los resultados obtenidos de su modelo dan comportamiento similar al obtenido por Vilayannur (1998b), lo que se confirma que la relación D/L influye significativamente en los resultados.

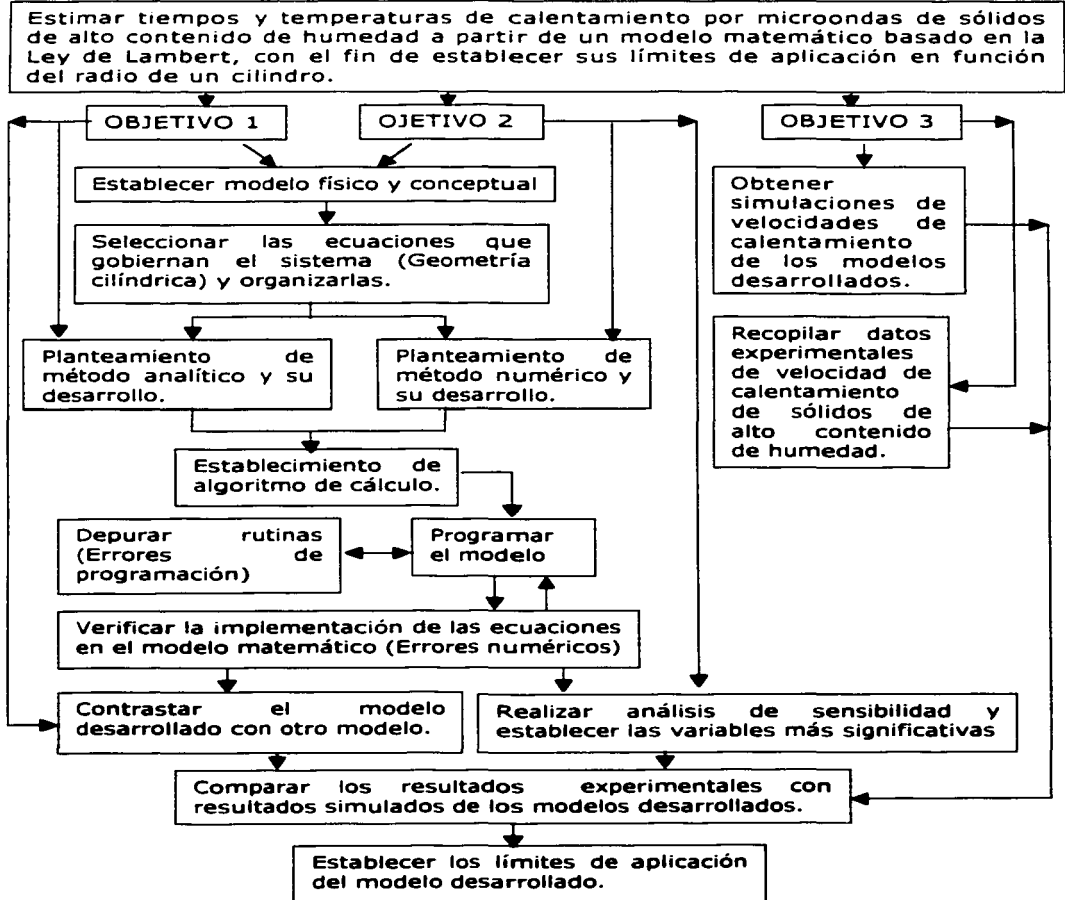
En los modelos de la tabla 3 se observa, que en los resultados experimentales y simulados existe un calentamiento en el centro del cilindro que se ve influenciado por las dimensiones del producto, sin embargo es importante destacar que en el trabajo realizado por Lin (1995), se realizó un estudio más completo de los criterios que se deben tomar en cuenta para llevar a cabo la validación de un modelo.

Es importante destacar que en la ley de Lambert no se consideran los efectos por reflexión de las ondas, sin embargo con sus limitaciones, se pueden obtener patrones de calentamiento similares a los experimentales.

CAPITULO II DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMATICOS DE SIMULACION

2.1. Diagrama de modelación matemática.

En el siguiente diagrama se muestra el proceso de desarrollo de modelación matemática que se estudió.



2.2. Establecimiento del modelo físico y conceptual.

El fenómeno que se modelo es el calentamiento de un cilindro (Ver figura 6) de productos a diferentes contenidos de humedad aplicando energía de microondas, considerando un sistema unidireccional (radial). Partiendo del hecho de que el cilindro se encuentra depositado en una cavidad de horno de microondas a temperatura T_{∞} , se consideraron condiciones simétricas.

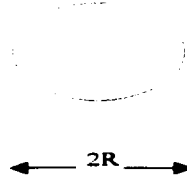


Figura 6. Condiciones simétricas del cilindro.

Cuando se acciona el horno, un flujo de aire circula dentro de la cavidad que está en contacto con el producto teniendo por consiguiente un flujo de calor (energía transferida por unidad de tiempo por unidad de área) que es igual a $h (T_{\infty} - T_{sa})$.

h = Coeficiente convectivo [=] $W/m^2 h$

T_{∞} = Temperatura dentro de la cavidad del horno [=] C

T_{sa} = Temperatura de la superficie del alimento [=] C

Durante el proceso de calentamiento se estableció que las microondas van a penetrar en el producto con una determinada potencia inicial P_0 , si hay un movimiento del plato giratorio, las ondas van a penetrar en todos los sentidos, sin embargo dentro del análisis sólo se va a considerar la dirección radial. (ver figura 7)

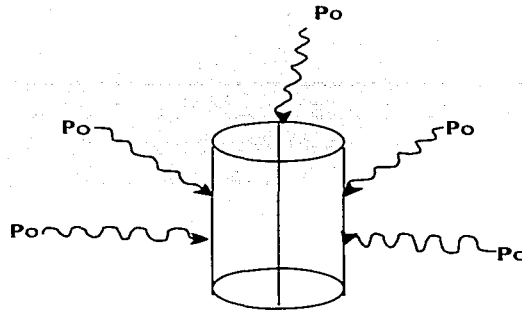


Figura 7 Modelo Físico del calentamiento por microondas de un cilindro.

Dado el esquema 7 se asume:

- a) El material es isotrópico
- b) Las propiedades térmicas y dieléctricas se consideran independientes de la temperatura.
- c) Estructura homogénea (sistema tipo "mezcla perfecta").
- d) Geometría cilíndrica considerando eje axisimétrico.
- e) La descripción del calor absorbido por microondas basado en el modelo de Lambert.

2.3. Ecuaciones que rigen el comportamiento.

Para describir el fenómeno de calentamiento por microondas se parte de la ecuación fundamental por conducción que es la segunda ley de Fourier con un término de generación de calor:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r^2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_0$$

Ec.2.1.

C_p = Calor específico [=] J / kg C
 k = Conductividad térmica [=] J/m C h
 Q_0 = Calor generado [=] W/ m³
 r = Dirección radial [=] m
 T = Temperatura [=] C
 t = Tiempo [=] s
 z = Dirección axial [=] m
 ρ = Densidad [=] kg/m³
 θ = Dirección tangencial [=] rad.

En el modelo físico se asume que el sistema es unidireccional, considerando la dirección radial, por lo que la ecuación 2.1. queda como:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_0$$

Ec.2.2.

Aplicando la regla de la cadena a la ecuación 2.2.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial T}{\partial r} \left(\frac{\partial r}{\partial r} \right) + Q_0$$

Ec.2.3.

Reacomodando la ec. 2.3.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{k}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_0$$

Ec.2.3.

Dentro de la ecuación de calor de Fourier se incluye el término Q_0 que también corresponde a una ecuación primaria por lo que se describirá con detalle su desarrollo.

2.4. Planteamiento del modelo matemático para la obtención de Q_0 basado en el modelo de Lambert.

El desarrollo del modelo para la obtención de Q_0 se realizó analíticamente y se realizó partiendo del modelo de Lambert, el cual se comporta según la siguiente función:

$$P_r^L = P_o e^{-2\alpha r}$$

Ec.2.4.

P_o = Potencia incidente del horno de microondas [=] W

P_r^L = Potencia absorbida según Lambert [=] W

α' = Coeficiente de atenuación [=] 1/m

Para el desarrollo del modelo se estableció que al considerar una dirección (radial), la potencia incidente P_o que proviene del horno de microondas, se ve afectada, por lo que fue necesario encontrar un factor el cual involucre sólo la P_o en la dirección radial. Para ello se obtuvo una potencia radial (P_r), tal como se indica en la ecuación 2.5.

$$P_r = P_o * RAR$$

Ec.2.5.

La obtención de RAR se realizó tomando como referencia la figura 8, la cual representa el cilindro y las partes que lo conforman por separado, un rectángulo (envolvente) y una circunferencia.

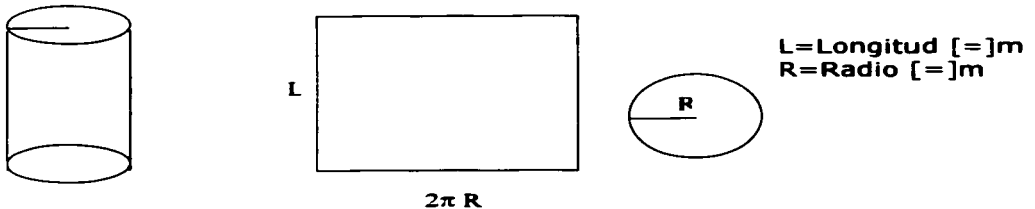


Figura 8. Representación de un cilindro y las partes que lo conforman.

Como se menciona, el análisis se realizó en dirección radial y la RAR se obtuvo considerando las áreas de las partes del cilindro:

$$RAR = \frac{A_c}{A_T}$$

Ec.2.6.

A_c = Area de la circunferencia [=] m^2

A_T = Area total del cilindro [=] m^2

Según la figura 8, la relación de áreas queda:

$$A_c = \pi R^2$$

Ec.2.7.

$$A_T = 2A_c + A_E$$

Ec.2.8.

A_E = Area del envolvente [=] m^2

$$A_E = 2\pi RL$$

Ec.2.9.

Sustituyendo la Ec. 2.9 y 2.7. en la Ec. 2.8.

$$A_T = 2\pi R^2 + 2\pi RL \quad \text{o bien,} \quad A_T = 2\pi R (R + L)$$

Ec.2.10.

Sustituyendo las ecuaciones 2.7. y 2.10. en 2.6.

$$RAR = \frac{2\pi R^2}{2\pi R(R + L)} \quad \text{o bien} \quad RAR = \frac{R}{(R + L)}$$

Ec.2.11.

Con la ecuación 2.11. se obtiene la relación de áreas y se sustituye finalmente en la ecuación 2.5.

$$Pr = P_o * \left(\frac{R}{R + L} \right)$$

Ec.2.12.

Para desarrollar el modelo con el que se obtiene Q_o , que representa el calor generado volumétrico, se consideró que Q_o puede expresarse en términos de intensidad de potencia en 3 direcciones ortogonales.(Zhou, 1995).

$$Q_o = \frac{\partial P_{ir}}{\partial V} + \frac{\partial P_{jo}}{\partial V} + \frac{\partial P_{kz}}{\partial V}$$

Ec.2.13.

P_{ir} = Potencia en dirección radial [=] W
 P_{jo} = Potencia en dirección tangencial [=] W
 P_{kz} = Potencia en dirección axial [=] W
 ∂V = Parcial de volumen [=] m³

Por las consideraciones empleadas, al modelo físico, sólo se consideró la dirección radial y la ecuación 2.13. quedó:

$$Q_o = \frac{dP_{ir}}{dV}$$

Ec.2.14.

La ecuación 2.14. representa una ecuación diferencial ordinaria de primer orden que se puede resolver mediante el método de separación de variables para ser integrado.

$$Q_o dV = dP_{ir}$$

$$\int Q_o dV = \int dP_{ir}$$

Ec.2.15.

Para la resolución de la ecuación 2.15. el término P_{ir} se expresa en términos de la potencia absorbida según el modelo de Lambert por lo que $P_{ir} = P_r^L$, de ahí la ecuación 2.4. se sustituye en la 2.15.

$$Q_o \int dV = \int d(P_o e^{-2\alpha r})$$

Ec.2.16.

Para este estudio P_o se ve modificada considerando que la potencia incide sólo en la dirección radial, es decir $P_o = P_r$, por consiguiente la ecuación 2.5, se sustituye P_o de la ecuación 2.16. y como $dV = r dr d\theta dL$, entonces la ecuación 2.16. queda:

$$Q_o \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^r r dr = \int d \left(P_o \cdot \left(\frac{R}{L+R} \right) e^{-2\alpha r} \right)$$

Ec.2.17.

La integral del lado izquierdo queda en función de "r" por ser la distancia radial, por lo que sólo se integra con respecto a dr, quedando como constante L.

$$2\pi L Q_o \int r dr = \int d \left(P_o \cdot \left(\frac{R}{L+R} \right) \right) \cdot e^{-2\alpha r}$$

Ec.2.18.

Para poder realizar la integral de la ecuación 2.18. fue necesario establecer el límite inferior y superior.

En la figura 9 se muestra los límites establecidos para obtener el modelo, dentro de los cuales se consideró que las microondas inciden por ambos lados del cilindro; así se involucra el calor absorbido del lado derecho cuando incide la microonda más el calor absorbido del lado izquierdo.

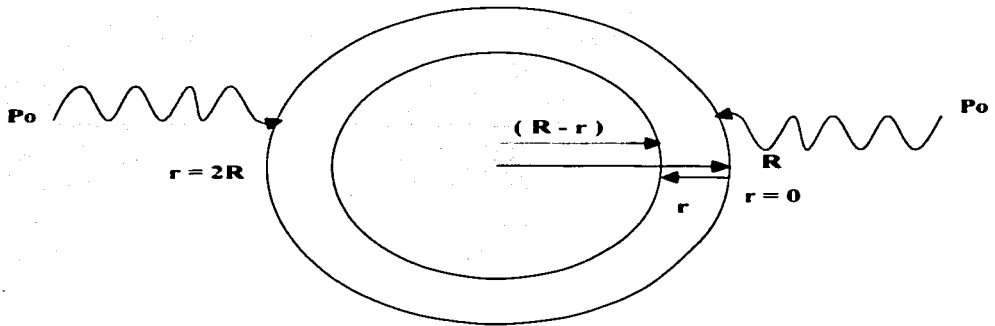


Figura 9. Representación de la potencia incidente en un cilindro.

Los límites de la ecuación 2.18. considerando la incidencia de las microondas de derecha a izquierda son:

$$2\pi LQ \int_0^r r dr = \int_R^{(R-r)} d\left(P_o \cdot \left(\frac{R}{L+R}\right) e^{-2\alpha r}\right)$$

Ec.2.19.

Resolviendo la ecuación 2.19.

$$2\pi LQo \frac{r^2}{2} \Big|_0^r = P_o \cdot \left(\frac{R}{L+R}\right) e^{-2\alpha r} \Big|_R^{(R-r)}$$

$$\pi LQor^2 = P_o \cdot \left(\frac{R}{L+R}\right) \left[e^{-2\alpha(R-r)} - e^{-2\alpha R} \right]$$

Despejando Qo .

$$Qo = \left(\frac{P_o \cdot R}{\pi \cdot L \cdot (L+R)} \right) \cdot \left(\frac{e^{-2\alpha(R-r)} - e^{-2\alpha R}}{r^2} \right)$$

Ec.2.20.

Los límites de la ecuación 2.18. considerando la incidencia de las microondas de izquierda a derecha son:

$$2\pi LQ \int_r^{2R} r dr = \int_{2R}^{(R-r)} d\left(P_0 \left(\frac{R}{L+R}\right) e^{-2\alpha r}\right)$$

Ec. 2.21.

Resolviendo la ecuación 2.22.

$$2\pi LQ_0 \frac{r^2}{2} \Big|_r^{2R} = P_0 \left(\frac{R}{L+R}\right) e^{-2\alpha r} \Big|_{2R}^{(R-r)}$$

$$\pi LQ_0(4R^2 - r^2) = P_0 \left(\frac{R}{L+R}\right) [e^{-2\alpha(R-r)} - e^{-4\alpha R}]$$

Despejando Qo.

$$Q_0 = \left(\frac{P_0 \cdot R}{\pi \cdot L \cdot (L+R)}\right) \cdot \left(\frac{e^{-2\alpha(R-r)} - e^{-4\alpha R}}{4R^2 - r^2}\right)$$

Ec. 2.22.

Sumando la ecuación 2.20. y 2.22.

$$Q_0 = \frac{P_0 \cdot R}{\pi \cdot L \cdot (L+R)} \left[\left(\frac{e^{-2\alpha(R-r)} - e^{-2\alpha R}}{r^2}\right) + \left(\frac{e^{-2\alpha(R-r)} - e^{-4\alpha R}}{(4R^2 - r^2)}\right) \right]$$

Ec. 2.23.

La ecuación 2.23. representa el modelo desarrollado analíticamente con el cual se puede calcular el calor absorbido total de las microondas a una distancia radial "r".

Para resolver el Qo de la Ec. 2.23., es necesario obtener el valor de coeficiente de atenuación (α'), que se obtiene de las ecuaciones 2.2. y 2.3.

$$\alpha = \frac{2f\pi}{c} \sqrt{\frac{K'' \cdot 1 + \tan^2 \delta}{2} - 1}$$

$$\tan \delta = \frac{K''}{K'}$$

El valor de la frecuencia de microondas se va a dejar constante de 2450 MHz, por la razón de que la mayor parte de los hornos caseros operan a esa frecuencia.

Los valores de la constante dieléctrica K' y constante de pérdida K'' de alimentos que se emplearan se van a obtener de referencia hemerográfica. (Ayappa, 1991b).

Considerando que al existir un valor de calor absorbido en el interior del producto, entonces va a originarse un aumento de temperatura, el cual se obtuvo según las siguientes suposiciones:

Retomando la ecuación 2.3. (Modelo de Fourier)

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{k}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_o$$

El desarrollo del modelo analíticamente consiste en considerar sólo la transferencia de calor por microondas, es decir los términos que representan el calor por conducción se cancela de la Ec. 2.3., quedando:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = Q_o$$

Ec. 2.24

De la ecuación 2.24. se despeja dT.

$$dT = \frac{Q_o}{\rho C_p} dt$$

Ec. 2.25

De la ecuación 2.25. se considera como un incremento, la diferencial de temperatura y del tiempo.

$$\Delta T = \frac{Q_o}{\rho C_p} \Delta t$$

Ec. 2.26

Sustituyendo Q_0 de la ecuación 2.23. en la ecuación 2.26.

$$\Delta T = \frac{\Delta t}{\rho C_p} \left(\pi \cdot L \cdot (L + R) \right) \cdot \left(\frac{e^{-2\alpha(R-r)} - e^{-4\alpha R}}{4R^2 - r^2} \right)$$

Ec. 2.27

La ecuación 2.27. representa un modelo desarrollado analíticamente, en el cual se considera sólo la transferencia de calor por microondas y con el que se obtiene el incremento de temperatura en el interior del producto cuando el calor es absorbido desde r_1 hasta r_2 .

2.5. Planteamiento del modelo matemático basado en el modelo de Fourier.

El modelo de la segunda ley de Fourier es la ecuación 2.3.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{k}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_0$$

Para su resolución y desarrollar el modelo, se empleó el método numérico de diferencias finitas explícito tomando como referencia los nodos centrales. (ver figura 10.)

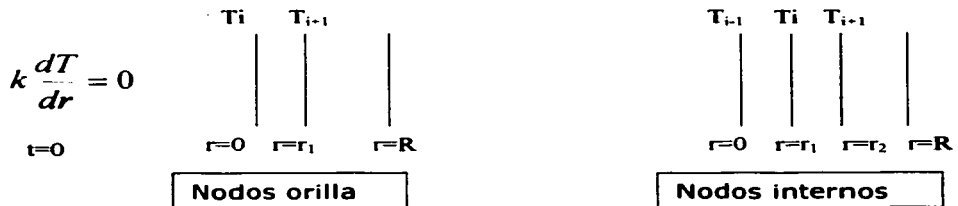


Figura 10. Esquema de diferencias finitas explícito.

Condiciones de frontera: Pérdidas de calor por convección

En la condición de frontera se considera una pérdida de calor del producto hacia el exterior.

$t > 0$

$R = r$

$$-k \frac{dT}{dr} = h(T_i - T_a)$$

$h =$ Coeficiente convectivo [=] $W/m^2 C$

$R =$ Radio del cilindro [=] m

$T_a =$ Temperatura en la cavidad del horno [=] C

$T_i =$ Temperatura en el nodo orilla i [=] C

Nodos orilla

Para el nodo orilla se aplica la condición de frontera traducida al esquema de diferencias finito hacia atrás.

$$-k \frac{(T_i - T_{i+1})}{\Delta r} = h(T_i - T_a)$$

Ec.2.28.

De la ecuación 2.28. se despeja T_i .

$$-kT_i + kT_{i+1} = h\Delta r(T_i - T_a) \quad = \quad -kT_i + kT_{i+1} = h\Delta rT_i - h\Delta rT_a$$

$$-kT_i - h\Delta rT_i = -h\Delta rT_a - kT_{i+1} \quad = \quad T_i(-k - h\Delta r) = -h\Delta rT_a - kT_{i+1}$$

$$T_i = \frac{-h\Delta rT_a - kT_{i+1}}{(-k - h\Delta r)} \quad = \quad T_i = \frac{h\Delta rT_a + kT_{i+1}}{(k + h\Delta r)}$$

Ec.2.29.

La ecuación 2.29 representa el valor obtenido de temperatura en la superficie en el tiempo Δt .

Nodos internos.

Para los nodos internos, la ecuación 2.3. se expresa en forma de diferencias finitas centrales. (Ver Figura 10.)

$$\rho C_p \left(\frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} \right) = k \left(\frac{-2T_i + T_{i-1} + T_{i+1}}{\Delta r^2} \right) + \frac{k}{r} \left(\frac{T_{i-1} + T_{i+1}}{2\Delta r} \right) + Q_0$$

Ec.2.30.

Reacomodando la ecuación 2.30 y despejando $T_i^{t+\Delta t}$ se tiene

$$T_i^{t+\Delta t} - T_i^t = \frac{k\Delta t}{\rho C_p} \left(\frac{-2T_i + T_{i-1} + T_{i+1}}{\Delta r^2} \right) + \frac{k\Delta t}{r\rho C_p} \left(\frac{T_{i-1} + T_{i+1}}{2\Delta r} \right) + \frac{Q_0\Delta t}{\rho C_p}$$
$$T_i^{t+\Delta t} = \frac{\Delta t \cdot k}{\Delta r \rho C_p} \left[\left(\frac{-2T_i + T_{i-1} + T_{i+1}}{\Delta r} \right) + \left(\frac{T_{i-1} + T_{i+1}}{2r} \right) \right] + \frac{Q_0\Delta t}{\rho C_p} + T_i^t$$

Ec.2.31.

A la ecuación 2.31. el valor de Q_0 . Se resuelve con la ecuación 2.23.

El modelo desarrollado por medio de un método numérico, nos representa la ecuación 2.31., en el que se consideró transferencia de calor por conducción y transferencia por microondas.

Con las ecuaciones 2.29. y 2.31. se puede calcular todos los valores de temperaturas a diferentes incrementos de radio Δr en función del tiempo.

Es importante hacer mención que se aplicó un criterio para discretizar los tiempos y espacios relacionado con la superficie con el fin de calcular los intervalos de tiempo Δt . (Incropera y De Witt , 1985), de manera que:

$$Fo(1 + Bi) \leq \frac{1}{2}$$

Ec.2.32.

Fo = Número de Fourier
Bi = Número de Biot

$$Fo = \frac{\Delta t k}{\Delta r^2 \rho Cp}$$

Ec.2.33.

$$Bi = \frac{h\Delta r}{k}$$

Ec.2.34.

$$\frac{\Delta t k}{\Delta r^2 \rho Cp} \left(1 + \frac{h\Delta r}{k} \right) \leq \frac{1}{2}$$

Resolviendo la fracción de la inecuación:

$$\frac{\Delta t k}{\Delta r^2 \rho Cp} \left(\frac{k + h\Delta r}{k} \right) \leq \frac{1}{2}$$

Reduciendo términos:

$$\frac{\Delta t (k + h\Delta r)}{\Delta r^2 \rho Cp} \leq \frac{1}{2}$$

Despejando Δt :

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta r^2 \rho Cp)}{2 (k + h\Delta r)}$$

Ec.2.35.

Con la ecuación 2.35. se obtuvo el intervalo de tiempo menor o igual que se puede emplear para que el sistema sea estable, el cual depende de las propiedades termofísicas del producto.

2.6. Planteamiento del programa para las simulaciones del calentamiento por microondas.

El lenguaje de programación empleado para la realización de las simulaciones del calentamiento por microondas de productos de alta e intermedia humedad, fue VISUAL BASIC 5.0., debido a su versatilidad y facilidad de manejo.

2.6.1. Algoritmo de cálculo.

Inicio del programa.

Para llevar a cabo la ejecución del programa, es necesario introducir los datos, con los cuales se calculará la potencia Absorbida (Q_0) del modelo desarrollado en el punto 2.4. y la temperatura del modelo 2.5.

Tabla 4 Variables a introducir en el programa.

Nombre	Variable	Unidades
Longitud cilindro	L	M
Radio cilindro	R	M
Distancia radial	r	M
Constante dieléctrica	k'	
Constante de pérdida	k''	
Potencia incidente	Po	W
Tiempo encendido	Te	s
Tiempo apagado	Ta	s
Incremento tiempo	dt	s
Densidad	Ro	kg/m ³
Calor específico	Cp	J/kg C
Coefficiente convectivo	h	W/m ² C
Conductividad térmica	k	W/m C
Temperatura ambiental del Horno	Th	C
Temperatura inicial del producto	Tsp	C
Tiempo de proceso	Tp	s

Las condiciones iniciales pueden guardarse en un archivo para que se modifiquen uno o más de los valores originalmente guardados.

Cálculos de Q_0 y ΔT (ecuación 2.23.y 2.27.)

Se calculará Q_0 (Calor absorbido entre dos puntos) e incremento de temperatura según el modelo de Lambert en función de la distancia radial.

Cálculos de temperatura (ecuaciones 2.29 y 2.31.)

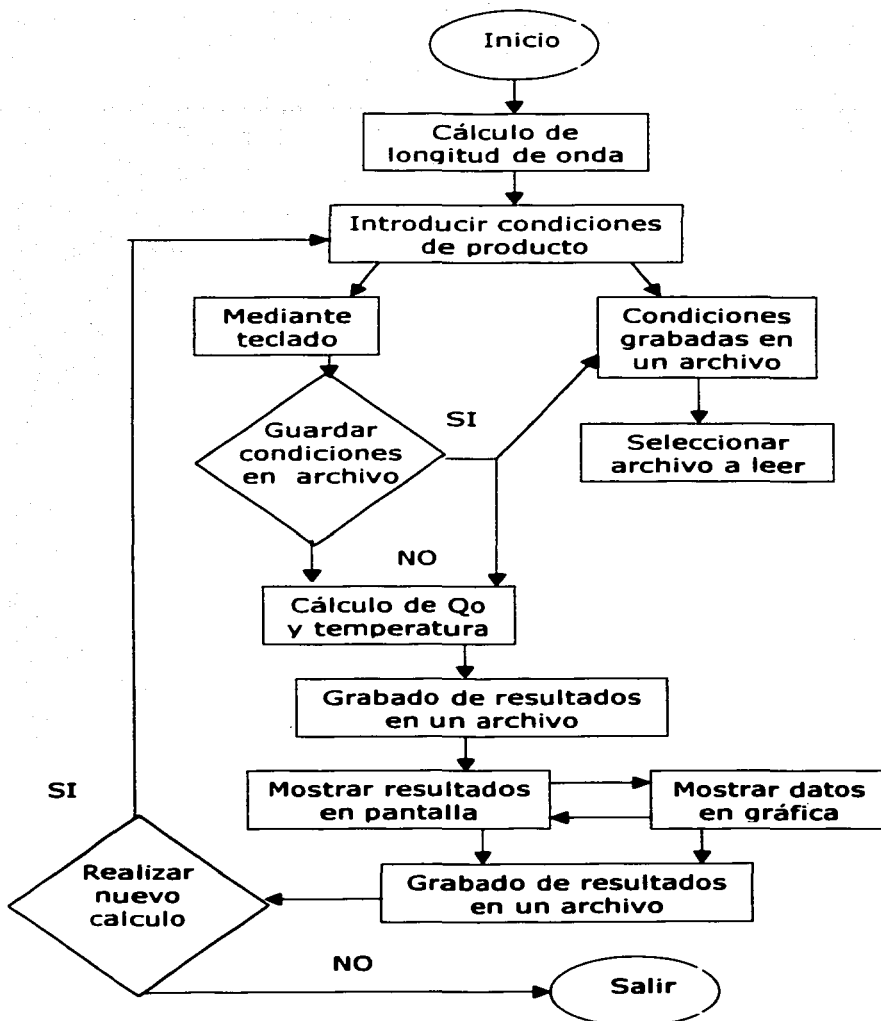
Para el cálculo de temperatura se consideran dos casos, uno con respecto a los nodos orilla y el otro para los nodos internos. Los valores de temperatura son, con respecto a la distancia radial a un intervalo de tiempo.

Cálculo del número de intervalos de tiempo.

El número de intervalos de tiempo que calcula el programa, está en función al tiempo de proceso de calentamiento.

2.6.2. Diagrama de operación del programa.

El programa opera según el diagrama siguiente.



2.7. Contrastación del modelo desarrollado para Qo.

Para la contrastación del modelo desarrollado para Qo se realizó con los valores de Qo obtenidos del modelo de Lin (1995). Él empleó como método de resolución diferenciales, mientras que en el modelo desarrollado se resolvió por métodos de integración.

La ecuación que representa el modelo de Lin (1995) es:

$$Q_o = \frac{Po\alpha}{\pi r(L+R)} [e^{-2\alpha(R-r)} + e^{-2\alpha(R+r)}]$$

Ec. 2.36

La contrastación del modelo desarrollado para Qo se realizó con los valores de incrementos de temperaturas obtenidos en la ecuación 2.27., por lo que para obtener valores de ΔT del modelo de Lin (1995) la ecuación 2.36. se sustituyó en la ecuación 2.26.

$$\Delta T = \frac{\Delta T Po\alpha}{\pi r(L+R)\rho Cp} [e^{-2\alpha(R-r)} + e^{-2\alpha(R+r)}]$$

Ec. 2.37

La contrastación del modelo desarrollado se realizó considerando las siguientes variables y sus niveles de variación. (Tabla 5)

Tabla 5. Variables para la contrastación del modelo desarrollado de Qo.

Constantes	Po, α , L, ρ , Cp, Δt
Variables independientes	Radio (R) (6 niveles de variación) Distancia radial (r)
Variable dependiente	Qo, ΔT

Las gráficas que se obtuvieron fueron de geles de alginato de sodio al 1% teniendo como variables ΔT vs. r (Distancia radial) con R (radio) constante y ΔT vs. R a un $r= 0.005$ y $r=R$.

Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente mediante la prueba de hipótesis de bondad de ajuste (ji cuadrada).

Para establecer las limitantes del modelo propuesto, con respecto al radio, se obtuvo la estima media de error (SME), y se realizó un análisis de residuales entre los valores de temperatura obtenidos de los dos modelos.

2.8. Análisis de sensibilidad respecto a las condiciones de proceso.

Se realizaron simulaciones de temperaturas con respecto a la distancia radial obtenidas con las ecuaciones 2.29 y 2.31. Las variables involucradas se indican en la tabla 6.

Tabla 6. Variables para el análisis de sensibilidad respecto a las condiciones del proceso.

Constantes	$Po, \alpha, \rho, k, Cp, h, \Delta t, Th, Tsp$
Variables independientes	<p><u>Potencia incidente</u> (Po)= 4 niveles de variación.</p> <p><u>Tiempo de proceso</u> (Tp)= 4 niveles de variación.</p> <p><u>Radio</u> (R)= 9 niveles de variación.</p> <p><u>Longitud</u>(L)= 5 niveles de variación.</p>
Variable dependiente	Temperatura

Los resultados obtenidos, por separado, se analizaron estadísticamente por ANOVA, aplicando análisis de diferencia de medias (TUKEY). El nivel de significancia que se maneja fue $\alpha=0.05$.

Todos los análisis estadísticos se realizaron en el paquete STATGRAPHICS Plus 4.0 para WINDOWS.

Las gráficas que se obtuvieron fueron de geles de alginato de sodio al 1%.

2.8. Análisis de sensibilidad respecto a las propiedades del producto.

Se realizó un análisis de sensibilidad considerando las ecuaciones 2.29. y 2.31. para establecer las variables que afectan el modelo desarrollado y se determinó el porcentaje de variación entre ellas.

Las variables que se involucraron para la realización del análisis se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Variables para el análisis de sensibilidad de las propiedades del producto.

Constantes	$P_0, \alpha, \rho, k, C_p, h, \Delta t, T_h, T_{sp}$
Variables independientes	<u>Constante dieléctrica</u> (K')
	<u>Constante de pérdida</u> (K'')
	<u>Difusividad térmica</u> (α)
	<u>Coefficiente convectivo</u> (h)
Variable dependiente	3 niveles de variación. Temperatura

Los resultados obtenidos, por separado, se analizaron estadísticamente por ANOVA, aplicando análisis de diferencia de medias (TUKEY). El nivel de significancia que se manejo fue $\alpha=0.05$.

2.9. Comparación de los resultados experimentales con el modelo desarrollado y sus límites de aplicación.

La comparación de los valores experimentales con los de los modelos desarrollados se realizó con las velocidades de calentamiento de los

datos simulados con datos experimentales de alginato de sodio al 1%. (Lin, 1995)

En la tabla 8 se indican las variables involucradas en la comparación del modelo.

Tabla 8. Variables para la comparación del modelo.

Constantes	$P_o, \alpha, \rho, k, C_p, h, \Delta t, T_h, T_{sp}$
Variables independientes	<u>Radio</u> = 4 niveles de variación Longitud = 2 niveles de variación
Variable dependiente	Temperatura
Variable de respuesta	Velocidad de calentamiento.

La salida de potencia P_o está en función del tamaño de la muestra que varía a diferentes radios y longitud, por lo que fue calculada, tal como lo realizó, Lin, (1995). (Ecuación 2.31.)

$$P_o = 453.2 + 59.8 \ln(PM) \quad 25g \leq PM \leq 2500g$$

Ec.2.31.

PM = Peso de la muestra [=] g

Se realizaron simulaciones de los modelos obtenidos en las ecuaciones 2.27. y 2.29 y 2.31. a las mismas experimentales y para obtener las velocidades de calentamiento del modelo desarrollado para Q_o ., se parte de la ecuación 2.27. y se divide entre Δt .

$$\Delta T = \frac{\Delta t}{\rho C_p} \left(\frac{P_o * R}{\pi * L * (L + R)} \right) * \left(\frac{e^{-2\alpha(R-r)} - e^{-4\alpha R}}{4R^2 - r^2} \right)$$

La ecuación 2.27. queda:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{\rho C_p} \left(\frac{P_o * R}{\pi * L * (L + R)} \right) * \left(\frac{e^{-2\alpha(R-r)} - e^{-4\alpha R}}{4R^2 - r^2} \right)$$

Ec. 2.38.

Donde: $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ = Velocidad de calentamiento [=] C/s

Se empleó como condición frontera la obtenida en la ecuación 2.29.

Los cálculos de velocidades de calentamiento para el modelo de Fourier se realizaron considerando la siguiente ecuación:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{(T_i - T_{sp})}{\Delta t}$$

Ec. 2.39

T_i = Temperatura del producto en el nodo i [=] C

T_{sp} = Temperatura inicial del producto [=] C

Si $\frac{\Delta T}{\Delta t} = VC$, entonces la ecuación 2.39. representa la velocidad de calentamiento (VC).

$$VC = \frac{(T_i - T_{sp})}{\Delta t}$$

Ec. 2.40

Se realizó una prueba de ajuste de bondad (ji cuadrada) para determinar el comportamiento de los dos modelos desarrollados.

Se analizó el modelo desarrollado con los datos experimentales y se estableció sus límites de aplicación.

CAPITULO III

RESULTADOS Y ANALISIS DE LOS MODELOS DE SIMULACION.

3.1. Desarrollo del programa.

El propósito de desarrollar un programa de cómputo es para facilitar los cálculos, tener una mayor posibilidad de variar parámetros y con ello realizar un análisis adecuado del proceso de calentamiento por microondas. Con el programa elaborado en Visual Basic 5.0. se obtienen datos de Q_0 y temperatura basados en las ecuaciones 2.27. y (2.29, 2.31), respectivamente y su desarrollo se muestra en el ANEXO I.

3.2. Contratación del modelo desarrollado para Q_0 .

La contratación del modelo desarrollado para Q_0 se realizó considerando como datos iniciales geles de alginato de sodio al 1%.(Tabla 9)

Tabla 9. Valores iniciales de geles de alginato de sodio.

VARIABLE	VALOR	REFERENCIA
K'	75.8	Mudgett, 1986
K''	16.2	Mudgett, 1986
α' [=] 1/m	47.7	Lin, 1995
P_0 [=] W	370	Lin, 1995
ρ [=] kg/m ³	1010	Lin, 1995
C_p [=] J/kg C	4120	Heldman, 1984
Δt [=] s	20	
L [=] m	0.05	

Los resultados obtenidos de la simulación se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Valores de Q_0 y ΔT a un $R= 0.04m$.

r (m)	Modelo Lin Q_0 (W/cm³)	Modelo Desarrollado Q_0 (W/cm³)	Modelo Lin ΔT (C)	Modelo Desarrollado ΔT (C)
0.005	0.613	0.720	2.878	3.379
0.010	0.410	0.477	1.922	2.238
0.015	0.405	0.431	1.901	2.022
0.020	0.473	0.491	2.221	2.304
0.025	0.602	0.516	2.825	2.421
0.030	0.804	0.622	3.773	2.919
0.035	1.108	0.798	5.200	3.745
0.040	1.561	1.072	7.326	5.030

En la tabla 10 se indica como $r=0.005$ la distancia radial correspondiente al primer nodo desde la superficie, $r=0.040$ es el centro del cilindro.

En la figura 11. se muestran los valores de ΔT vs r debido a que la tendencia de Q_0 con respecto ΔT a es la misma.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

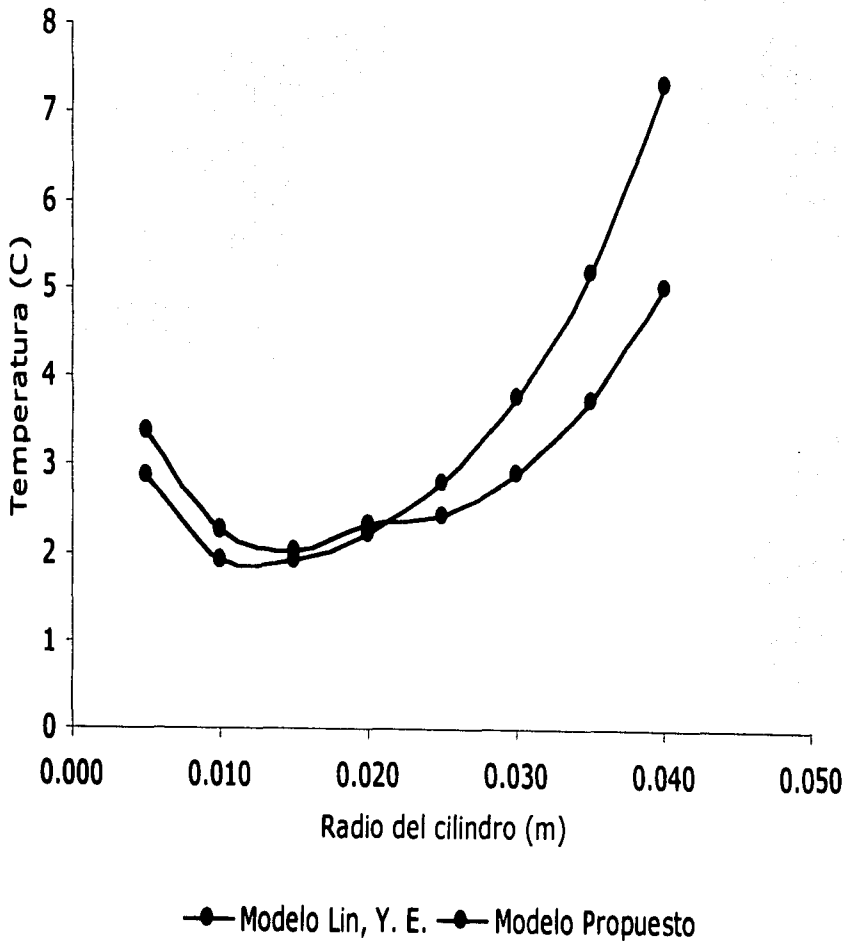


Figura 11. Incremento de temperatura en función de r con $R = 0.04m$.

El resultado del análisis estadístico de la curva de bondad de ajuste ji cuadrada de la tabla 10 considerando 7 grados de libertad y un intervalo del 95% para los valores de ΔT nos da los siguientes datos:

$$X_o^2 = 1.389$$

$$X_e^2 = 14.1$$

Como $X_e^2 > X_o^2$ se acepta que el modelo desarrollado para obtener Q_o se ajusta con el modelo de Lin (1995) que fue resuelto por otro método analítico; sin embargo al realizar un análisis más profundo para marcar las diferencias entre los dos métodos, en la figura 11 se observa que en el nodo cercano a la superficie del cilindro ($r=0.005$) y en el del centro del cilindro ($r=0.040$ o $r=R$) existe una mayor diferencia entre ambos modelos por lo que se realizó un análisis en estos nodos variando los radios del cilindro con el fin marcar las diferencias entre el modelo desarrollado y el de Lin (1995). En las tablas 11 y 12 se muestran los valores de Q_o y ΔT para los diferentes radios.

Tabla 11. Valores de Q_o y ΔT a un $r = 0.005m$.

Radio (m)	Modelo Lin $Q_o [=] W/cm^3$	Modelo Prop. $Q_o [=] W/cm^3$	Modelo Lin $\Delta T [=] C$	Modelo Prop. $\Delta T [=] C$
0.01	16.090	20.930	75.501	98.212
0.02	5.315	6.356	24.940	29.825
0.03	1.792	2.110	8.409	9.901
0.04	0.613	0.720	2.876	3.379
0.05	0.213	0.250	0.999	1.173
0.06	0.074	0.087	0.347	0.408

Tabla 12. Valores de Q_o y ΔT a un $r=R$.

Radio (m)	Modelo Lin $Q_o [=] W/cm^3$	Modelo Prop. $Q_o [=] W/cm^3$	Modelo Lin $\Delta T [=] C$	Modelo Prop. $\Delta T [=] C$
0.01	10.750	17.600	50.443	82.586
0.02	4.101	4.947	19.244	23.213
0.03	2.348	2.084	11.018	9.779
0.04	1.561	1.072	7.325	5.030
0.05	1.124	0.624	5.274	2.928
0.06	0.851	0.395	3.994	1.854

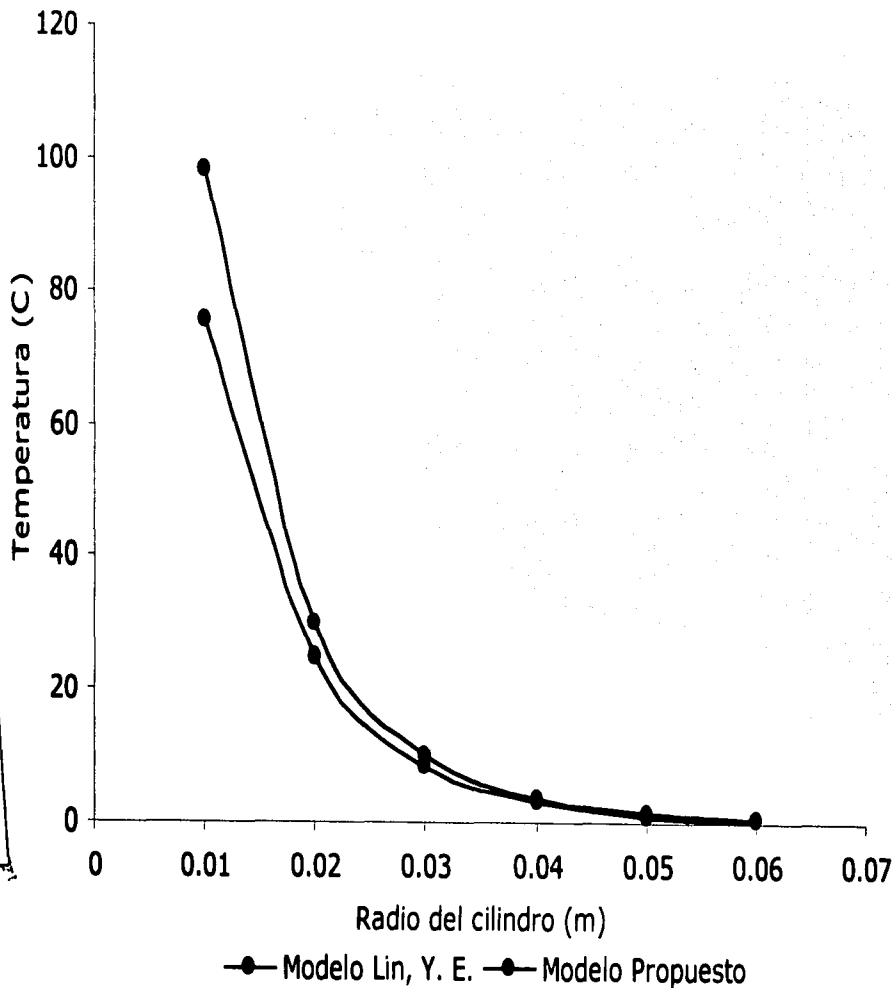


Figura 12. Incremento de temperatura en función de R a $r=0.005m$.

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

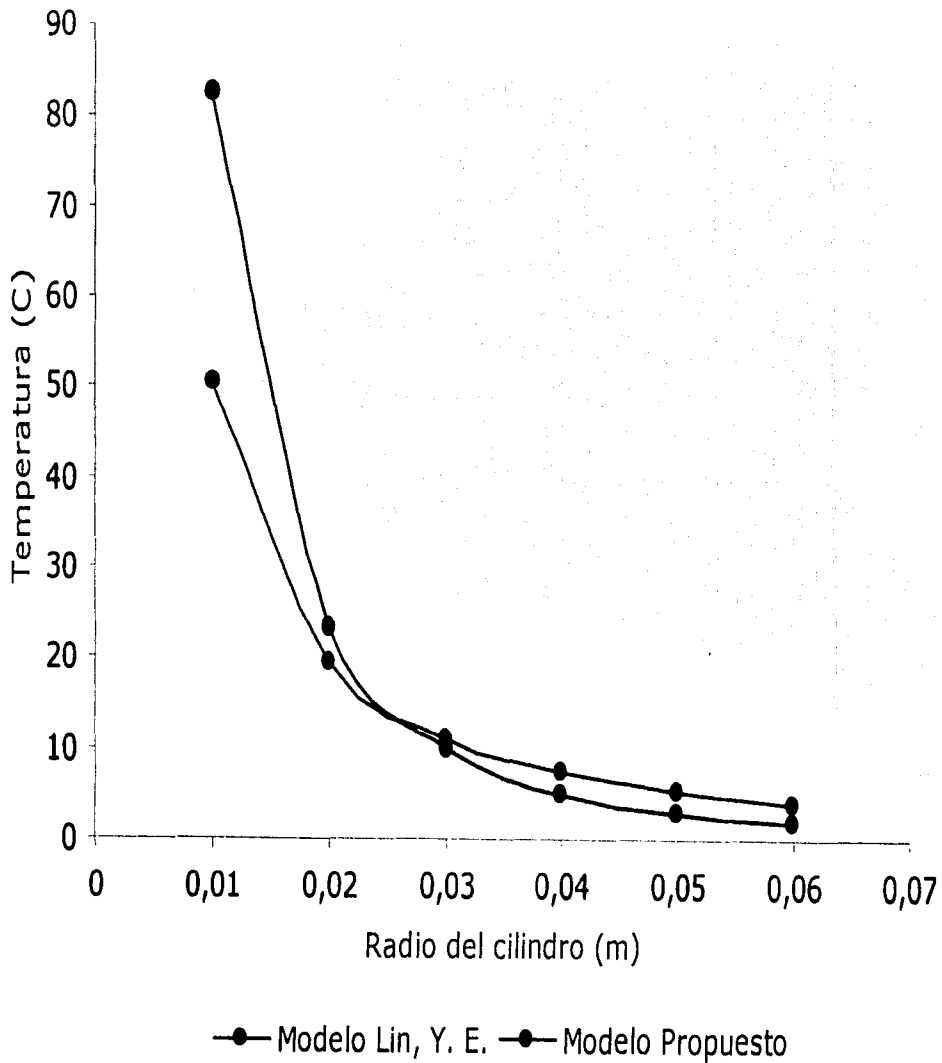


Figura 13. Incremento de temperatura en función de R a $r=R$.

En las figuras 12 y 13 se nota claramente la diferencia de valores de temperaturas en los radios más pequeños, esto es debido a que los dos modelos para obtener Q_0 se resolvieron analíticamente de dos formas distintas, en el modelo de Lin, (1995), la resolución de la potencia absorbida por unidad de volumen la resuelve por medio de diferenciales; sin embargo el modelo desarrollado, al considerarlo en una dirección (radial), la potencia absorbida por unidad de volumen se resuelve a partir de métodos de integración.

En el modelo propuesto por Lin (1995) el resolver a partir de diferenciales se obtiene áreas formando rectángulos entre un intervalo, lo que conlleva que cuando el decaimiento exponencial es muy pronunciado (Ver figura 13), que es más notorio en radios pequeños, puede calcularse área de más o de menos ocasionando error en el resultado. Por otro lado en el modelo desarrollado resuelto por integración se considera el área bajo la curva de un intervalo, pero a medida que los intervalos se aproximan hacia la asíntota correspondiente al eje de Temperatura el valor del área tiende a infinito, ocasionando que los datos de temperatura se incrementan notoriamente.

Estadísticamente se obtuvo la estima media de error para los valores de ΔT a diferentes radios.

r= 0.005	r=R
MSE= ±11.64	MSE= ± 16.32

Los datos del análisis de residuales se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Análisis de residuales

Radio (m)	r=0.005 $\Delta T [=] C$	r=R $\Delta T [=] C$
0.01	-22.711	-32.142
0.02	-4.885	-3.969
0.03	-1.492	1.239
0.04	-0.503	2.295
0.05	-0.174	2.346
0.06	-0.061	2.140

Comparando los residuales de la tabla 13 con la estima del error se observa que el residual del radio 0.01 m se sale del rango para ambos valores de r. La diferencia de valores puede deberse a la consideración de la potencia inicial que en cada modelo se realizó y que es más notorio en radios pequeños porque el criterio que se tomo para los incrementos de "r" es el mismo en todos los casos, lo que conlleva a tener menos datos.

Por las razones antes expuestas fue necesario establecer en que valores de radio los modelos se comportan similarmente.

Los valores de radio para obtener el radio mínimo en el modelo propuesto se muestran en la tabla 14.

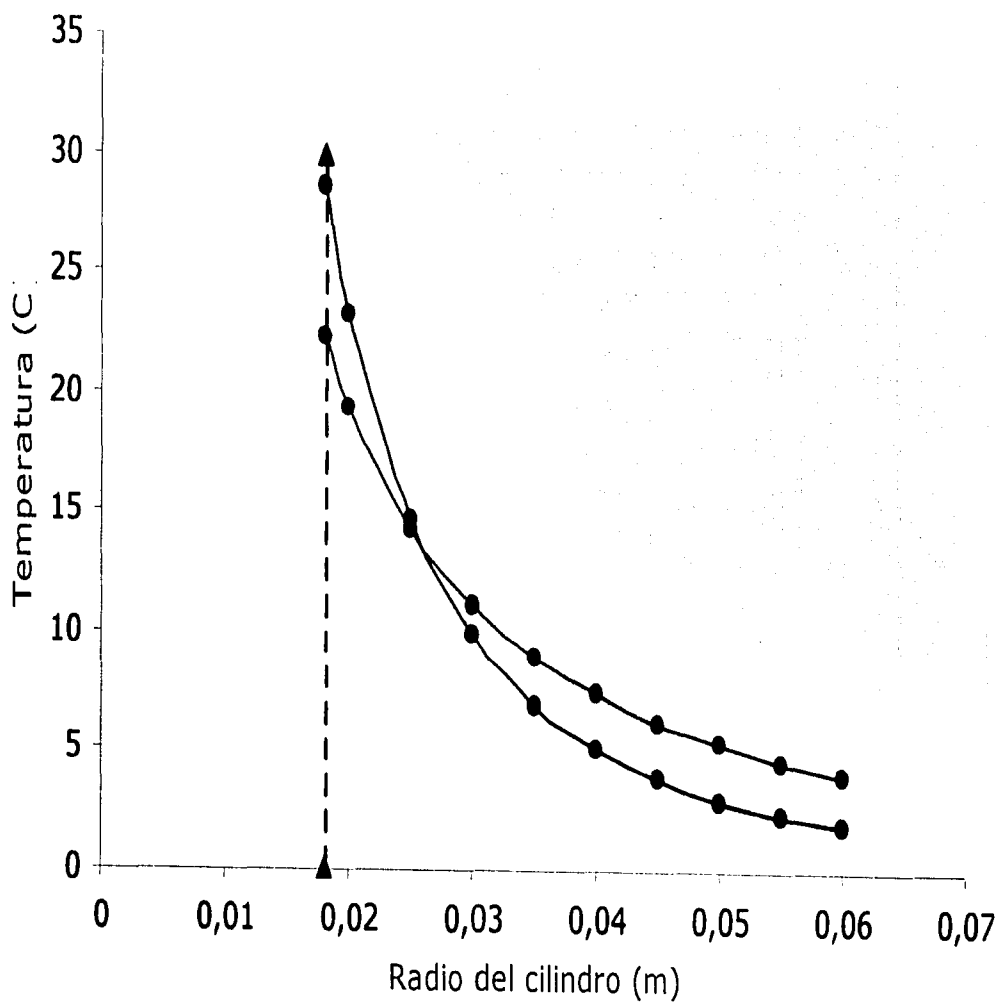
Tabla 14. Valores ΔT y residuales a un $r=R$.

Radio (m)	Modelo Lin ΔT (C)	Modelo Prop. ΔT (C)	Residuales ΔT (C)
0.018	22.230	28.630	-6.400
0.02	19.244	23.213	-3.970
0.025	14.178	14.587	-0.409
0.03	11.018	9.779	1.239
0.035	8.873	6.883	1.990
0.04	7.325	5.030	2.295
0.045	6.167	3.790	2.377
0.05	5.274	2.928	2.346
0.055	4.565	2.311	2.254
0.06	3.994	1.854	2.141

El error estimado fue de: $MSE = \pm 11.06$.

Estadística y gráficamente (figura 14) se acepta que a un radio mínimo de 0.018 m el modelo desarrollado se comporta como el de Lin, (1995).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



● Modelo Lin, Y. E. ● Modelo Propuesto ▲ $r = 0.018$ m

Figura 14. Incremento de temperatura en función de Radio en el nodo $r=R$ con un radio límite.

3.3. Análisis de sensibilidad respecto a las condiciones de proceso.

3.3.1. Simulaciones considerando 4 niveles de potencia del microondas.

El intervalo de tiempo considerando la discretización del valor (Ec.2.35.) a un $\Delta r = 0.005$ m se indica en la tabla 15.

Tabla 15. Propiedades Termofísicas de Alginato de Na

Δt	PROPIEDAD	REFERENCIA
$\Delta t \leq 50.27$ s	$\rho = 1010$ kg/m ³	Lin, 1995
	$C_p = 4120$ J/kg C	Heldman y Singh, 1981
	$h = 39.44$ W/m ² C	Swami, 1982.
	$k = 0.8374$ W/m C	Swami, 1982.

El resultado de Δt que se empleó para realizar las simulaciones con Alginato de Na fué de 10 s, valor que no sobrepasa el establecido (Tabla 15).

Las simulaciones para analizar el efecto de la potencia del horno (P_o) se realizaron introduciendo en el programa las condiciones iniciales de la tabla 16.

Tabla 16. Condiciones iniciales de las simulaciones T vs r considerando 4 niveles de P_o .

$R = 0.05$ m	$C_p = 4120$ J/kg C
$L = 0.025$ m	$P_o = 400$ W, 800 W, 1200 W y 1500 W
$r = 0.005$ m	$\Delta t = 10$ s
$h = 39.44$ W/m ² C	$T_a = 23$ C
$K = 0.8374$ W/m C	$T_{sa} = 25$ C
$\rho = 1010$ kg/m ³	Tiempo proceso = 40 s

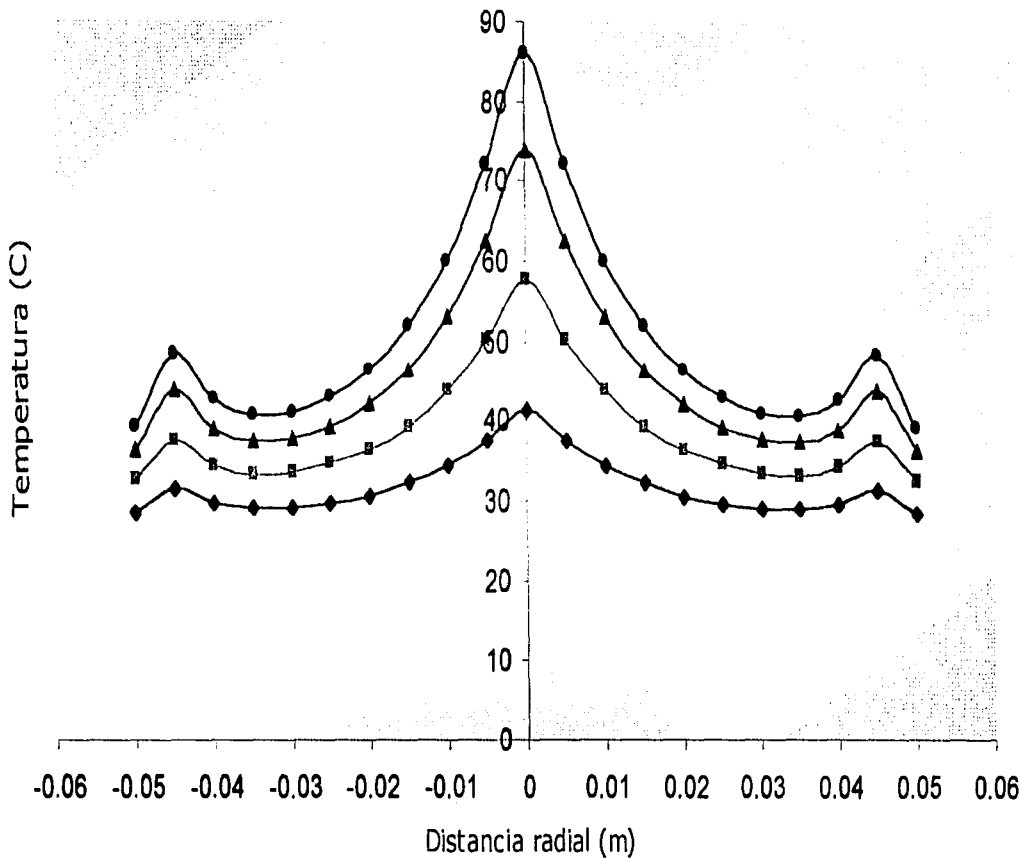
Los datos de temperatura obtenidos se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Resultados de las simulaciones de calentamiento por microondas durante 40 s.

DISTANCIA RADIAL (m)	T(C)	T(C)	T(C)	T(C)
	Po=400 W	Po=800 W	Po=1200 W	Po=1500 W
-0.050	28.53	32.46	36.40	39.35
-0.045	31.35	37.53	43.82	48.53
-0.040	29.68	34.36	39.04	42.55
-0.035	29.16	33.31	37.47	40.58
-0.030	29.27	33.53	37.80	41.00
-0.025	29.79	34.58	39.37	42.96
-0.020	30.72	36.45	42.17	46.46
-0.015	32.18	39.35	46.53	51.91
-0.010	34.37	43.73	53.10	60.12
-0.005	37.58	50.16	62.74	72.18
0.000	41.28	57.57	73.85	86.06
0.005	37.58	50.16	62.74	72.18
0.010	34.37	43.73	53.10	60.12
0.015	32.18	39.35	46.53	51.91
0.020	30.72	36.45	42.17	46.46
0.025	29.79	34.58	39.37	42.96
0.030	29.27	33.53	37.80	41.00
0.035	29.16	33.31	37.47	40.58
0.040	29.68	34.36	39.04	42.55
0.045	31.35	37.64	43.92	48.64
0.050	28.53	38.39	44.75	49.51

Al realizar un ANOVA a los datos de la tabla 17, se detectó diferencia altamente significativa ($p < 0.002$), en los valores de temperatura en el cilindro para las diferentes potencias. En el análisis de TUKEY se detectó una influencia significativa entre la potencia de 400 W respecto a la de 1200 y 1500 W, sin embargo con la de 800 W no mostró diferencia significativa.

Los resultados se graficaron considerando como 0 el centro del cilindro, 0.05 la superficie derecha del cilindro y -0.05 la superficie izquierda. (Figura 15.)



- ◆ Potencia 400 W
- ▲ Potencia 1200 W
- Potencia 800 W
- Potencia 1500 W

Figura 15. Simulación de calentamiento por microondas durante 40s de geles de alginato de sodio al 1% a diferentes potencias.

En el modelo desarrollado, el valor de Q_0 depende de las propiedades dieléctricas del producto, por lo que al someter un gel de alginato de sodio con alto contenido de humedad a un proceso de calentamiento, los cambios ocurridos al producto por el aumento de temperatura, influye en el patrón de distribución de temperaturas, el cual va a ser más sensible a potencias mayores. En el caso de un gel un aumento de temperatura ocasiona un cambio de estado de sólido a líquido, provocando un mayor desorden molecular que pudiera verse reflejado en un aumento mayor de temperatura en determinadas zonas. La respuesta a tal fenómeno es la no-uniformidad de calentamiento que se da dentro del producto.

En la figura 15 se observa un calentamiento mayor en el centro del cilindro y con menor grado en los nodos cercanos a superficie, el cual se acentúa a medida que aumenta la potencia. Tal comportamiento manifiesta como resultado una no-uniformidad de calentamiento del producto, siendo mayor en potencias altas.

En el nodo de la superficie, se observa en la figura 15 una disminución de temperatura debido a la condición frontera que se estableció en el modelo desarrollado, en donde se considera una pérdida de calor hacia el exterior.

En el modelo realizado por Lin, (1995) quien trabajó con geles de alginato de sodio al 1%, matemáticamente resuelve el modelo por el método de elemento finito; en las simulaciones realizadas emplea una P_0 aproximada de 800 W, obteniendo también un aumento de temperatura en el centro del cilindro.

Henk, (1996) trabajaron con cilindros de geles de agar, resolviendo su modelo por el método de diferencias finitas centrales y en los resultados simulados y esperados obtuvieron que en geles de agar existe un calentamiento en el centro.

Jimenez, V. (1997), trabajó experimentalmente con puré de aguacate colocados en cajas de petri (forma cilíndrica) para desactivar la polifenoloxidasa (PFO) variando la potencia del horno de microondas y determinó que a diferentes niveles de potencia los tiempos de desactivación de la enzima es diferente e incluso en la potencia más baja no se desactiva. Los resultados mostrados nos indican que la selección de la potencia depende del proceso que se quiere obtener.

3.3.2. Simulaciones considerando 4 niveles de tiempo de proceso.

Las simulaciones se realizaron considerando los valores de la tabla 9 a una $P_o = 800 \text{ W}$ con tiempos de proceso=10 s, 20 s, 30 s y 40 s. Los resultados se muestran en la tabla 18 y su gráfica en la figura 16.

Tabla 18. Resultados de las simulaciones de calentamiento por microondas con $P_o = 800 \text{ W}$

DISTANCIA RADIAL (m)	T(C) t=10 s	T(C) t=20 s	T(C) t=30 s	T(C) t=40 s
-0.050	24.62	27.42	30.02	32.46
-0.045	28.46	31.68	34.69	37.53
-0.040	27.28	29.61	31.98	34.36
-0.035	27.04	29.11	31.20	33.31
-0.030	27.11	29.23	31.37	33.53
-0.025	27.37	29.75	32.16	34.58
-0.020	27.83	30.68	33.55	36.45
-0.015	28.54	32.11	35.72	39.35
-0.010	29.61	34.27	38.98	43.73
-0.005	31.22	37.51	43.83	50.16
0.000	33.65	41.91	49.87	57.57
0.005	31.22	37.51	43.83	50.16
0.010	29.61	34.27	38.98	43.73
0.015	28.54	32.11	35.72	39.35
0.020	27.83	30.68	33.55	36.45
0.025	27.37	29.75	32.16	34.58
0.030	27.11	29.23	31.37	33.53
0.035	27.04	29.11	31.20	33.31
0.040	27.28	29.61	31.98	34.36
0.045	28.46	31.68	34.69	37.53
0.050	24.62	27.42	30.02	32.46

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

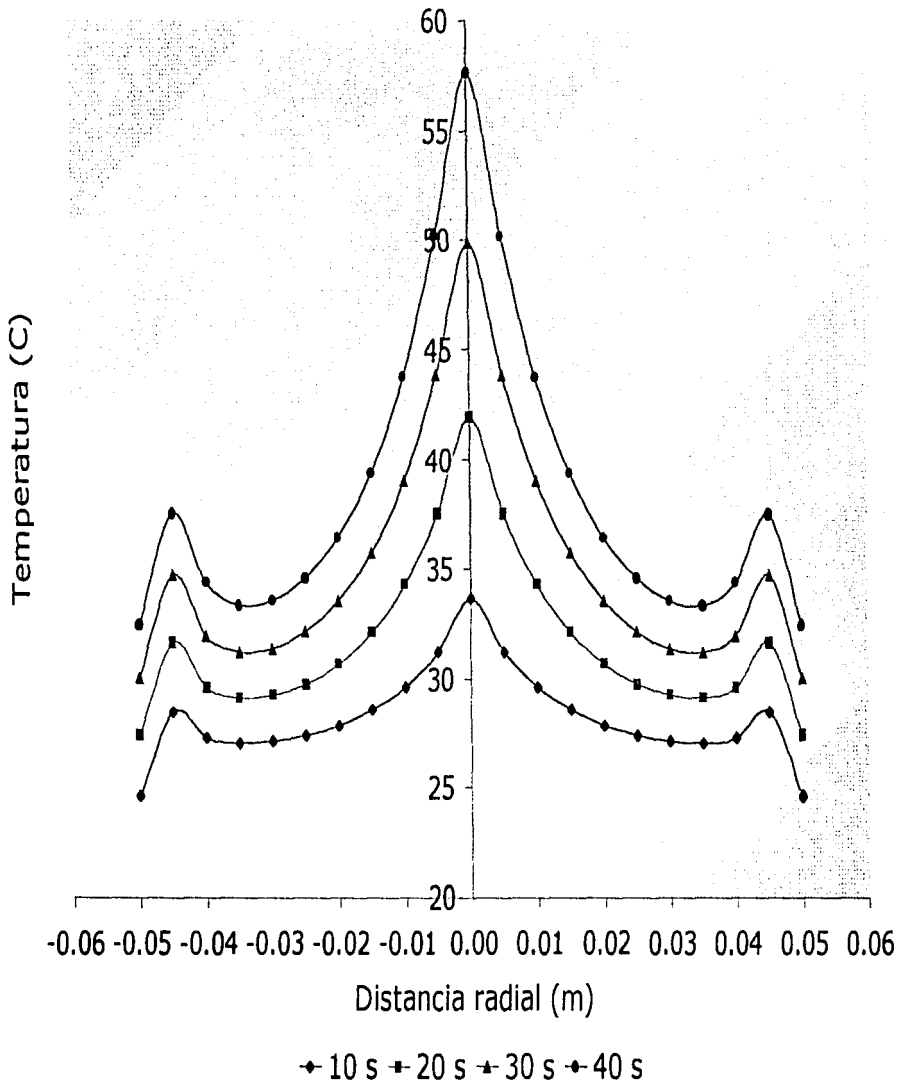


Figura 16. Simulación de calentamiento por microondas a $P_0=800$ W de geles de alginato de sodio al 1% a diferentes tiempos de proceso.

Al realizar un ANOVA se detectó diferencia altamente significativa ($p < 0.0009$), en los valores de temperatura en el cilindro para los diferentes tiempos de proceso. El análisis de TUKEY indica que en todos los tiempos de proceso existe diferencia altamente significativa

Los resultados de la tabla 18 se graficaron (Figura 16), observando que a mayor tiempo de proceso, el calentamiento en el centro y superficie es mayor, lo que ocasiona una no-uniformidad de calentamiento.

El calentamiento en el centro del cilindro está relacionado con el comportamiento de las ondas. Las ondas, al encontrarse pueden tener interferencia constructiva o destructiva, es decir se suman o se anulan, situación que se refleja en un mayor calentamiento al existir una acumulación de calor , cuando se suman, o por el contrario un menor calentamiento, cuando se anulan.

Es importante hacer mención que las propiedades dieléctricas del producto también influyen en el comportamiento de las ondas, ya que a partir de la constante dieléctrica y la constante de pérdida se obtiene la profundidad de penetración de la onda dentro del producto.

Al relacionar la figura 15 con la figura 16. es recomendable que si el tiempo de proceso requerido es largo y se desea una mayor uniformidad de calentamiento se opere con una potencia baja, como lo son los procesos de temperado cuya finalidad es aumentar la temperatura del producto congelado sin llegar al cambio de fase, porque de lo contrario habrá descongelamiento de algunas zonas, seguido por un sobrecalentamiento del producto. Por el contrario si lo que se desea es un tiempo corto lo más recomendable es aumentar el nivel de potencia; tal situación se presentó en el experimento que realizó Jiménez, V. (1997) al desactivar la PFO de puré de aguacate, determinó que a tiempos de proceso mayor las propiedades físicas del puré de aguacate se ven afectadas.

3.3.3. Simulaciones de diferentes tamaños de muestra.

Otra variable de importancia es el tamaño de la muestra, que para el caso del cilindro se obtiene al variar los radios y/o longitud.

3.3.3.1. Simulaciones con 9 niveles de variación de radio.

Para las simulaciones se emplearon los datos de la tabla 4.8., considerando $P_o = 800W$ con niveles de variación de radios de 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 y 6 cm.

Los resultados obtenidos (tabla 19) son para el nodo de la superficie del cilindro y del centro; no se consideró en los otros nodos porque en los resultados obtenidos de las figuras 15 y figura 16, se observo que en la superficie y el centro del cilindro los cambios de temperatura son más sensibles.

Tabla 19. Resultados de las simulaciones de calentamiento por microondas durante 50 s con $P_o = 800 W$ y $L = 2.5$ cm.

RADIO (cm)	T(C) SUPERFICIE	T(C) CENTRO
2.0	145.84	179.75
2.5	108.23	140.56
3.0	80.88	96.34
3.5	61.85	95.93
4.0	48.96	82.60
4.5	40.38	60.08
5.0	34.76	65.05
5.5	31.10	49.34
6.0	28.75	45.73

Al realizar un ANOVA se detectó diferencia altamente significativa ($p < 0.0008$), en los valores de temperatura en el cilindro para los diferentes radios. Al realizar un análisis de TUKEY, se detectó que los radios de 2 y 2.5 cm muestran una mayor diferencia de valores de temperatura obtenidos con respecto a los otros radios. Sé, aclara que el análisis estadístico se realizó considerando 5 pasos de tiempo cada uno con un $\Delta t = 10$ s.

RESULTADOS Y ANALISIS DE
LOS MODELOS DE SIMULACION

TESIS CON
FOLIA DE ORIGEN

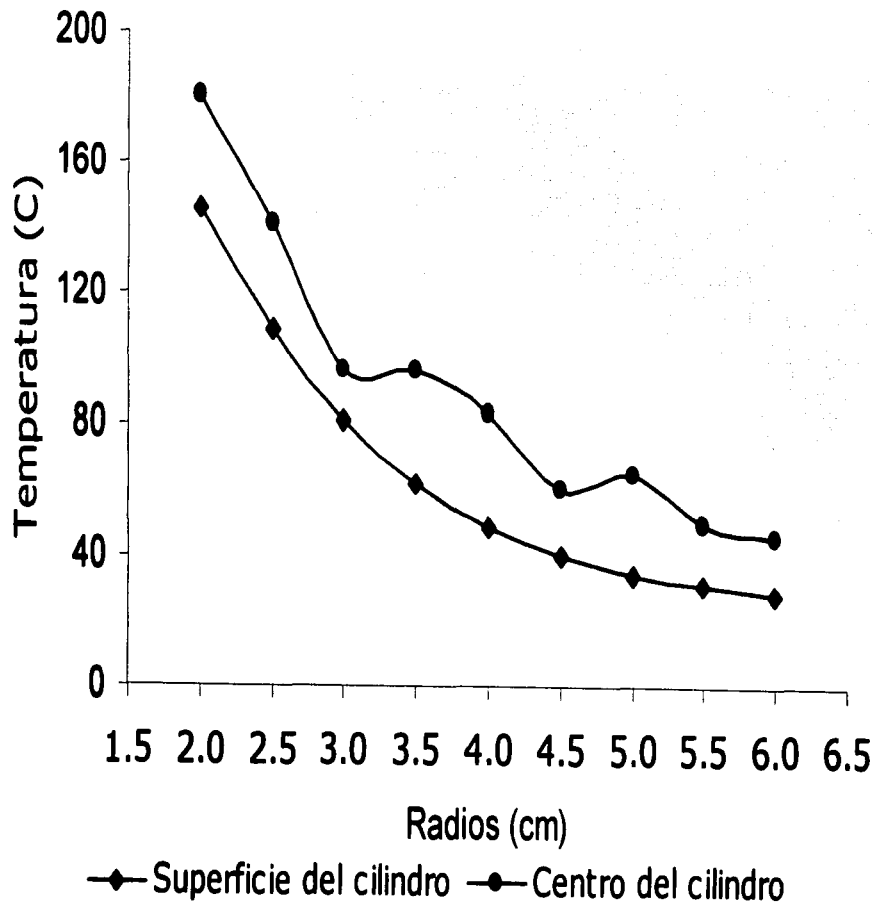


Figura 17. Simulación de calentamiento por microondas durante 50s de geles de alginato de sodio al 1% a diferentes radios, $P_0=800$ W y $L=0.025$ m.

En la figura 17 se observa que en el nodo de la superficie del cilindro, así como también en el nodo del centro son mayores los valores de temperatura alcanzados en muestras de radios menores; un comportamiento similar observa Barringer, y Co. (1994) en su experimento que realizó al evaluar las velocidades de calentamiento en un horno casero de microondas con agua.

Es importante remarcar que Barringer y Co.(1994) obtuvieron valores de Q_0 a partir de la resolución de las ecuaciones de Maxwell, sin embargo las simulaciones obtenidas de su modelo y el modelo propuesto en el que Q_0 se obtuvo a partir de la ley de Lambert, dan simulaciones con comportamientos similares.

En la figura 17 se observa que al aumentar el valor del radio, la absorción de microondas es independiente del tamaño. Este aspecto es influido por el valor de la profundidad de penetración de la muestra. Si el tamaño de la muestra es muy grande, con respecto a la profundidad de penetración, el fenómeno de transferencia de calor que va a predominar dentro de la muestra es, conducción, por lo que el aumento de temperaturas va a ser más lento.

3.3.3.2. Simulaciones con 5 niveles de variación de longitud.

Para las simulaciones se emplearon los datos de la tabla 16, considerando $P_0 = 800W$, tiempo de proceso = 50 s y 5 niveles de variación de longitud: 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 y 6.5 cm.

Los resultados obtenidos (tabla 20) son para el nodo de la superficie del cilindro y del centro.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 20. Resultados de las simulaciones de calentamiento por microondas durante 50 s con $P_0 = 800$ W y $R = 5$ cm.

LONGITUD (cm)	T(C) SUPERFICIE	T(C) CENTRO
2.5	34.76	65.05
5	31.00	50.24
4.5	29.05	42.57
5.5	27.89	38.00
6.5	27.14	32.90

Al realizar un ANOVA se detectó alta significancia ($p < 0.0034$), en los valores de temperatura en el cilindro para las diferentes longitudes del nodo central, no siendo así para el nodo de la superficie, posiblemente porque en muestras de radio más pequeñas son más notorios los cambios en la superficie.

En la figura 18 se aprecia que en la curva de la superficie del cilindro existen diferencias de valores de temperatura menos pronunciados, en comparación con el centro del cilindro, situación que se manifiesta en mayor medida en longitudes menores; tal hecho se atribuye al tamaño del producto. En longitudes menores del cilindro existe una mayor acumulación de calor ocasionado por un alto gradiente de temperaturas; sin embargo a medida que la longitud aumenta tanto en nodo central como en el nodo de la superficie (ver figura 18.) los gradientes de temperaturas son menores, considerándose como despreciable la transferencia de calor en la dirección axial.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

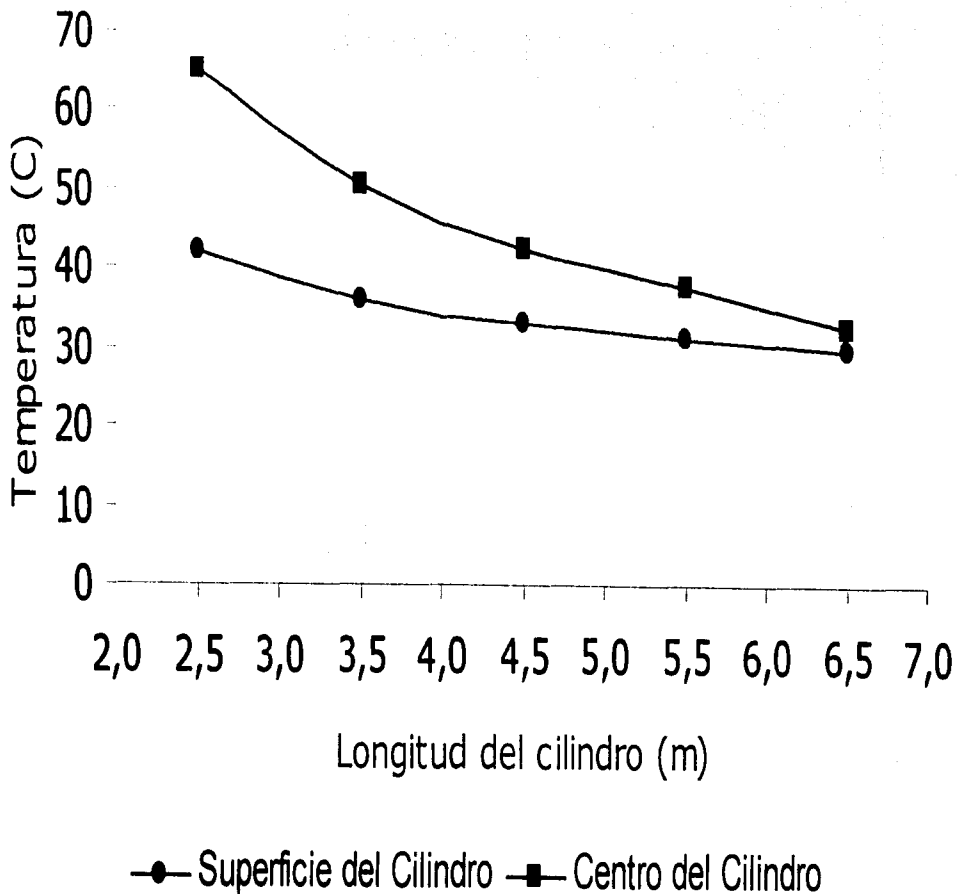


Figura 18. Simulación de calentamiento por microondas durante 50s de geles de alginato de sodio al 1% a diferentes longitudes, $P_0=800$ W y $R=0.05$ m.

3.4. Análisis de sensibilidad respecto a las propiedades del producto.

Las simulaciones del punto 3.3. son en referencia a las condiciones de operación del horno y al tamaño de la muestra, sin embargo es importante indagar que tan sensible es el modelo propuesto a variaciones de sus propiedades dieléctricas y térmicas.

Para el análisis de sensibilidad se consideró como punto intermedio las propiedades del alginato de sodio al 1% (Tabla 9 y 15), considerando $P_o=800$ W y tiempo de proceso=40 s.

En la tabla 21 se indica los porcentajes de variación que se va a realizar a cada una de variables.

Tabla 21. Porcentajes de variación para el análisis de sensibilidad.

PROPIEDAD	PORCENTAJES	VALORES
$K' = 75.8$	$\pm 20, \pm 40$	45.5, 60.6, 91, 106.12
$K'' = 16.2$	$\pm 20, \pm 40$	9.7, 13, 19.4, 22.7
$k = 0.8374$ W/m C	$\pm 20, \pm 40$	0.502, 0.67, 1.0, 1.17
$h = 39.44$ W/m ² C	$\pm 20, \pm 40$	23.6, 31.5, 47.3, 55.2.

Los resultados, analizados estadísticamente por ANOVA para cada una de las variables dieron los siguientes valores:

K' = No se detectó diferencia significativa en los valores de temperatura para los diferentes K' ; sin embargo al sólo considerar variaciones del $\pm 40\%$ (3 niveles de variación), en el ANOVA realizado se detectó diferencia significativa en los valores de temperatura en el cilindro para las diferentes K' . K'' = El análisis detectó diferencia altamente significativa ($p < 0009$), en los valores de temperatura para las diferentes K'' . k = No hubo variación significativa entre los 5 niveles de variación de k y temperaturas.

El resultado se atribuye a que en el análisis estadístico sólo se varía los valores de k , dejando constante ρ y C_p ; sin embargo para que pueda existir diferencia entre los valores, se involucra la difusividad térmica (α) que esta relacionada con k , ρ y C_p mediante la expresión:

$$(\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}).$$

Para obtener diferentes valores de α , se consideró incluir como propiedades termofísicas además del alginato de sodio, las de papa y carne. (Tabla 22)

Tabla 22. Propiedades termofísicas de papa y carne

PRODUCTO	PROPIEDAD	DIFUSIVIDAD TERMICA	REFERENCIA
Carne	$\rho = 1070 \text{ kg/m}^3$	1.83E-07 m ² /s	Ayappa, 1991.
	$C_p = 2510 \text{ J/kg C}$		Ayappa, 1991.
	$k = 0.491 \text{ W/m C}$		Ayappa, 1991.
Alginato de sodio al 1%	$\rho = 1010 \text{ kg/m}^3$	2.01E-07 m ² /s	Lin, 1995
	$C_p = 4120 \text{ J/kg C}$		Heldman, 1981
	$K = 0.8374 \text{ W/m C}$		Swami, 1982.
Papa	$\rho = 948 \text{ kg/m}^3$	2.15E-07 m ² /s	Chen, 1990
	$C_p = 1850 \text{ J/kg C}$		Heldman, 1981
	$k = 0.377 \text{ W/m C}$		Chen, 1990

Los niveles de variación de α representan -9% y 7%, tomando como referencia el valor de α de alginato de sodio.

Al realizar un ANOVA se detectó diferencia altamente significativa ($p < 0.0016$), en los valores de temperatura para las diferentes α .

h= Respecto al coeficiente de transferencia de calor, el análisis estadístico considerando los niveles establecidos (Tabla 15.), no fueron significativos, por lo que fue necesario cambiar los porcentajes al ± 60 de variación. Los resultados indicaron diferencia significativa ($p < 0.0451$) entre los diferentes coeficientes respecto a la temperatura. Cabe aclarar que sólo se consideró para el análisis, el nodo de la superficie ya que es donde se observan los mayores cambios de temperatura al variar **h**.

De los resultados obtenidos, las modificaciones de la tabla 22. quedan expresados en la tabla 23.

Tabla 23. Porcentajes de variación para el análisis de sensibilidad.

PROPIEDAD	PORCENTAJES
$K' = 75.8$	± 40
$K'' = 16.2$	± 20
$\alpha = 2.01E-07 \text{ m}^2/\text{s}$	$-9\%, 7\%$
$h = 39.44 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$	± 60

3.4.1. Efecto del cambio de las propiedades del producto sobre los perfiles de temperatura.

En la tabla 24. se describe el efecto del cambio de las propiedades dieléctricas, térmicas y coeficiente convectivo sobre los perfiles de temperatura. Los cambios son, en relación a las propiedades del alginato de sodio.

Tabla 24. Efecto del cambio de las propiedades del producto sobre los perfiles de calentamiento.

PROPIEDAD	INCREMENTO	DECREMENTO
Constante dieléctrica K'	Aumento de calentamiento en la superficie originado por una mayor capacidad de almacenar energía en forma de calor, perfiles menos uniformes marcando una diferencia de temperaturas entre la superficie y la mitad del centro del cilindro del 18%.	Mayor calentamiento en el centro respecto a la superficie. Los perfiles de temperatura son más uniformes, marcando una diferencia de temperatura entre la superficie y la mitad del centro de 5 %.
Constante De Pérdida K''	Mayor calentamiento en el centro respecto a la superficie. Los perfiles de temperatura son más uniformes marcando una diferencia de temperaturas de la superficie a la mitad del centro del 6%.	Mayor calentamiento en la superficie respecto a centro. Los perfiles de temperatura son con diferencias de temperatura muy grandes originados por una alta absorción de calor. La diferencia entre la superficie y la mitad del centro del cilindro es de 54%.
Difusividad térmica α	Mayor calentamiento en la superficie causando diferencias de temperatura mayores.	Perfiles de temperatura más uniformes, ligeramente mostrando un mayor calentamiento en el centro.
Coefficiente convectivo h	Aumenta en un porcentaje del 13% las temperaturas en la superficie a tiempos mayores de proceso.	Disminuye en un 8% las temperaturas en la superficie a tiempos mayores de proceso.

El efecto en los cambios de temperaturas al variar las propiedades del producto no siempre presenta los comportamientos mostrados en la tabla 24, ya que dependen de diversos factores como son, rango de porcentajes de variación de las variables, la composición del producto y el tipo de modelo. Tal es el caso de Padua, (1993) quien formuló un modelo para geles de agar con diferentes contenidos de sucrosa. Ella obtuvo en sus simulaciones, que al disminuir la K' , se incrementa la temperatura en la superficie respecto del centro; sin embargo Henk, y Co (1996), al trabajar con geles de agar adicionando sales y almidón, obtuvieron como resultado de sus simulaciones, que al disminuir la K' el calentamiento es mayor en el centro respecto a la superficie, comportamiento que también se obtiene en el modelo desarrollado. (Tabla 24).

3.5. Comparación de los resultados experimentales con el modelo desarrollado.

Los datos empleados para realizar las simulaciones del proceso de calentamiento por microondas y obtener las velocidades de calentamiento de los modelos desarrollados se indican en la tabla 25.

Tabla 25. Datos de alginato de sodio 1%

VARIABLE	VALOR	REFERENCIA
K'	75.8	Mudgett, 1986
K''	16.2	Mudgett, 1986
ρ [=] kg/m^3	1010	Lin, 1995
C_p [=] J/kg C	4120	Heldman, 1984
h [=] $\text{W/m}^2 \text{C}$	39.44	Swami, 1982.
k [=] W/m C	0.8374	Swami, 1982.
T_{sp} [=] C	25	Lin, 1995
Δt [=] s	30	

Los valores obtenidos de P_o para los diferentes cilindros se muestran en la tabla 26.

Tabla 26. Valor de P_o para diferentes tamaños de producto

Longitud (m)	Radio (m)	Peso (g)	P_o (W)
0.025	0.02	31.73	660
0.050	0.02	63.46	701
0.025	0.03	71.39	708
0.050	0.03	142.78	750
0.025	0.04	126.92	743
0.050	0.04	253.84	784
0.025	0.06	285.57	791
0.050	0.06	571.14	833

La tabla 26 representa los valores de potencia incidente real en la superficie del producto a diferentes pesos. La razón de considerar el valor real de potencia que incide en el producto es para relacionarlo con el volumen que ocupa en el horno de microondas, porque de ello depende el valor de calor absorbido en el interior del producto.

En la tabla 27 se muestran los resultados de las velocidades de calentamiento (**VC**) simuladas por los dos modelos desarrollados y los datos experimentales.

Tabla 27. Resultados de VC experimentales y simulados.

DISTANCIA RADIAL (m)		VC (C/s) EXPER. Lin. (1995)	INTERVALOS DE CONFIANZA (C/s)		VC (C/s) MODELO FOURIER	VC (C/s) MODELO Qo
R=0.02m L=0.025m	0	3.188	2.881	3.495	2.629	2.901
	0.01	2.844	2.423	3.265	2.329	2.817
	0.02	1.203	0.945	1.461	1.038	1.038
R=0.02m L=0.05m	0	2.390	2.038	2.742	0.897	0.900
	0.01	1.192	0.963	1.421	0.795	0.801
	0.02	0.749	0.673	0.825	0.340	0.340
R=0.03m L=0.025m	0	1.752	1.618	1.886	1.370	1.673
	0.01	1.211	1.076	1.346	1.114	1.114
	0.02	1.271	0.990	1.552	1.122	1.122
	0.03	0.803	0.530	1.076	0.490	0.490
R=0.03m L=0.05m	0	0.841	0.722	0.960	0.490	0.609
	0.01	0.620	0.544	0.696	0.406	0.406
	0.02	0.420	0.319	0.521	0.300	0.300
	0.03	0.361	0.259	0.463	0.165	0.165
R=0.04m L=0.025m	0	0.716	0.536	0.896	1.128	1.146
	0.01	0.549	0.498	0.600	0.671	0.665
	0.02	0.555	0.458	0.652	0.494	0.494
	0.03	0.832	0.577	1.087	0.504	0.510
	0.04	0.571	0.335	0.807	0.208	0.208
R=0.04m L=0.05m	0	0.371	0.335	0.407	0.430	0.437
	0.01	0.273	0.248	0.298	0.254	0.254
	0.02	0.261	0.210	0.312	0.185	0.183
	0.03	0.267	0.207	0.327	0.192	0.194
	0.04	0.209	0.173	0.245	0.066	0.066
R=0.06m L=0.025m	0	0.203	0.197	0.209	0.325	0.355
	0.01	0.217	0.206	0.228	0.312	0.318
	0.02	0.230	0.207	0.253	0.178	0.176
	0.03	0.244	0.210	0.278	0.112	0.111
	0.04	0.354	0.306	0.402	0.085	0.086
	0.05	0.510	0.431	0.589	0.090	0.092
	0.06	0.414	0.343	0.485	0.020	0.020
R=0.06m L=0.025m	0	0.114	0.105	0.123	0.140	0.139
	0.01	0.116	0.105	0.127	0.127	0.129
	0.02	0.119	0.096	0.142	0.072	0.072
	0.03	0.121	0.087	0.155	0.045	0.045
	0.04	0.165	0.118	0.212	0.035	0.034
	0.05	0.192	0.145	0.239	0.037	0.037
	0.06	0.206	0.161	0.251	---	---

El análisis de prueba de hipótesis de ajuste de bondad ji cuadrada que se aplicó a los datos simulados de los modelos para evaluar a Qo y modelo de Fourier, se obtuvo:

$$X_o^2 = 0.1662$$

$$X_e^2_{35,0.95} = 49.802$$

Como $X_o^2 < X_e^2$ se acepta que los dos modelos desarrollados, Fourier resuelto por el método numérico de diferencias finitas y Qo resuelto por método analítico presentan un comportamiento similar en los resultados de velocidades de calentamiento, por consiguiente se considera que el fenómeno de transferencia de calor por conducción involucrado en el modelo de Fourier no influye en la distribución de temperatura de procesos de calentamiento por microondas.

Al comparar los resultados experimentales con los simulados en el modelo de Fourier sólo el 18.4% de los datos son similares a los resultados experimentales, mientras que en el modelo de Qo es de 24.3%.

Con los resultados obtenidos se puede determinar que el modelo desarrollado para obtener Qo describe el proceso de calentamiento por microondas, por lo que al comparar los resultados simulados con los datos experimentales (Tabla 27), para valores de radios de 2 y 3 cm con longitud de 2.5 cm. muestran un comportamiento similar. Tal comportamiento también es observado en las gráficas 19 y 20.

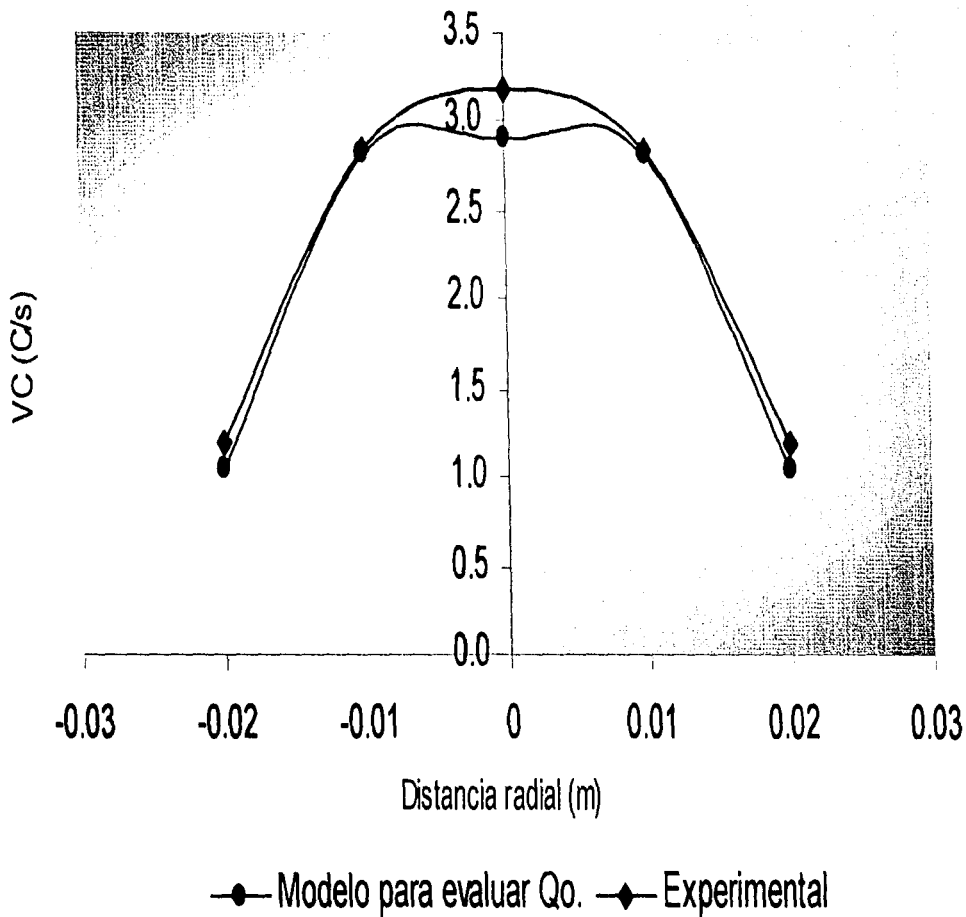


Figura 19. VC vs distancia radial de un cilindro de alginato de sodio de $R=0.02m$ y $L=0.025$.

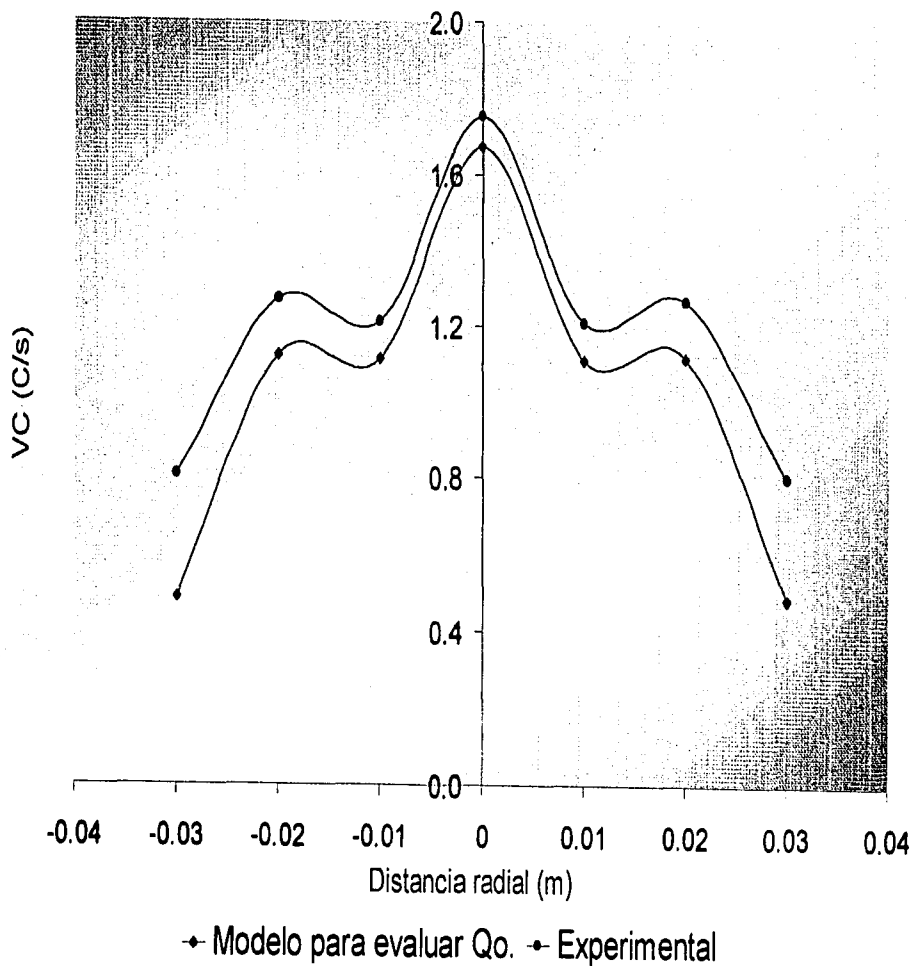


Figura 20. VC vs distancia radial de un cilindro de alginato de sodio de $R=0.03\text{m}$ y $L=0.025$.

Es importante señalar que las figuras 19 y 20 corresponden a los cilindros de longitud menor (0.025 m), lo que hace suponer que el modelo propuesto se ajusta a productos de menor tamaño.

En las figuras 19 y 20 se observa que en el gel de radio 2 cm no existe pérdida de calor en la superficie a diferencia del gel de 3 cm, sin embargo las diferencias de temperatura entre la superficie y el centro son mayores en el producto de 2 cm (64%), a diferencia del producto de radio 3cm (32%), lo que ocasiona una mayor uniformidad de calentamiento.

La acumulación de calor en el centro (Figura 19 y 20.) está relacionada con la profundidad de penetración del alginato de sodio (0.02m), y el fenómeno de interferencia constructiva cuando dos ondas se encuentran (las ondas se suman), situación que es más notoria en cilindros de 0.02 m porque el gradiente de temperaturas entre el centro y superficie es de 60° C, mientras que en el de 0.03 m es de 30° C .

Henk, (1996) y Padua, (1993), quienes trabajaron con geles de agar; cilíndricos de 0.021 m y 0.03 m de radio, respectivamente; en los resultados experimentales y simulados presentaron un comportamiento similar (calentamiento en el centro) a los obtenidos en el presente trabajo.

El tamaño del producto es importante en el comportamiento del patrón de calentamiento ya que la ley de Lambert sólo se aplica a valores de tamaño 2 o 3 veces mayor que su profundidad de penetración (Dp), Para el alginato de sodio al 1% el valor de Dp= 2.1 cm.

El tamaño del producto es de gran importancia en los análisis de calentamiento por microondas y en la actualidad existen ecuaciones empíricas para determinar espesores o longitudes en las cuales es aplicable la Ley de Lambert. Ayappa y Davis (1991b) obtuvieron una ecuación para placa, en la cual determinan la longitud crítica (L_{crit}) mínima del producto.

$$L \geq L_{crit} = 2.7 * Dp - 0.08$$

Ec. 3.1.

La ecuación 3.1. está en función de la profundidad de penetración y sólo se aplica a placas; sin embargo para determinar si los valores de tamaño de producto cumplen con la condición establecida para aplicar Ley de Lambert, se obtuvieron relaciones de diámetro con longitud D/L en los cilindros de gel de alginato de sodio de 2 cm y 3 cm de radio con 0.025m de longitud, porque en estas dimensiones los resultados simulados y experimentales son similares.

$$D/L= 1.6 \text{ (r=0.02m y L=0.025m)}$$

$$D/L= 2.4 \text{ (r=0.03m y L= 0.025)}$$

Para relacionar los valores de D/L con la profundidad de penetración se obtuvo la relación $Dp/L=0.84$, ($Dp=$ Profundidad de penetración).

Al comparar los valores de D/L con el Dp/L se obtiene que el $D/L=1.6$ para el radio de 2 cm si cumple al ser aproximadamente 2 veces mayor que el $Dp/L=0.84$, mientras que el $D/L=2.4$ para el radio 3 cm, es aproximadamente 3 veces mayor. Los resultados obtenidos con el modelo para evaluar Q_0 , si cumplen con la condición para aplicar Ley de Lambert, lo cual justifica similitud con los datos experimentales.

Con los resultados obtenidos también podemos hacer referencia y comparación en la tabla 28. con el modelo simulado y obtenido por Lin (1995)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 28. Comparación de los modelos de Lin (1995) y el desarrollado.

AUTOR	SISTEMA	METODO ANALITICO Qo	METODO NUMERICO	CONDICION ES FRONTERA	RESULTADOS OBTENIDOS
Modelo propuesto (2002)	Unidireccional (Radial) Axisimétrico Homogéneo Isotrópico	Por método de integración.	Sólo se consideró transferencia por microondas, la resolución fue analítica.	*Pérdida de calor por convección.	*Calentamiento en el centro del producto en radios menores y mayores. *En radios de 2 y 3 cm con D/L de 1.6 y 2.4, respectivamente, los resultados son similares a los experimentales.
Lyn Y. E. y Co. (1995)	Bidireccional (Radial y axial) Axisimétrico Homogéneo Isotrópico	Aproximación es por diferenciales.	Elemento Finito para resolver el modelo de la segunda ley de Fourier.	*Pérdida de calor por convección. *Pérdida de calor por evaporación del agua.	*Calentamiento en el centro del producto en radios menores y en radios mayores no es predominante el calentamiento. *En radios de 2 y 3 cm con D/L de 1.2 y 2.4, respectivamente los resultados son similares a los experimentales.

En la tabla 28 se observa que para radios de 2 y 3 cm los dos modelos muestran un patrón de comportamiento similar, el cual se contrasta con los resultados experimentales, sin embargo a radios mayores ya no presenta similitudes porque en el modelo de Lin (1995) el calentamiento es menos predominante en el centro, situación que se presenta en los datos experimentales (Ver tabla 27), las respuestas de los dos modelos puede deberse a que en el modelo desarrollado sólo se considera un sistema de transferencia de calor mientras que en el modelo de Lin (1995) implican dos direcciones. También puede influir la condición frontera que involucra Lin (1995), la pérdida de calor debido a evaporación de agua, lo que puede originar disminución de temperatura en el producto..

La evaluación de Q_0 en ambos modelos es mediante la ley de Lambert, sin embargo la resolución analítica fue diferente porque en el modelo desarrollado al considerar el sistema unidireccional la resolución fue por métodos de integración directa, mientras que en el de Lin (1995), al ser bidireccional su resolución es más compleja.

Lin (1995) en su modelo incluye la segunda Ley de Fourier y aplica el método numérico de elemento finito para su resolución, sin embargo en el modelo desarrollado para obtener Q_0 , en radios pequeños muestran comportamientos similares.

Con los resultados obtenidos se establece que el modelo para evaluar Q_0 en el que sólo se involucra la transferencia de calor por microondas y que se basa en la Ley de Lambert tiene un rango de aplicación para cilindros compuestos de alginato de sodio al 1% con dimensiones $R= 0.02, 0.03$ m, y $L= 0.025$.

CONCLUSIONES

- ❖ La contrastación del modelo propuesto, resuelto por medio de integrales, presentó un comportamiento similar al modelo resuelto por diferenciales, en los valores de calor absorbido por microondas; siempre que el radio del cilindro no sea menor a 1.8 cm.
- ❖ Del análisis de sensibilidad realizado, el modelo mostró mayor sensibilidad en las distribuciones de temperatura al variar la difusividad térmica en porcentajes desde -9% y 7%, mientras que las variaciones del coeficiente convectivo muestran sensibilidad en porcentajes de $\pm 60\%$.
- ❖ Los dos modelos desarrollados Fourier resuelto por el método numérico de diferencias finitas y Q_0 resuelto por método analítico presentan un comportamiento similar en los resultados de velocidades de calentamiento, por lo que el fenómeno de transferencia de calor por conducción involucrado en el modelo de Fourier no influye en la distribución de temperatura de procesos de calentamiento por microondas.
- ❖ En cilindros de longitud menor (0.025 m), los resultados experimentales y simulados con el modelo desarrollado para evaluar Q_0 se ajusta a productos de menor tamaño.
- ❖ Las diferencias de temperatura entre la superficie y el centro son mayores en el producto de 2 cm (64%), a diferencia del producto de radio 3cm (32%), lo que ocasiona una mayor uniformidad de calentamiento.
- ❖ Al comparar los valores de D/L con el D_p/L se obtiene que el $D/L=1.6$ para el radio de 2 cm si cumple al ser aproximadamente 2 veces mayor que el $D_p/L=0.84$, mientras que el $D/L=2.4$ para el radio 3 cm, es aproximadamente 3 veces mayor. Los resultados obtenidos con el

modelo para evaluar Q_0 , si cumplen con la condición para aplicar Ley de Lambert, lo cual justifica la similitud con los datos experimentales.

- ❖ El modelo para evaluar Q_0 en el que sólo se involucra la transferencia de calor por microondas y se basa en la Ley de Lambert tiene un rango de aplicación para cilindros de alginato de sodio al 1% con dimensiones $R = 0.02, 0.03$ m, y $L = 0.025$.
- ❖ Los datos simulados del modelo de Q_0 , mostró resultados similares, en el rango de aceptación con los datos experimentales a las relaciones de $D/L = 2.4$ a un radio de 3 cm, con el modelo de Lin, en el que se empleó la segunda ley de Fourier y se resolvió numéricamente por el método de elemento finito.

BIBLIOGRAFIA

1. Ayappa, K., Davis, H. T., Davis, E. A. y Gordon, J (1991a). Analysis of Microwave Heating of Materials with Temperature-Dependent Properties. Chem. Eng. Prog. 37 (3), 313-322.
2. Ayappa, K. y Davis, H. T. (1991b). Microwave Heating: An Evaluation of Power Formulations. Chem. Eng. Sci. 46(4), 1005-1016.
3. Barringer, S. A., Ayappa, K. G., E.A. Davis, H. T. Davis y J. Gordon. (1994). Effect of Sample Size on the Microwave Heating Rate: Oil vs. Water. AIChE Journal. 40(9) 1433-1439.
4. Chávez, L. M. (1991). Aplicación de la Energía de Microondas. Noticias técnicas. 16-22.
5. Chen, D., Haghghi, K., Singh, R. K. Y Nelson, P. E. (1990), Finite element analysis of temperature distribution during microwaved particulate food. ASAE Paper No. 906602. St Joseph. MI.
6. Datta A.K. and Hu, W. (1992). Optimization of quality in microwave heating. Food Technol. 46 (12), 53-56.
7. Datta, A. K. (1990). Heat and Mass Transfer in the Microwave Processing of Food. Chem. Eng. Prog. 86 (6). 47-53.
8. Decareu, V. R. (1986). Microwave Food Processing Equipment Throughout the World. Food Technol. 40 (1), 99-105.
9. Decareu, V. R. y Peterson, R. A. (1986). "Microwave Processing and Engineering", Ellis Horwood, Great Britain, pp. 89-105.
10. Giese, J. (1992). Advances in Microwave Food Processing. Food Technol. 46 (10), 118.
11. Harfinger, L. (1992). Microwave Sterilization. Food Technol. 46 (12), 57-61.
12. Heldman, D.R. (1982). Food Properties During Freezing. Food Technol. 36 (2) 92.
13. Henk, H. J., Carina T. P., Herry, H. , Paul, V. B. y Piet, J. A. M. (1996). Microwave Heating Distributions in Slabs, Spheres and Cylinders with Relation to Food Processing. Journal of Food Sci. 61 (6) 1105-1109.

14. Jiménez, V. M. E. (1997) "Efecto del tratamiento térmico con microondas sobre el oscurecimiento enzimático del aguacate". Tesis, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. México, pp. 28-31.
15. Lin, Y. E., Anantheswaran, R. C. y Puri, V. M. (1995). Finite Element Analysis of Microwave Heating of Solids Foods. *Journal of Food. Eng.* 25, 85-112.
16. Incropera, F. P. y De Witt D. P. (1985). "Fundamentals of Heat and Mass Transfer" 2ªed. John Wiley and Sons, Inc. Singapore.
17. Mudgett, R. E. (1982). Electrical Properties of Foods in Microwave Processing. *Food Technol.* 36 (2), 109-115.
18. Mudgett, R. E. (1986). Microwave Properties and Heating Characteristics of Foods. *Food Technol.* 40 (1), 84-93.
19. Mudgett, R. E., Goldblith, S. A., y Westphal, W. B. (1977). Prediction of dielectric in solid foods of high moisture content at ultra high and microwaves frequencies. *J. Food. Processing Preserv.* 1, 119-151.
20. Özilgen, M. (1998). "Food Process Modeling and Control: Chemical Engineering Applications". Gordon and Breach Science Publishers. Australia.
21. Padua, W.G. (1993). Microwave Heating of Agar Gels Containing Sucrose. *Journal of Food Sci.* 58(12) 1426-1428.
22. Pangrle, B. J., Ayappa, K. G., E.A. Davis, H. T. Davis y J. Gordon. (1991). Microwave Thawing of Cylinders. *AIChE Journal.* 37(12) 1789-1800.
23. Rao, M. A. y Rizvi, S. S.H. (1986). "Engineering Properties of Foods". Marcel Decker. Inc., New York. p.381.
24. Rosenberg, U. y Bogl, W. (1987a). Microwave Pasteurization, Sterilization, Blanching and Pest Control in the Food Industry. *Food Technol.* 41 (6), 92-99.
25. Rosenberg, U. y Bogl, W. (1987b). Microwave, Thawing, Drying and Baking in the Food Industry. *Food Technol.* 41 (6), pp. 85-91.
26. Ryynanen, S. y Ohlsson, T. (1996). Microwave Heating Uniformity of Ready Meals as Affected by Placement, Composition, and Geometry. *Journal of Food Sci.* 41 (3) 620-624.
27. Sánchez, T. A. (1985). "Principios Básicos de Calentamiento por Microondas en Alimentos", Tesis, F.E.S.-C., México, pp. 30-63.

28. Schiffmann, R. F. (1986). Food Product Development for Microwave Processing. Food Technol. 40 (1), 94-98.
29. Schiffmann, R.F. (1992). Microwave Processing in the U.S. Food Industry. Food Technol. 46 (12), 50-52.
30. Schlegel, W. (1992). Comercial pasteurization and sterilization of food products using microwaves technology. Food Technol. 46 (12), 62-63.
31. Singh, R. P. y Heldman, D. R. (1984). "Introduction to Food Engineering". Academic Press, NY.
32. Swami, S. (1982). Microwave heating characteristics of simulated high moisture foods. MS.Thesis. University of Massachusetts, Amherst, MA.
33. Vilayannur, R.S., Puri, V. M. y Anantheswaran, R. C. (1998a). Size and shape effect on nonuniformity of temperature and moisture distributions in microwave heated foods materials: Part I Simulation. Journal of Food Process Eng. 21 (2) 209-233.
34. Vilayannur, R.S., Puri, V. M. y Anantheswaran, R. C. (1998b). Size and shape effect on nonuniformity of temperature and moisture distributions in microwave heated foods materials: Part II Experimental Validation. Journal of Food Process Eng. 21 (2) 235-248.
35. Wastney, M. E., Patterson, B. H., Linares, O. A., Greif, P. C. y Boston, R. C. (1999). "Investigating Biological Systems Using Modeling". Academic Press, New York.
36. Yurén, C. M. T. (1982). Leyes , Teorías y Modelos. Trillas, México.
37. Zhou, L., Puri, V. M., Anantheswaran, R. C. y Yeh, G. (1995). Finite Element Modeling of Heat and Mass Transfer in Food Materials Durig Microwave Heating: Model Development and Validation. Journal of Food. Eng. 25, 509-529.

ANEXO I: DESARROLLO DEL PROGRAMA DE COMPUTO

```
Private Sub Command1_Click()  
Dim r1 As Double, r2 As Double  
Dim temp As Double, i As Integer  
Dim num_procesos As Integer, b As Integer, a As Integer  
Dim T_int(1 To 50) As Double, T_ant(1 To 50) As Double  
List1.Clear  
L = Val(Text1.Text)  
R = Val(Text2.Text)  
deltaR = Val(Text3.Text)  
k1 = Val(Text4.Text)  
k2 = Val(Text5.Text)  
Po = Val(Text6.Text)  
deltaT = Val(Text7.Text)  
Ro = Val(Text8.Text)  
Cp = Val(Text9.Text)  
h = Val(Text10.Text)  
k = Val(Text11.Text)  
Th = Val(Text12.Text)  
Tsp = Val(Text13.Text)  
tiempo = Val(Text14.Text)  
tiempo_activo = Val(Text15.Text)  
tiempo_total = Val(Text16.Text)  
nodos = Int((R * 10000) / (deltaR * 10000)) + 1  
Calcula_alfa  
Label11.Caption = Format(alfa, "#0.000000")  
Label13.Caption = Format(lambda, "#0.000000")  
i = 1  
r1 = 0#  
r2 = r1 + deltaR  
  
Do  
    Qp(i) = Qtotal(r1, r2)  
    datoX(i) = r2
```

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

```

datoY(i) = Qp(i)
temp = (Qp(i) * deltaT) / (Ro * Cp)
linea$ = Format(r2, "#0.0000") & "          " & Format(Qp(i),
"0.000E+00") & "          " & Format(temp, "#,###.000")
List1.AddItem linea$
r1 = r2
r2 = r2 + deltaR
i = i + 1
Loop Until r2 > R
hacer_grafica
num_procesos = Int(tiempo / deltaT)
For b = 1 To nodos
    T_int(b) = Tsp
    T_ant(b) = Tsp
Next b
nombre_archivo = InputBox("Grabar como :", "Grabar Datos de
Salida")
nombre_archivo = "C:\Proyectos\Programas en VB 5\Condiciones\"
& Trim(nombre_archivo) & ".dts"
Open nombre_archivo For Output As #1
For a = 1 To num_procesos
    If a = 1 Then
        T_int(a) = nodo_orilla(T_ant(a), T_ant(1))
    Else
        T_int(a) = nodo_orilla(T_ant(2), T_ant(1))
    End If
    linea$ = Format(T_int(a), "##,##0.00")
    For b = 2 To nodos
        T_int(b) = nodo_interno(T_ant(b + 1), T_ant(b), T_ant(b -
1), b, num_procesos)
        If b = nodos Then T_int(b) = nodo_interno(T_ant(b - 1),
T_ant(b), T_ant(b - 1), b, num_procesos)
        linea$ = linea$ & ", " & Format(T_int(b), "##,##0.00")
    Next b
    For b = 1 To nodos
        T_ant(b) = T_int(b)

```

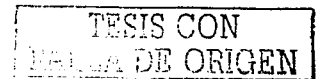
```

    Next b
    Print #1, linea$
Next a
Close #1
End Sub

Private Sub Command2_Click()
    End
End Sub

Private Sub hacer_grafica()
Dim max As Integer, mayor As Double, menor As Double
Dim factor As Double, dig_a As Long, dig_b As Long
    max = List1.ListCount
'***** DETERMINAR CIFRA MAYOR Y MENOR
'***** R es el dato mayor en X ***** deltaR el menor
    menor = datoY(1)
    mayor = 0#
    For a = 1 To max
        If datoY(a) > mayor Then mayor = datoY(a)
        If datoY(a) < menor Then menor = datoY(a)
    Next a
'***** CONVERTIR DATOS EN ENTEROS
    grafica.ColumnLabel = "Qp"
    'factor = 100 / mayor
    dig_a = Len(Str(Int(mayor)))
    dig_b = dig_a - 3
    factor = 10 ^ (dig_a - dig_b)
    Label32.Caption = "Potencia E " & Str(dig_b - 3)
    grafica.RowCount = max
    For a = 1 To max
        puntoY(a) = Int(datoY(a) / factor)
        grafica.Row = a
        grafica.RowLabel = Format(datoX(a), "0.#####")
        grafica.Data = puntoY(a)
    Next a

```



End Sub

```
Private Sub Command3_Click() 'VER GRAFICA
    Command3.Visible = False
    Command4.Visible = True
    List1.Visible = False
    '***** HACER VISIBLE EL GRAFICO
    Label31.Visible = True
    Label32.Visible = True
    grafica.Visible = True
End Sub
```

```
Private Sub Command4_Click() 'VER DATOS
    Command3.Visible = True
    Command4.Visible = False
    List1.Visible = True
    '***** HACER GRAFICA INVISIBLE
    Label31.Visible = False
    Label32.Visible = False
    grafica.Visible = False
End Sub
```

```
Private Sub Command5_Click()      'Cargar condiciones desde un
archivo
    dialogo.InitDir = "C:\Proyectos\Programas en VB 5\Condiciones\"
    dialogo.Filter = "Archivos de datos (*.dat)|*.dat|"
    dialogo.Action = 1
    nombre_archivo = dialogo.filename
    If dialogo.filename <> "" Then
        Open nombre_archivo For Input As #1
            Input #1, variable1
            Text1.Text = variable1
            Input #1, variable1
            Text2.Text = variable1
            Input #1, variable1
```

TESIS CON
FALSA DE ORIGEN

```
Text3.Text = variable1
Input #1, variable1
Text4.Text = variable1
Input #1, variable1
Text5.Text = variable1
Input #1, variable1
Text6.Text = variable1
Input #1, variable1
Text7.Text = variable1
Input #1, variable1
Text8.Text = variable1
Input #1, variable1
Text9.Text = variable1
Input #1, variable1
Text10.Text = variable1
Input #1, variable1
Text11.Text = variable1
Input #1, variable1
Text12.Text = variable1
Input #1, variable1
Text13.Text = variable1
Input #1, variable1
Text14.Text = variable1
Input #1, variable1
Text15.Text = variable1
Input #1, variable1
Text16.Text = variable1
Close #1
End If
End Sub
```

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

```
Private Sub Command6_Click() 'Grabar Archivo de Condiciones
    nombre_archivo = InputBox("Guardar Archivo como :", "Grabar
    Condiciones de Corrido")
    If nombre_archivo <> "" Then
```

```
graba_archivo = "C:\Proyectos\Programas en VB
5\Condiciones\" & Trim(nombre_archivo) & ".dat"
```

```
Open graba_archivo For Output As #1
```

```
Print #1, Trim(Text1.Text)
Print #1, Trim(Text2.Text)
Print #1, Trim(Text3.Text)
Print #1, Trim(Text4.Text)
Print #1, Trim(Text5.Text)
Print #1, Trim(Text6.Text)
Print #1, Trim(Text7.Text)
Print #1, Trim(Text8.Text)
Print #1, Trim(Text9.Text)
Print #1, Trim(Text10.Text)
Print #1, Trim(Text11.Text)
Print #1, Trim(Text12.Text)
Print #1, Trim(Text13.Text)
Print #1, Trim(Text14.Text)
Print #1, Trim(Text15.Text)
Print #1, Trim(Text16.Text)
```

```
Close #1
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
lambda = c / f
```

```
End Sub
```

```
Global Const Pi = 3.14159265358979, c = 300000000#, f =
2450000000#
```

```
Global L As Double 'longitud del cilindro
```

```
Global alfa As Double
```

```
Global lambda As Double
```

```
Global k1 As Double
```

```
Global k2 As Double
```

```
Global Pr As Double
```

```
Global Po As Double 'Potencia Inicial Incidente en Horno
```

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

```

Global R As Double      'Radio del cilindro
Global h As Double     'Coeficiente Convectivo
Global k As Double     'Conductividad Térmica
Global Th As Double    'Temp ambiental del Horno
Global Tsp As Double   'Temp inicial del producto
Global deltaR As Double 'Incremento de Radio
Global deltaT As Double 'Incremento de tiempo
Global Ro As Double    'Densidad
Global Cp As Double    'Calor Específico
Global tiempo As Integer
Global nodos As Integer
Global Qp(1 To 100) As Double
Global datoX(100) As Double, datoY(100) As Double
Global puntoX(100) As Long, puntoY(100) As Long
Global tiempo_activo As Integer
Global tiempo_total As Integer
Function activar_horno(lapso As Integer) As Boolean
    If lapso > tiempo_total Then
        lapso = lapso Mod tiempo_total
    End If
    If lapso > tiempo_activo Then
        activar_horno = False
    Else
        activar_horno = True
    End If
End Function
Function Qtotal(r1 As Double, r2 As Double) As Double
Dim RAR As Double, prod1 As Double, prod2 As Double
    RAR = Pi * L * (L + R)
    Pr = (Po * R) / RAR

    prod1 = (Exp(-2 * alfa * (R - r2)) - Exp(-2 * alfa * R))
    prod2 = (Exp(-2 * alfa * (R - r2)) - Exp(-4 * alfa * R))
    Qtotal = Pr * ((prod1 / (r2 ^ 2)) + prod2 / (((R ^ 2) * 4) - (r2 ^
2)))

```

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

End Function

Sub Calcula_alfa()

Dim tan2d As Double, c1 As Double, c2 As Double

tan2d = (k2 / k1) ^ 2

c1 = 2 * Pi / lambda

c2 = (k1 * (Sqr(1 + tan2d) - 1)) / 2

alfa = c1 * Sqr(c2)

End Sub

Function nodo_orilla(T2 As Double, T1 As Double) As Double

Dim parte1 As Double

parte1 = deltaR * h

nodo_orilla = ((k * T2) + (parte1 * Th)) / (k + parte1)

End Function

**Function nodo_interno(T3 As Double, T2 As Double, T1 As Double,
num As Integer, t_proceso As Integer) As Double**

**Dim parte1 As Double, parte2 As Double, parte3 As Double, parte4 As
Double**

parte1 = deltaT * k / (deltaR * Ro * Cp)

parte2 = (-2 * T2 + T3 + T1) / deltaR

parte3 = (T2 - T1) / (2 * deltaR * (num - 1))

parte4 = (deltaT * Qp(num - 1) / (Ro * Cp)) + T2

nodo_interno = parte1 * (parte2 + parte3) + parte4

End Function

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN