



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"CUAUTITLAN"**

**PRINCIPIOS BASICOS DEL CALENTAMIENTO
POR MICROONDAS EN ALIMENTOS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
LUIS ALBERTO SANCHEZ TERMINEL**

DIRECTOR: ING. HECTOR J. BECERRA RIOS

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1985



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 está 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.

I N D I C E

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I GENERALIDADES DEL CALENTAMIENTO POR MICROONDAS	
1.1 Procesos de transferencia de calor.....	4
1.1.1 Conducción.....	4
1.1.2 Convección.....	5
1.1.3 Radiación.....	7
1.1.3.1 Leyes de radiación.....	13
1.2 Radiación de microondas.....	20
1.2.1 Radiación, frecuencia y longitud de onda.....	20
1.2.2 Características de las microondas.....	24
1.2.3 Energía en ondas electromagnéticas.....	28
1.2.4 Tipos de calentamiento eléctrico.....	29
1.2.5 Mecanismo del calentamiento por microondas.....	31
CAPITULO II PROPIEDADES DIELECTRICAS, ECUACIONES BASICAS DE ABSORCION, PENETRACION Y TRANSFERENCIA DE CALOR DE MICROONDAS	
2.1 Propiedades dieléctricas básicas.....	34
2.1.1 La constante dieléctrica relativa y el factor de pérdida dieléctrica relativo.....	34
2.1.2 La tangente de pérdidas.....	38
2.2 La ecuación de potencia.....	40
2.3 La ecuación de penetración.....	41
2.3.1 Coeficiente de atenuación y evaluación.....	42
2.4 La ecuación de profundidad a la mitad de potencia.....	50
2.5 Transferencia de calor por microondas en una placa.....	50
2.5.1 Modelo para el calentamiento por microondas de una placa interna.....	50
2.5.2 Modelo para el calentamiento por microondas de una placa externa.....	57
2.5.3 Ejemplo de cálculo.....	59
2.5.4 Generalización de los modelos para placas internas y externas.....	64
CAPITULO III HORNOS DE MICROONDAS Y DISEÑO	
3.1 El horno de microondas.....	66
3.1.1 Componentes principales de un horno de microondas.....	66
3.1.1.1 Descripción y funcionamiento del magnetrón....	68
3.2 Diferentes tipos de hornos de microondas.....	72
3.2.1 El horno Batch.....	72
3.2.2 Horno continuo con radiadores parabólicos.....	72
3.2.3 Horno continuo con cinco magnetrones.....	74
3.2.4 Horno continuo con un solo magnetron de gran potencia...	74
3.2.5 Horno continuo con guía ondas de laberinto.....	76
3.3 Consideraciones de diseño para un horno de microondas.....	77
3.3.1 Diseño de la capacidad del magnetrón y evaluación del tiempo de procesado.....	78

3.3.2	Dimensionamiento de la cavidad de un horno de microwondas.....	89
3.3.2.1	Modos en el interior de la cavidad de un horno.....	89
3.3.2.2	Calculo de los modos y dimensiones de la cavidad.....	93
CAPITULO IV	APLICACIONES DEL CALENTAMIENTO POR MICROONDAS EN ALIMENTOS	
4.1	Revisión general de aplicaciones en la industria de alimentos...	100
4.1.1	Deshielado.....	102
4.1.2	Cocinado.....	103
4.1.3	Blanqueado.....	109
4.1.4	Pasteurización.....	110
4.1.5	Esterilización.....	113
4.1.6	Secado.....	117
4.1.7	Horneado.....	123
4.1.8	Aplicaciones especiales.....	124
CONCLUSIONES.....		126
APENDICE.....		129
BILIOGRAFIA.....		148

I N T R O D U C C I O N

Las ventajas indiscutibles que ofrece el calentamiento por microondas para muchas aplicaciones en alimentos - por sus características de rápido calentamiento a profundidad y homogeneidad han generado gran interés en la industria de alimentos. Debido a ello, estudiantes e investigadores de diversos países se han preocupado por generar teorías y parametros que describan facilmente el fenómeno del calentamiento por microondas y las interacciones con los alimentos y diversos materiales, con el propósito de crear sistemas y equipos de procesamiento adecuados - para el tratamiento de alimentos.

El calentamiento por microondas surgió hace algunos años cuando nuevos generadores de microondas diseñados - especialmente para el calentamiento fueron anunciados por algunas compañías. A partir de entonces se inició un - amplio desarrollo de procesos de calentamiento por microondas en los Estados Unidos y en Europa.

Actualmente en México se desconoce casi por completo de los sistemas de calentamiento por microondas debido a la poca información disponible, a la dificultad de obtenerla y de desarrollar investigación experimental. Por

ello el objetivo de esta tesis es primordialmente presentar los principios básicos del calentamiento por microondas de una manera sencilla con el fin de despertar el interés principalmente de los estudiantes de ingeniería en alimentos para que se comience a desarrollar investigación sobre esta área en nuestra Universidad.

En el Capítulo I se presentan de manera general los mecanismos de transferencia de calor con la finalidad de ubicar al lector sobre los fenómenos de transferencia - ampliando un poco en la radiación térmica con el propósito de que se distingan los parámetros involucrados en esta y se diferencien entre los parámetros utilizados en la radiación por microondas. Posteriormente se presenta el fenómeno de radiación por microondas, y algunos tipos de calentamiento eléctrico similares al calentamiento por microondas.

En el Capítulo II se presentan los parámetros y - - ecuaciones básicas que describen el calentamiento por - - microondas y se presenta un método numérico para el - - cálculo del perfil tiempo-temperatura en una placa de - - alimento.

Diferentes tipos de hornos utilizados en la indus--

tria, así como sus partes y una breve descripción del generador de microondas son presentadas en el Capítulo III en donde además se plantea a grandes rasgos un procedimiento para diseñar un pequeño horno de microondas tipo batch.

Finalmente se presenta una revisión de las aplicaciones en la industria de alimetnos en el Capítulo IV, y una pequeña compilación de las propiedades dieléctricas fundamentales utilizadas para la evaluación de los procesos de calentamiento por microondas es dada en el - - Apendice I.

Es importante aclarar que este trabajo es resultado de una amplia investigación bibliográfica y puede ser - extendido en la medida que se disponga de más información e investigación experimental.

CAPITULO I

GENERALIDADES DEL CALENTAMIENTO POR MICROONDAS

1.1 Procesos de transferencia de calor.

1.1.1 Conducción.

1.1.2 Convección.

1.1.3 Radiación.

1.1.3.1 Leyes de radiación.

1.2 Radiación de microondas.

1.2.1 Radiación, frecuencia y longitud de onda.

1.2.2 Características de las microondas.

1.2.3 Energía en ondas electromagnéticas.

1.2.4 Tipos de calentamiento eléctrico.

1.2.5 Mecanismo del calentamiento por microondas.

1.1 Procesos de transferencia de calor.

En el estudio de la transferencia de calor se suelen considerar tres formas distintas de transferencia: conducción, convección y radiación.

1.1.1 Conducción.

Si en una sustancia continua existe un gradiente de temperatura, el calor puede fluir sin que se produzca un desplazamiento observable de la materia, esta clase de flujo se denomina conducción. La conducción tiene lugar a escala molecular, y el mecanismo corresponde a un transporte de la cantidad de movimiento de las moléculas individuales a lo largo del gradiente de temperatura.

La ley básica de la conducción basada en observaciones experimentales conocida como la ley de Fourier, establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección. Así para el flujo de calor en la dirección (x), la ley de Fourier puede expresarse como:

$$Q_x = - KA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{BTU/Hr}) \text{ ó } (\text{W}) \quad (1.1)$$

o bien

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -K \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{BTU/Hr ft}^2) \text{ ó } (\text{W/m}^2) \quad (1.2)$$

En donde (Q_x) es la tasa de flujo de calor a través - del área (A) en la dirección (x) positiva, y (q_x) es el - flujo de calor en la dirección (x) positiva. La constante de proporcionalidad (K) se llama conductividad térmica del material y es una cantidad positiva, cuyas unidades son - $(\text{BTU/Hr ft } ^\circ\text{F})$ ó $(\text{W/m } ^\circ\text{C})$ si el flujo de calor (q_x) se expresa en (BTU/Hr ft^2) ó (W/m^2) , y el gradiente de temperatura $\partial T/\partial x$ en $(^\circ\text{F/ft})$ ó $(^\circ\text{C/m})$.

1.1.2 Convección.

Cuando un fluido en movimiento pasa sobre un cuerpo - sólido o fluye dentro de un canal y si las temperaturas - del fluido y el sólido o del canal son diferentes, habrá - transferencia de calor entre el fluido y la superficie sólida debido al movimiento relativo entre el fluido y la su - perficie, a este mecanismo de transferencia de calor, se - le llama convección. Puesto que la convección es un fenó - meno macroscópico, sólo puede tener lugar cuando actúan so - bre la partícula o corriente del fluido fuerzas, que son - capaces de mantener el movimiento, venciendo las fuerzas - de fricción.

Las fuerzas utilizadas para crear las corrientes de convección en fluidos son de dos tipos. Si las corrientes resultan de las fuerzas de flotación generadas por diferencias de densidad, y estas diferencias son a su vez debidas a gradientes de temperatura existentes en la masa del fluido, la acción se denomina convección natural. Un fluido que es calentado en un recipiente constituye un ejemplo de la convección natural. Si las corrientes se ponen en movimiento mediante un dispositivo mecánico como una bomba o un agitador el flujo es independiente de los gradientes de densidad y recibe el nombre de convección forzada. El flujo de calor hacia un fluido que se bombea a través de una tubería caliente constituye un ejemplo de convección forzada. Ambos tipos de fuerzas pueden actuar simultáneamente sobre el mismo fluido, dando lugar a la superposición de convección natural y forzada.

Debido a que el campo de temperatura de un fluido es influenciado por el movimiento de éste, la determinación de la distribución de temperatura y de la transferencia de calor por convección es un asunto complicado en la mayoría de los casos prácticos. En aplicaciones de Ingeniería para simplificar los cálculos de transferencia de calor, entre una superficie a temperatura (T_w) y un fluido que se desplaza sobre ella, a temperatura media (T_f) se define el coeficiente-

de transferencia de calor (h) como:

$$q = h(T_f - T_w) \quad (1.3)$$

en donde (q) es el flujo de calor en la pared. Algunas veces se da a esta relación el nombre de "ley de enfriamiento de Newton". Si el flujo de calor se expresa en unidades de (BTU/Hr ft²) ó (W/m²) y la temperatura en (°F) ó (°C) entonces el coeficiente de transferencia de calor (h) tiene unidades de (BTU/Hr ft² °F) ó (W/m² °C).

En el flujo laminar, (h) puede determinarse analíticamente si los cuerpos son de forma geométrica simple, pero cuando tienen forma geométrica compleja se debe determinar por métodos experimentales.

1.1.3 Radiación.

La transferencia de calor por radiación involucra la transferencia de energía de una superficie de alta temperatura, a una segunda superficie de baja temperatura. La energía es transferida por ondas electromagnéticas. Sin embargo no todas las ondas electromagnéticas pueden ser usadas para transferir calor. Existen muchas formas de energía electromagnética; en estas se incluyen las ondas usadas

para las emisiones de radio y televisión, las ondas de radar, las ondas usadas en el calentamiento de alimentos en hornos de microondas, rayos infrarrojos, luz visible, rayos ultra violeta, rayos X y los peligrosos rayos gamma asociados con reacciones nucleares. Todas estas ondas difieren entre si - no solo por su longitud de onda (λ) y frecuencia (f) sino - por su origen y efecto, pero tienen en común su naturaleza - electromagnética. (Fig. 1.1)

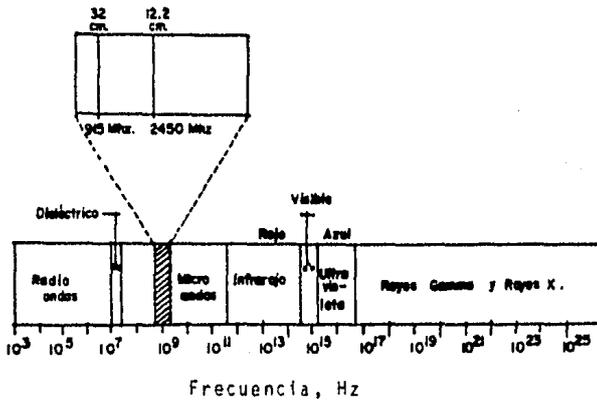


Fig. 1.1 Espectro electromagnético

La energía radiante, se considera de acuerdo con la teoría electromagnética de Maxwell, como consistente de un campo eléctrico oscilante acompañado por un campo magnético - también oscilante en fase con él. (Fig. 1.2)

La variación de la intensidad con el tiempo del campo - eléctrico pasando por un punto dado puede ser representada - por una onda senoidal que tiene longitud finita de cresta a -

cresta, que es (λ). La longitud de onda. El número de ondas que pasan por un punto dado en la unidad de tiempo, es la frecuencia de la radiación, y es dada en ciclos/seg. o Hertz.

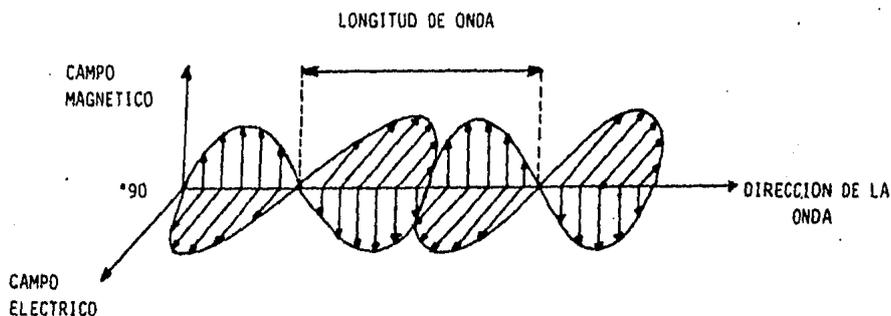


Fig. 1.2 Onda electromagnética

Se cree que la energía radiante se origina dentro de las moléculas del cuerpo radiante, los átomos que constituyen las moléculas vibran en un movimiento armónico simple como osciladores lineales. Se cree que la emisión de energía radiante representa una disminución en las vibraciones dentro de las moléculas, mientras que una absorción de energía representa un aumento. En su esencia, la teoría de los cuantos postula que para cada frecuencia de radiación hay una pequeña pulsación mínima de energía que debe emitirse. Este es el "cuanto," no pudiendo emitirse una cantidad más pequeña aún cuando si se puede emitir un múltiplo de esta cantidad mínima. La radiación total de energía de una frecuen-

cia dada emitida por un cuerpo, es un número entero de cuantos a esa frecuencia. Para diferentes frecuencias, el número de cuantos y por ende, de energía total, puede ser diferente.

El esquema atómico propuesto por Bohr es útil para comprender más claramente el posible origen de la energía radiante. Se cree que los electrones viajan alrededor del núcleo de un átomo en órbitas elípticas a distancias variables del núcleo. Los electrones de la órbita exterior poseen energías definidas que comprenden sus energías cinéticas y potenciales, en virtud de su rotación alrededor del núcleo. La energía potencial es la energía requerida para remover un electrón de su órbita a una distancia infinita del núcleo. Un electrón dado en una órbita a una cierta distancia del núcleo, tendrá determinada energía. Si ocurriera una perturbación, tal como la colisión de un átomo con otro o con un electrón, el electrón en cuestión podría ser desplazado de su órbita y podría (a) volver a su órbita original, (b) pasar a otra órbita cuyos electrones poseen diferente energía, o (c) dejar el sistema influido por el núcleo. Si la transición es de una órbita de mayor energía a una menor, el reajuste se efectúa radiando el exceso de energía.

Todos los cuerpos arriba de la temperatura de cero absoluto están constantemente perdiendo calor con sus alrede-

dores debido a que emiten una radiación, al mismo tiempo ellos reciben calor de sus alrededores. Cuando un cuerpo y sus alrededores están a la misma temperatura, reciben y emiten calor en la misma proporción aunque su temperatura permanezca constante. Si un cuerpo recibe más radiación que la que emite entonces su temperatura asciende. Inversamente si un cuerpo emite más calor que el que recibe entonces su temperatura disminuye.

La radiación se mueve a través del espacio siguiendo líneas rectas a la velocidad de la luz ($C = 3 \times 10^8$ m/Seg), y solamente las sustancias que están a la vista del cuerpo radiante pueden interceptar la radiación procedente de él. La fracción reflejada de la radiación que incide sobre el cuerpo se llama reflectividad, o coeficiente de reflexión, y se representa por (ρ). La fracción que es absorbida se llama coeficiente de absorción, o absorptividad, y se representa por (α). La fracción transmitida se llama transmisividad y se representa por (τ). (Ver Fig. 1.3). La suma de estas fracciones es igual a la unidad de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1.4)$$

La radiación como tal no es calor y cuando por absor-

ción se transforma en calor ya no es radiación. La conversión de la radiación en calor por absorción y la igualación de temperaturas entre dos cuerpos a través de la transferencia neta de radiación justifica la práctica habitual de la denominación de "calor" de radiación.

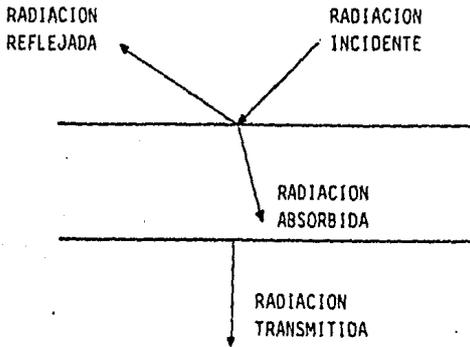


Fig. 1.3 Radiación reflejada, absorbida, y transmitida por un cuerpo

La radiación de una sola longitud de onda se llama monocromática. Un rayo real de radiación consta de muchos rayos monocromáticos. Un concepto importante en radiación es el de un cuerpo negro. Estos cuerpos absorben toda la energía radiante que incide sobre ellos. Estos no transmiten o reflejan ninguna fracción de la radiación incidente. Para un cuerpo negro entonces, $\alpha = 1$, $\rho = 0$ y $\tau = 0$. O bien, un cuerpo negro es un emisor perfecto de calor. En contraste un cuerpo blanco es aquel que refleja toda la radiación por ello se ve blanco. El concepto de cuerpo negro nos lleva a la definición de emisividad (ϵ) que es la relación entre

el poder emisor total de dicho cuerpo y el del cuerpo negro a la misma temperatura. Para un cuerpo negro $\epsilon = 1$. Un cuerpo gris es definido como aquel cuya emisividad es menor a uno. Una superficie opaca es aquella que absorbe o refleja toda la radiación incidente, es decir su coeficiente de transmisión es cero y entonces ($\alpha + \rho = 1$).

La absorción de radiación de un sólido opaco es un fenómeno superficial, esto produce que el interior del sólido carezca de interés en la absorción de radiación. El calor generado en la absorción solo puede fluir hacia el interior de la masa de un sólido opaco por conducción.

El poder radiante monocromático (W_λ) es la radiación monocromática emitida en todas direcciones desde un pequeño elemento de área de la superficie radiante a través de una semiesfera con centro en el área de radiación. Las unidades de esta magnitud pueden expresarse en kilocalorías por metro cuadrado por hora por micrón. El poder radiante total para el espectro de la radiación procedente de una superficie, es la suma de todas las radiaciones monocromáticas que salen de la superficie y se representa por (W).

1.1.3.1 Leyes de radiación.

En adición a los conceptos anteriores, cinco leyes de la radiación son importantes.

Ley de Kirchhoff. La ley de Kirchhoff es una importante generalización relacionada con el poder radiante de una sustancia y establece que, para la temperatura de equilibrio, la relación entre el poder emisor de un cuerpo cualquiera y el coeficiente de absorción de dicho cuerpo depende exclusivamente de la temperatura del cuerpo. Así para dos cuerpos que están en equilibrio térmico con alrededores comunes, la ley de Kirchhoff se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$\frac{W_1}{\alpha_1} = \frac{W_2}{\alpha_2} \quad (1.5)$$

siendo (W_1) y (W_2) los poderes emisivos totales y (α_1) y (α_2) los coeficientes de absorción de los dos cuerpos. Esta ley es aplicable tanto a la radiación monocromática como a la radiación total. De acuerdo a la ley de Kirchhoff un cuerpo negro posee el máximo poder emisor alcanzable a cualquier temperatura dada. Si el primer cuerpo al que se refiere la ecuación anterior es un cuerpo negro, $\alpha_1 = 1$, y :

$$W_1 = W_b = \frac{W_2}{\alpha_2} \quad (1.6)$$

(W_b) representa el poder emisor total de un cuerpo negro -
Entonces:

$$\alpha_2 = \frac{W_2}{W_b} \quad (1.7)$$

y como la emisividad del segundo cuerpo es por definición,

$$E_2 = \frac{W_2}{W_b} = \alpha_2 \quad (1.8)$$

Por consiguiente, cuando un cuerpo esta en equilibrio de -
temperatura con sus alrededores, su coeficiente de absor -
ción y su emisividad son iguales esto constituye otra for -
ma de expresar la ley de Kirchhoff.

Ley de Stefan Boltzmann. Una relación fundamental para la
radiación de cuerpo negro es dicha ley, la cual establece -
que el poder emisor total de un cuerpo negro es propor -
cional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, -

$$W_b = \sigma T^4 \quad (1.9)$$

siendo (σ) una constante universal (constante de Stefan--
Boltzmann). que depende solamente de las unidades utiliza -
das para medir (T) y (W_b). Su valor numérico es -
(4.878×10^{-8} Kcal/ m² Hr °K⁴, 56.7×10^{-9} W/m² K⁴).

La ley de Stefan-Boltzmann es una consecuencia de las leyes de la termodinámica y el electromagnetismo.

Ley de la distribución de Planck. Esta ley define la relación entre el poder emisor de un cuerpo negro como una función de la longitud de onda de la radiación y la temperatura del cuerpo.

Esta puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$W_{b,\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)} - 1} \quad (1.10)$$

Donde $W_{b,\lambda}$ es el poder emisor monocromático de un cuerpo negro en Kcal/(m²) (Hr) (micrón).

T Es la temperatura absorbida en °C

$C_1 = 3.22 \times 10^8$ (Kcal) (micrón)⁴ / (m²) (Hr).

$C_2 = 1.439 \times 10^4$ Micrón - °K.

λ = Longitud de onda de la radiación, (micrones).

En la figura (1.4) esta ecuación es presentada esquemáticamente.

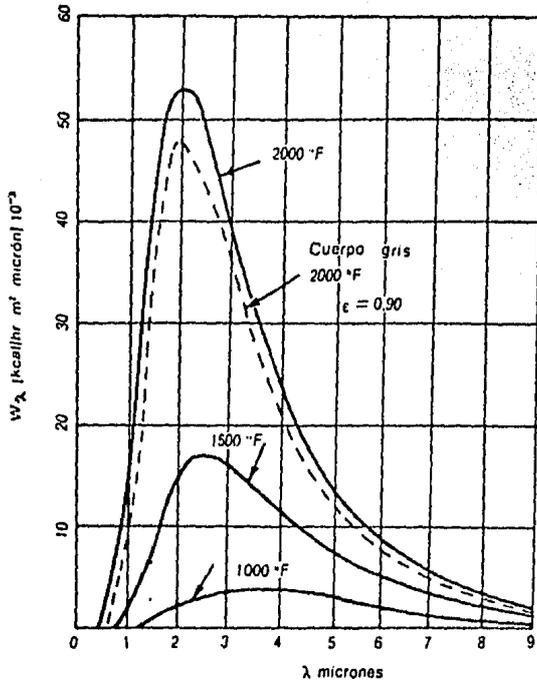


Fig. 1.4 Ley de la distribución de Planck

El poder emisor monocromático (en la Fig. 1.4) es la cantidad de radiación emitida a una particular longitud de onda. El poder emisor total de la ley de Stefan - Boltzmann es la cantidad de radiación emitida sobre todo el rango de longitudes de onda, esto es, el área bajo la curva del diagrama de la ley de Planck. (Fig. 1.4) Que matemáticamente se expresa como:

$$W = \int_0^{\infty} W_\lambda d\lambda \quad (1.11)$$

Donde W es el poder emisor total, $\text{Kcal}/(\text{m}^2) (\text{Hr})$.

W_λ es el poder emisor monocromático $\text{Kcal}/(\text{m}^2) (\text{Hr})$ - (micrón).

La figura (1.4) también presenta el poder emisor para un cuerpo gris que es menor que para uno negro a la misma temperatura sobre todo el rango de longitud de onda. Si la emisividad monocromática del cuerpo varía con la longitud de onda, entonces el cuerpo es coloreado (opuesto al gris). Si la emisión de radiación térmica ocurre solo en una selecta banda de longitud de onda, entonces el cuerpo es un emisor selectivo. Las emisividades de emisores coloreados o selectivos varían con la temperatura.

El diagrama de la ley de Planck presenta que para una determinada temperatura, el máximo poder emisor monocromático se alcanza para una definida longitud de onda, que se representa por ($\lambda_{\text{Max.}}$).

La ley de desplazamiento de Wien. Establece que la longitud de onda máxima es inversamente proporcional a la temperatura absoluta,

$$T \lambda_{\text{Max.}} = C \quad (1.12)$$

La constante (C) vale 2.890 cuando ($\lambda_{\text{Max.}}$) está en micrones y (T) en °K. La variación de ($\lambda_{\text{max.}}$) con la temperatura se presenta en la figura (1.5). A temperaturas por debajo de 500 °C, prácticamente el total de la emisión es

reconocido como luz. Arriba de 500 °C, la primera luz rojo claro aparece, cambiando conforme se incrementa la temperatura. Arriba de 900 °C el color es rojo cereza, a 1100 °C rojo naranja y arriba de 1400 °C blanco.

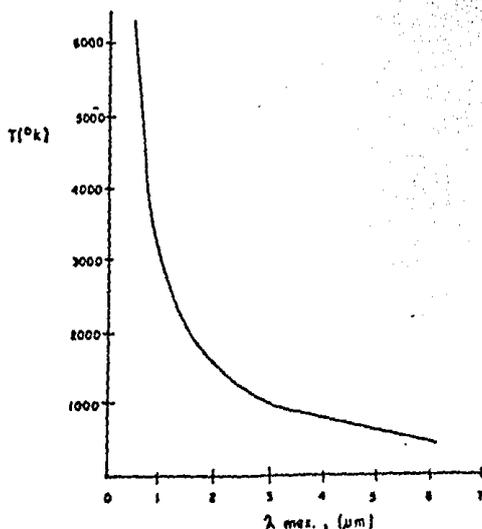


Fig. 1.5 Ley de desplazamiento de Wien

Cuando la radiación térmica golpea la superficie de algún alimento esta es reflejada pero algo principia a ser absorbido. Esta absorción causa que la densidad de la radiación disminuya rápidamente de la superficie del alimento a el interior. La ecuación de Bouger-Lambert expresa esta absorción:

$$q_x = q_0 e^{-Sx} \quad (1.13)$$

Donde q_0 = flujo de radiación en la superficie (W/m^2),

S = coeficiente de extinción (1/m), q_x = flujo de radiación (W/m^2) a una profundidad de x (m) de la superficie.

Los valores del coeficiente de extinción dependen de la longitud de onda de la radiación, la densidad y la composición química del alimento,

1.2 Radiación de microondas.

1.2.1 Radiación, frecuencia y longitud de onda.

La radiación transporta energía, sin necesidad de un substrato material, a la velocidad de la luz, lo que hace una gran diferencia con el transporte de energía por conducción y convección, los cuales necesitan un medio para transportar dicha energía.

La radiación puede considerarse como un modo de almacenar energía, por mucho que sea el espacio que separa la emisión original de una cantidad de radiación de su absorción final, la radiación continúa viajando sin pérdidas de ninguna clase, sin cambiar de velocidad, sin cambiar de frecuencia, hasta su destino final.

Lo que sabemos de la radiación lo conocemos por sus efectos sobre la materia.

La materia solo acusa cambios producidos por las radiaciones con las que se halla en "acuerdo o fase" o con concordancia. Esto es aplicable a los grupos de átomos y moléculas que conforman los cuerpos, sean sólidos, líquidos o gases. Esto también resulta cierto para los órganos receptores de radiaciones que poseen los seres vivos, es decir, las orejas y los ojos.

Es importante notar que la materia responde de una forma específica a un tipo de radiación y que no observa cambios cuando es sometida a otro tipo de radiación. Por ejemplo. El receptor de radar no responde a los impulsos luminosos, del mismo modo que una película fotográfica no es alterada por las emisiones de radio. Así pues, la radiación debe ser estudiada siempre en función de su interacción sobre la materia y las estructuras materiales.

La radiación por microondas es similar a la radiación térmica en que esta puede ser absorbida, transmitida o reflejada y en que causa el mismo efecto de calentamiento sobre la materia.

Las microondas son ondas de energía radiante, que difieren de otras radiaciones electromagnéticas, como las ondas de luz y las radioondas, sobre todo por su longitud de onda y frecuencia como es mostrado en la figura 1.1. Las microondas se encuentran entre las radioondas y las radiaciones infrarrojas con una longitud de onda entre unos 250 millones y 7500 millones de angstroms, lo que equivale a una longitud entre 2.5 y 75 cm. Las longitudes de las radioondas y de las radiaciones infrarrojas, en cambio, se miden en kilómetros y en milésimas de centímetro respectivamente. (1×10^6 unidades angstrom equivalen a 1 cm).

Debido a que la frecuencia de las microondas esta muy cerca de las radioondas, estas pueden obstaculizar los procesos de comunicación de manera que las frecuencias permitidas para las microondas son:

915 MHZ	+/-	25 MHZ
2450 MHZ	+/-	50 MHZ
5800 MHZ	+/-	75 MHZ
22125 MHZ	+/-	125 MHZ

De estas frecuencias las más comunmente usadas son 915 MHZ, 2450 MHZ.

En la tabla (1.1) se muestran las bandas del espectro de las radioondas y microondas, y se consideran radioondas- aquellas que tienen una frecuencia menor de 300 MHz y microondas aquellas que tienen una frecuencia superior a 300 MHz

Tabla 1.1 Espectro de bandas de microondas y radioondas.

Abreviación	Nombre	Límite de frecuencia por segundo
ELF ó VLF	Extrema baja frecuencia	10 - 30 Kilociclos.
LF	Baja frecuencia	30 - 300 Kilociclos.
MF	Media frecuencia	300 -3000 Kilociclos
HF	Alta frecuencia	3 - 30 Megaciclos.
VHF	Muy alta frecuencia	30 - 300 Megaciclos.
UHF	Ultra alta frecuencia	300 -3000 Megaciclos.
SHF	Super alta frecuencia	3 - 30 Gigaciclos.

Las longitudes de onda de la energía electromagnética estan relacionadas en forma inversa con la frecuencia (número de oscilaciones por unidad de tiempo) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1.14)$$

En la región de las micróondas esta se convierte en:

$$\lambda = \frac{300}{f} \quad (1.15)$$

Donde (f) esta en megaciclos, y para las dos frecuencias de interes en las microondas se tiene:

$$\lambda_1 = \frac{300}{915} = 0.328 \text{ m} = 12.9 \text{ Plg.}$$

$$\lambda_2 = \frac{300}{2450} = 0.122 \text{ m} = 4.82 \text{ Plg.}$$

Así pues la longitud de onda y la frecuencia de las microondas comunmente usadas para el calentamiento son:

λ (cm)	f (MHZ)
32	915
12.2	2450

1.2.2 Características de las microondas.

El calentamiento por convección tiene la limitación de que después de que el calor llega a la superficie de un

alimento, este necesita ser conducido de la superficie hacia el interior, el calentamiento por radiación infrarroja ocurre principalmente en la superficie de un alimento con lo que la penetración de calor esta limitada a cerca de 1 (mm) bajo la superficie. La conducción de calor de la superficie hacia el interior del alimento puede ser un proceso relativamente lento. La radiación de microondas, por otro lado, puede penetrar distancias considerables dentro del alimento con lo que se logra un calentamiento rápido y uniforme.

La tabla 1.2 presenta la profundidad de penetración en carne para la radiación por microondas y para la radiación térmica. Estos datos indican claramente que la profundidad de penetración de microondas es mucho mayor que la de la radiación térmica (infrarroja), también indican que en la región infrarroja, la penetración es mucho mayor en longitudes de ondas pequeñas, y para la región de microondas el fenómeno es inverso. Es decir, en longitudes de onda pequeñas ($\lambda = 12.2$ cm) (alta frecuencia 2450 MHz) la profundidad de Penetración es mucho menor que en longitudes de onda grandes ($\lambda = 32$ cm) (bajas frecuencias 915 - - MHz). Así mismo, puede observarse que a temperaturas bajas la profundidad de penetración de microondas aumenta para ambas frecuencias.

Tabla 1.2 Profundidad de penetración en carne.

Radiación de microondas		Temperatura (°C)	Profundidad de penetración . (m m)
Frecuencia (f) MHZ	Longitud de onda. (λ) cm		
2450	12.5	+ 20	9.8
		- 20	87.0
915	32	+ 20	18.5
		- 20	140.0
Radiación térmica (infrarroja).			
(f) MHZ	(λ)		
2.4×10^8	$1.25 \mu\text{m} (1.25 \times 10^{-4} \text{ cm})$	+ 20	1.25
$1.5 \times 10^8 - 7.5 \times 10^7$	$2-4 \mu\text{m} (2 \times 10^{-9} - 4 \times 10^{-4} \text{ cm})$	- 20	0.5

A continuación se presentan algunas características de las microondas que tienen que ser analizadas para el desarrollo de procesos de calentamiento por microondas.

a) Las microondas generan calor directamente en el interior del alimento. La transferencia de calor en la superficie y la conducción de calor interno no son involucradas excepto como efectos secundarios que modifican la distribución de temperatura.

b) Las microondas pueden generar un rápido ascenso en la temperatura.

c) Las microondas no pueden calentar alimentos enlatados o en envolturas de aluminio, debido a que el metal actúa como una barrera y refleja las microondas. Esta propiedad es utilizada para limitar y controlar las microondas en los equipos.

d) Las microondas pasan fácilmente a través de muchos materiales los cuales pueden ser usados para envolver alimentos. Por ejemplo polietileno, polipropileno, papel, vidrio, etc.

e) Cuando un alimento está siendo calentado por microondas la generación de calor es continua y hay un continuo ascenso en la temperatura. En contraste, en el calentamiento convencional, la temperatura del alimento no asciende arriba de la temperatura del medio de transferencia de calor.

f) Alimentos húmedos y secos pueden ser calentados por microondas, pero los alimentos húmedos son calentados más rá-

pidamente que los alimentos secos. Este efecto es notorio cuando alimentos húmedos y secos son calentados juntos. Otras diferencias en composición como grasas, sales, etc., pueden causar diferencias en la rapidez del calentamiento.

g) Calentamientos desiguales también se observan como resultado de la geometría del alimento. Se presentan comunmente fenómenos de sobrecalentamiento de bordes y esquinas de alimentos.

h) Uno de los procesos más difíciles es el deshielado debido a que el agua líquida absorbe más rápidamente las microondas que el hielo, con lo que puede ocurrir ebullición no deseada en las regiones que son deshieladas inicialmente.

1.2.3 Energía en ondas electromagnéticas.

Desde el punto de vista del calentamiento eléctrico, la propiedad más importante poseida por las ondas electromagnéticas es su energía; esto es, su equivalente térmico. Esta energía es transportada por las ondas del generador al material a ser calentado. Como en un circuito eléctrico la energía es medida en unidades de potencia eléctrica o en watts de acuerdo a la expresión:

$$P = E I$$

(1.16)

Donde (P) es la potencia en watts, (E) el voltaje e (I) la corriente en amperes. De acuerdo a la ley de Ohm el voltaje se puede expresar como:

$$E = IR \quad (1.17)$$

y la potencia puede ser escrita como:

$$P = I^2R \quad (1.18)$$

Donde (R) es la resistencia en Ohms, un aumento del término (I^2R) o pérdida ohmica significa una disipación de energía eléctrica en forma de calor. La energía en las ondas electromagnéticas varia con la frecuencia de acuerdo a la ecuación:

$$\text{Energía} = hf \quad (1.19)$$

Donde (h) es la constante de Planck igual a 6.625×10^{-27} -
Erg - Seg.

1.2.4 Tipos de calentamiento eléctrico.

Existen tres tipos de calentamiento eléctrico comun -
mente empleados: por inducción, dielectrico y por microon-

das.

El calentamiento por inducción opera como su nombre - lo indica por inducción de una corriente en un material a través de una bobina. Este tipo de calentamiento se utiliza principalmente en elementos de inmersión.

Por este medio pueden ser inducidas altas temperaturas rápidamente. El rango de frecuencia en el que opera es de 960 HZ a 1 MHZ. La potencia de salida puede ser del orden de miles de kilowatts dependiendo de la potencia de entrada.

El calentamiento dieléctrico, implica el calentamiento de un conductor eléctrico pobre o fuente térmica pobre. La forma de operación de este tipo de calentamiento se asemeja a la de un capacitor de placas en el cual las pérdidas de energía ocurren a través de las placas causando un efecto de calentamiento en el material que separa las placas.

En los capacitores , el material entre las placas puede ser papel, aire, mica, plástico y otras substancias. Los aisladores eléctricos son usados para este propósito pero en el calentamiento dieléctrico el material puesto entre

las placas puede ser un alimento, productos quimicos, etc. La potencia eléctrica así transferida a la carga como calor depende de la frecuencia y las propiedades dieléctricas del material. La frecuencia de operación usualmente esta en el rango de 1 - 150 MHz. El calentamiento por microondas es realizado dentro de un horno en el cual se generan microondas por medio de un dispositivo llamado magnetrón el cual convierte la energía eléctrica de baja frecuencia en energía electromagnética de alta frecuencia, - La potencia así generada es muy variable y puede llegar a ser hasta de 425 Kw.

1.2.5 Mecanismo del calentamiento por microondas.

La corriente eléctrica común invierte su dirección - 60 veces por segundo. Las microondas hacen lo mismo pero a frecuencias que corresponden a 915 ó 2450 megaciclos por segundo. El calentamiento por radiación de microondas esta basado en el principio que toda la materia, incluyendo los alimentos, esta constituido por átomos o moléculas electricamente cargados. Algunos materiales son ionizados y tienen una carga eléctrica, pero la mayoría de los átomos y moléculas son electricamente neutros. Sin embargo muchos materiales contienen moléculas que actuan como dipolos, es decir que tienen una carga positiva

y otra negativa en lados opuestos de la molécula también se dice que tales moléculas son polares. Las moléculas de agua las cuales se encuentran presentes en grandes cantidades en la mayoría de los alimentos son polares con la carga negativa cerca del átomo de oxígeno y la carga positiva cerca del átomo de hidrógeno.

Cuando las microondas penetran a los alimentos, las moléculas de agua y las moléculas polares tienden a alinearse con el campo eléctrico. Pero el campo eléctrico se invierte 915 ó 2450 millones de veces por segundo. Las moléculas que tratan de oscilar a estas frecuencias generan fricción intermolecular que provoca rápidamente el calentamiento del alimento. (Ver Fig. 1.8).

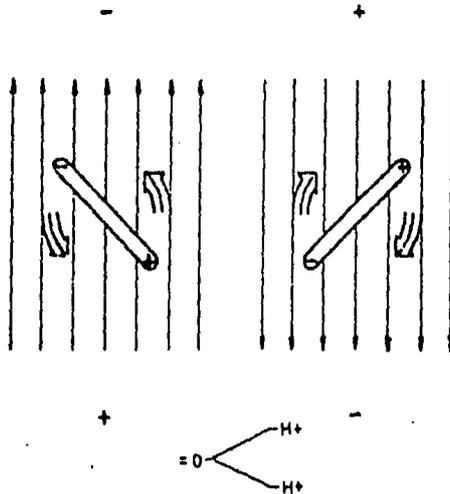


Fig. 1.8 Acción de moléculas polares en un campo de microondas

El mismo fenómeno ocurre con el calentamiento dieléctrico, que se parece al calentamiento por microondas salvo que emplea radiaciones en la escala de frecuencia entre 1 y 150 megaciclos por segundo. Aunque las microondas generan calor de este modo dentro del alimento, los componentes con diferentes propiedades dieléctricas no se calientan uniformemente. Sin embargo a medida que se genera calor, también se conduce entre los componentes del alimento, lo cual tiende a equilibrar su temperatura. En los alimentos líquidos, la convección contribuye a este fin. Pero estos efectos secundarios no deben confundirse con el mecanismo principal de la fricción intermolecular que ocurre dentro del alimento simultáneamente en los sitios de miles de millones de moléculas.

CAPITULO II

PROPIEDADES DIELECTRICAS, ECUACIONES BASICAS DE ABSORCION, PENETRACION Y TRANSFERENCIA DE CALOR DE MICROONDAS

- 2.1 Propiedades dielécticas básicas.
 - 2.1.1 La constante dieléctrica relativa y el factor de pérdida dieléctrica relativo.
 - 2.1.2 La tangente de pérdidas.
- 2.2 La ecuación de potencia.
- 2.3 La ecuación de penetración.
 - 2.3.1 Coeficiente de atenuación y evaluación.
- 2.4 La ecuación de profundidad a la mitad de potencia.
- 2.5 Transferencia de calor por microondas en una placa.
 - 2.5.1 Modelo para el calentamiento por microondas de una placa interna.
 - 2.5.2 Modelo para el calentamiento por microondas de una placa externa.
 - 2.5.3 Ejemplo de calculo.
 - 2.5.4 Generalización de los modelos para placas internas y externas.

2.1 Propiedades dieléctricas básicas.

2.1.1 La constante dieléctrica relativa y el factor de pérdida dieléctrica relativo.

Las propiedades dieléctricas de interés básico en el procesamiento de microondas son la constante dieléctrica relativa (K' ó ϵ'_r) y el factor de pérdida dieléctrica relativo (K'' ó ϵ''_r). Estas propiedades respectivamente reflejan la habilidad de un material para almacenar y disipar energía eléctrica. En este sentido los alimentos son pobres - aisladores debido a que absorben una significativa fracción de la energía de un campo de microondas. La absorción es instantánea y causa calentamiento interno del producto.

Para definir y entender estos términos, tomaremos como base la discusión de un material dieléctrico en un capacitor. Un capacitor es un dispositivo que consta de dos conductores o placas cercanos, que tienen cargas de la misma magnitud y signo contrario, y que puede utilizarse - para almacenar carga eléctrica, para generar oscilaciones electromagnéticas, etc. La capacitancia (C) de un capacitor se define mediante la ecuación:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{\text{Coul.}}{\text{Volt}} = \text{Farads.} \quad (2.1)$$

Donde (q) es la magnitud de la carga en cualquiera de las placas y (V) es la diferencia de potencial entre las placas. La capacitancia de un capacitor depende de la forma geométrica de cada placa, de la relación espacial entre ellas y del medio en el cual están sumergidas.

Experimentalmente Faraday encontró que para un capacitor que contiene un dieléctrico entre sus placas la capacitancia es mayor que para un condensador sin dieléctrico para la misma diferencia de potencial (V). El aumento de la capacitancia es dado por :

$$C = C_0 \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} = C_0 K' \quad (2.2)$$

Donde (C) es la capacitancia con el dieléctrico, (C_0) es la capacitancia sin el dieléctrico, (ϵ') y (ϵ_0) son las constantes dieléctricas del dieléctrico y del vacío respectivamente. Así pues la constante dieléctrica relativa (K') es definida como la relación de capacitancias con y sin dieléctrico o la relación de la constante dieléctrica del producto y la constante dieléctrica del vacío ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ Farad. m^{-1}) mediante la ecuación:

$$K' = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

La razón por la que un material dieléctrico permite un incremento en la capacitancia es encontrada en su polarización, con la polarización, los dipolos orientan sus cargas positivas cerca de la placa negativa del condensador, así la acumulación de dipolos y sus momentos inducidos por el campo, determinan la constante dieléctrica.

El comportamiento de la constante dieléctrica relativa con los cambios de frecuencia sucede como sigue:

- ° Bajo corriente directa o comportamiento de baja frecuencia se tiene una constante dieléctrica relativa alta.
- ° En frecuencias intermedias aproximadamente las de microondas, ocurre una orientación parcial, dando valores intermedios de la constante dieléctrica relativa.
- ° En muy altas frecuencias, la polarización tiende a desaparecer y la constante dieléctrica relativa es muy pequeña.
- ° Generalmente se incrementa con el contenido de humedad.
- ° A temperaturas menores de 0°C presenta valores pequeños.
- ° A temperaturas proximas y bajo 0°C se incrementa subitamente.
- ° A temperaturas superiores a 0°C decrece ligeramente.

El factor de pérdida dieléctrica relativo (K'') es una propiedad de los alimentos que indica la energía de microondas pérdida al atravesar o al ser completamente absorbida por varios materiales bajo condiciones determinadas. El

factor de pérdida relativo es también una medida del grado de penetración de las microondas a los materiales.

Puesto que las microondas pierden energía en forma de calor a medida que penetran en los materiales, cuanto mayor sea el factor de pérdida y cuanto mayor la cantidad de calor que se produce, más corta será la distancia que penetrarán las microondas antes de que se consuma toda su energía.

A continuación se suman los factores que afectan el factor de pérdida dieléctrica relativo:

- ° Es menor para hielo que para agua. Generalmente alcanza su valor máximo en temperaturas cercanas a 0°C.
- ° Se incrementa cuando se incrementa el contenido de agua y sales en el alimento.
- ° Decrece cuando se incrementa el contenido de grasa.
- ° Es mayor para carnes crudas que para carnes cocidas.
- ° Para productos de carne se incrementa cuando la frecuencia decrece.
- ° Es afectado por la temperatura; las pérdidas dieléctricas del dipolo (K''_{dipolo}) decrecen con un incremento en la temperatura mientras que (K''_{ionica}) se incrementa con un incremento en la temperatura.

El factor total de pérdidas dieléctricas es dado por

la siguiente ecuación:

$$K'' = K''_{\text{dipolo}} + K''_{\text{ionica}} = K' (\tan\delta) \quad (2.4)$$

K''_{dipolo} es el factor de pérdida debido al dipolo de las moléculas.

K''_{ionica} es el factor de pérdida debido a moléculas ionicas.

2.1.2 La tangente de pérdidas.

La tangente de pérdidas ó factor de disipación ($\tan\delta$) al igual que el factor de pérdida dieléctrica es un parámetro que define la cantidad de energía pérdida por un campo de microondas al penetrar un alimento y es dado por la ecuación:

$$\tan\delta = \frac{K''}{K'} = \frac{\text{factor de pérdida}}{\text{constante dieléctrica}} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.5)$$

Regresando a la analogía del capacitor, cuando ocurre la polarización, habrá dos corrientes involucradas. La carga o corriente capacitiva esta 90° fuera de fase con el voltaje aplicado (la corriente adelanta en fase al voltaje en un circuito capacitivo) y el otro componente de la corriente

esta en fase con el potencial y representa una pérdida -
ohmica. Estas son medidas de la absorción y son considera-
das para la transferencia de energía del campo al material
manifestándose como calor. Pueden ser representados dos -
vectores según SMYTH y VON HIPPEL, donde la corriente -
total esta expresada por el vector suma, de la corriente
de carga y la corriente de pérdida (ver fig. 2.1). Hay
dos ángulos involucrados (θ) que es el ángulo del factor
de potencia (El factor de potencia es el coseno del ángulo
de la fase entre la corriente y el voltaje cuando éstos -
son senusoidales) y (δ) es el ángulo entre los vectores
de la corriente total y la corriente de carga. El ángulo
(δ) es el ángulo de pérdida y su tangente es de especial
interés en el calentamiento por microondas.

$$\tan\delta = \frac{\text{corriente pérdida}}{\text{corriente cargada}} \quad (2.6)$$

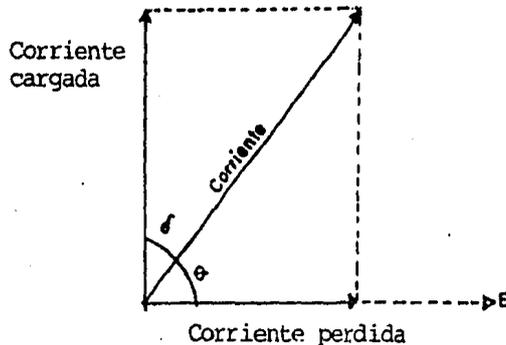


Fig.2.1 Modelo de condensador para la absorción de la polarización

Las propiedades dieléctricas están relacionadas con la composición química y la estructura física y es sabido que varían con la frecuencia y la temperatura.

En el apendice I se encuentran reportadas estas propiedades para diversos alimentos.

2.2 La ecuación de potencia.

La energía absorbida por un dieléctrico en un campo de microondas es dada por la ecuación:

$$P = (55.61 \times 10^{-14}) (E^2) (K'') (f) \quad (2.7)$$

Donde P es la potencia absorbida (Watts/cm³).

E es el gradiente de voltaje (o diferencia de potencial) (Volts/cm).

K'' es el factor total de pérdidas dieléctricas (adimensional).

f es la frecuencia (ciclos/seg. ó Hertz).

El análisis de esta ecuación presenta que un incremento de cualquiera de los parámetros, incrementará la potencia absorbida. Existen limitaciones para el incremento de cada término en la práctica. Un incremento en el gra-

diente de voltaje (E) tiene que ser limitado porque si éste alcanza un valor suficientemente alto se producirá una descarga en el aire. Un incremento en la frecuencia de las microondas (f) incrementará la potencia absorbida. El factor total de pérdida dieléctrica (K") es una propiedad de los alimentos y los factores que lo afectan ya han sido mencionados anteriormente. En adición a las propiedades dieléctricas de los alimentos, otras propiedades físicas pueden ser importantes en relación a las temperaturas obtenidas durante el calentamiento. En particular el calor específico y la densidad son importantes. Si un alimento tiene un bajo calor específico, alcanzará una temperatura más alta que un alimento con alto calor específico, para la misma cantidad de energía de microondas absorbida.

2.3 La ecuación de penetración.

Cuando una microonda incide sobre la superficie de un alimento una porción de la radiación es reflejada, pero el resto de la radiación es absorbida por el alimento.

Esta absorción causa la disminución de la potencia desde la superficie del alimento al interior (la onda es atenuada) de acuerdo a la ecuación:

$$P_x = P_o \exp (-2\alpha x) \quad (2.8)$$

Donde P_o es la potencia incidente (Watts/m²).

P_x es la potencia absorbida a una profundidad (x) de la superficie (Watts/m²).

α es el coeficiente de atenuación. (1/m).

La ecuación de penetración de microondas es equivalente a la ecuación de BOUGER-LAMBERT para radiación térmica presentada en el CAPITULO I.

La absorción de energía de campos de microondas es influenciada por un número de factores generalmente relacionados a las propiedades dieléctricas, tamaño y geometría del producto, y a las características de operación del equipo de procesamiento.

2.3.1 Coeficiente de atenuación y su evaluación.

La atenuación producida por un dieléctrico es frecuentemente expresada como la distancia de atenuación ($1/\alpha$) que otros autores han preferido llamar profundidad de penetración (Z) y que es definida como la distancia en la cual la fracción $1/e = 0.368$ de la potencia incidente no es atenuada; o bien, como la distancia a través de la

cual la intensidad del campo decae 1/e de su valor original.

Para definir este parametro VON HIPPEL plantea tres casos límites proporcionando para cada uno de ellos una ecuación y un nomograma.

Caso 1. Dieléctricos con bajas pérdidas $\tan\delta \ll 1$

$$z = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda_0}{\pi \tan\delta \sqrt{K''}} \quad (m) \quad (2.9)$$

Donde (α) esta en (1/m) y (λ_0) la longitud de onda del campo en el espacio libre en (m). Esta ecuación es aplicable para $\tan\delta = 0.0001$ a 0.05 .

Caso 2. Dieléctricos con pérdidas intermedias. $\tan\delta$ es comparable a 1.

$$z = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda}{2\pi} \left[\frac{2}{K' (\sqrt{1 + \tan^2\delta} - 1)} \right]^{1/2} \quad (m) \quad (2.10)$$

Esta ecuación es aplicable en el rango $0.005 \leq \tan\delta \leq 50$ y debido a que la mayoría de los alimentos caen dentro de este rango esta ecuación es la más empleada para su estudio.

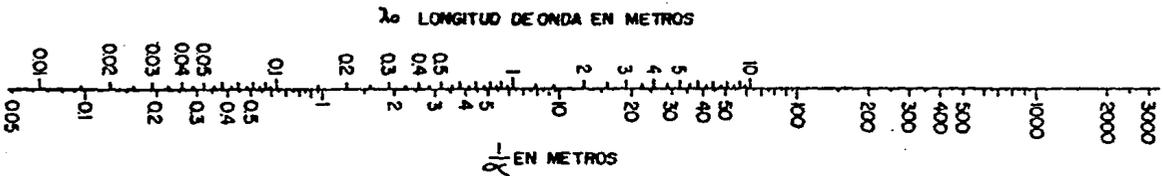
Caso 3. Dieléctrico con altas pérdidas. $\tan\delta \gg 1$

$$z = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda_0}{2} \sqrt{\frac{2}{K' \tan\delta}} \quad (m) \quad (2.11)$$

Esta ecuación es aplicable en el rango de $50 \leq \tan\delta \leq 100$.

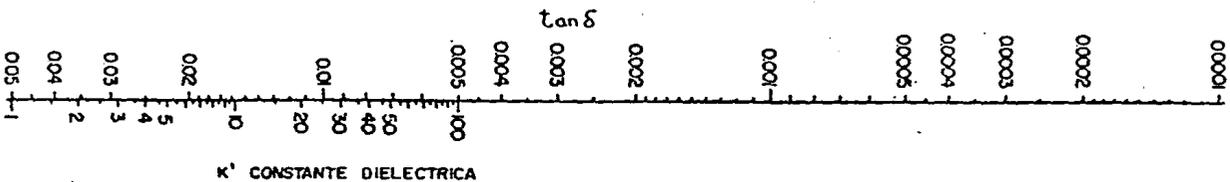
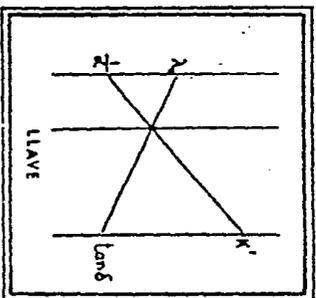
A continuación son presentados los nomogramas para los tres casos con los cuales es posible evaluar rápidamente el coeficiente de atenuación ó profundidad de penetración.

A la frecuencia de microondas de interés comercial común, la profundidad de penetración a 915 MHz es más del doble que en 2450 MHz para productos de similar constante dieléctrica y tangente de pérdida. En la tabla 2.1 se presentan aproximadamente profundidades de penetración en un alimento semisólido (papas) con alto, intermedio y bajo contenido de humedad.

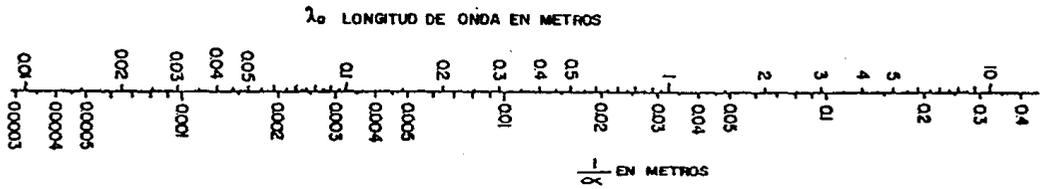


EQUACION

$$\frac{1}{R} = \frac{\lambda_0}{\pi \tan \delta \sqrt{K'}} \quad 0.0001 \leq \tan \delta \leq 0.05$$



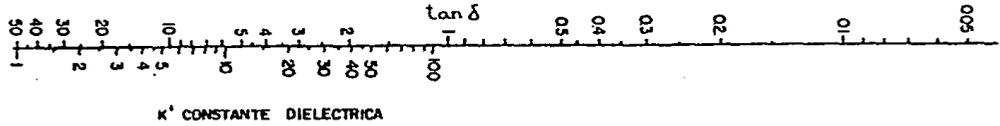
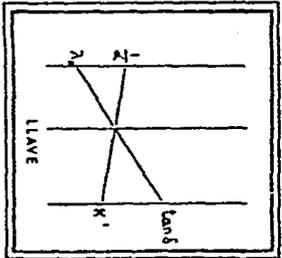
NOMOGRAMA 2.1 COEFICIENTE DE ATENUACION $1/R$ PARA DIELECTRICOS CON BARRAS PERDIDAS



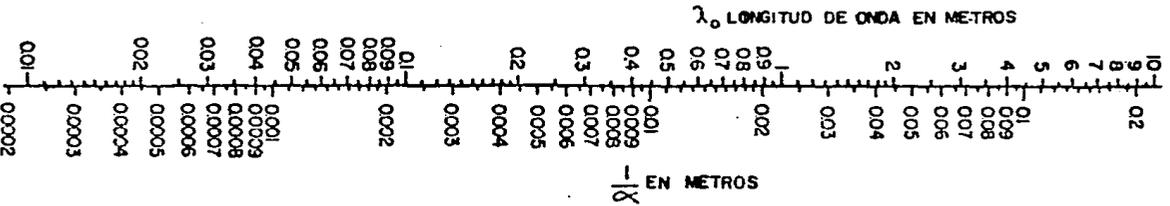
ECUACION

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda_0}{2\pi} \left[\frac{2}{K'(\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)} \right]^{1/2}$$

$0.05 \leq \tan \delta \leq 30$



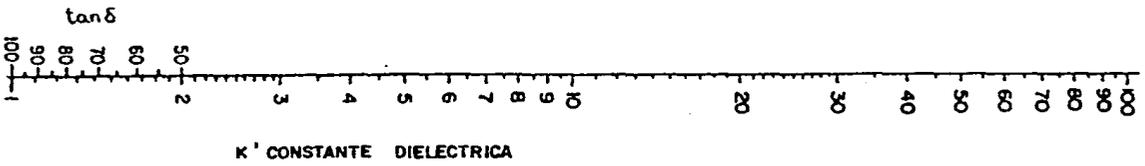
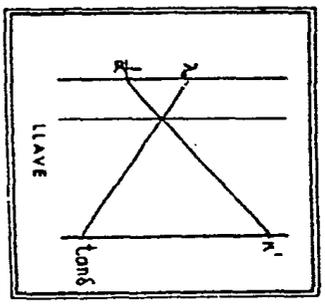
NOMOGRAMA 2.2 COEFICIENTE DE ATENUACION $1/\alpha$ PARA
DIELECTRICOS CON PERDIDAS INTERMEDIAS



ECUACION

$$\alpha = \frac{\lambda_0}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{k' \tan \delta}}$$

$50 \leq \tan \delta \leq 100$



NOMOGRAMA 2.3 COEFICIENTE DE ATENUACION $1/\lambda$ PARA
 DIELECTRICOS CON LIZAS PERDIDAS

Tabla 2.1 Profundidad de penetración aproximada en papas a 25° c
para alto, intermedio y bajo contenido de humedad.

CONTENIDO DE HUMEDAD	K'	tan δ	PROFUNDIDAD DE PENETRA- CION (cm)	
			915 MHz ($\lambda=0.320m$)	2450 MHz ($\lambda=0.122m$)
ALTO	60	0.3	4.2	1.7
INTERMEDIO	10	0.2	10.7	3.0
BAJO	4	0.1	30.2	12.3

Se ha observado que la profundidad de penetración -
aumenta cuando el contenido de humedad del alimento dismi-
nuye y cuando la frecuencia de procesado disminuye. Los
valores de la tabla 2.1 sugieren que los perfiles de -
temperatura deseables ocurren en procesamientos largos pa-
ra productos de alto ccntenido de humedad a 2450 MHz. Es
por esto deseable limitar el tamaño de los productos a ni-
veles consistentes con su profundidad de penetración en el
procesamiento a esta frecuencia. Esta limitación es mucho
menos severa para productos con intermedia y baja humedad
a frecuencias de 915 MHz.

El calentamiento por microondas tiende a ser llamado

calentamiento de volumen para distinguirlo de otros métodos de calentamiento, los cuales calientan superficies. Sin embargo, sea ó no el calentamiento de un volumen dado de substancia, efectivamente será independiente de la conducción térmica y dependiente de la penetración de la energía de microondas.

La penetración será infinita en substancias perfectamente transparentes (vidrio, cerámica, etc.) cero en materiales reflectivos tales como metales, y para materiales absorbentes, tales como alimentos la profundidad tendrá un valor finito que puede ser evaluado con las ecuaciones o nomogramas anteriores.

Pueden hacerse algunas generalizaciones: cerca del 100% de las microondas que chocan sobre un alimento será absorbidas en frecuencia entre 1,000 y 3,000 MHz.

A frecuencias menores de 400 MHz, un cuerpo grande absorberá cerca de la mitad de la potencia incidente ó menos como una consecuencia de las pérdidas por transmisión, y arriba de 3,000 MHz se absorberá cerca de la mitad de la potencia incidente.

2.4 La ecuación de profundidad a la mitad de potencia HPD

La penetración de microondas es también usualmente - descrita por la profundidad a la mitad de potencia HPD - (Half Power Depth) ó el espesor de un alimento en el cual se reduce la potencia en la superficie (P_0) a la mitad - ($P_0/2$). Esto puede ser calculado de la siguiente ecuación:

$$HPD = \frac{1}{\sqrt{K'' \tan \delta}} (f) \quad (m) \quad (2.12)$$

Así la profundidad a la mitad de potencia es inversamente proporcional a la frecuencia mientras que la ecuación de potencia (2.7) presenta que la potencia absorbida (P) es directamente proporcional a la frecuencia.

2.5 Transferencia de calor en el calentamiento por microondas de una placa.

2.5.1 Modelo para el calentamiento por microondas de una placa interna.

Desde el punto de vista físico el calentamiento por - microondas es una combinación de un mínimo de cuatro diferentes procesos:

- ° Distribución de energía.
- ° Absorción de energía.
- ° Transferencia de calor.
- ° Transferencia de masa.

Los dos primeros puntos han sido descritos anteriormente con las ecuaciones de absorción y penetración de microondas. Para la transferencia de calor se presentará un modelo que desprecia los efectos de la transferencia de masa (como por ejemplo: la evaporación que resulta durante el proceso de calentamiento).

El calentamiento por microondas es un buen ejemplo en el cual se llevan a cabo los tres tipos de procesos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) simultáneamente.

Como una ayuda para el entendimiento de la energía de microondas y sus relaciones con otros mecanismos de transferencia de calor, se presentará una técnica para el cálculo de los efectos de estado inestable de transferencia de calor. Este utiliza un método numérico para la resolución de las ecuaciones diferenciales, las cuales describen la transferencia de calor. El método usado divide el interior del material en un número de delgadas capas; el

tiempo de calentamiento es dividido de una manera similar en intervalos de tiempo. El método es muy similar al método de SCHMIDT. La exactitud de los cálculos depende del uso de valores muy pequeños para el espesor de las placas y lo largo de los intervalos de tiempo. Por ello un gran tiempo es requerido para los cálculos manuales y es normal que se utilice una computadora para la solución.

A continuación se presentarán los pasos involucrados en estos cálculos para un simple caso en el cual se considera la transferencia de calor en una sola dirección (unidimensional) en una placa de material con radiación de microondas incidentes sobre una sola superficie.

Los perfiles tiempo-temperatura dentro del producto son causados por:

- a).- Generación de calor interno debido a la absorción de energía eléctrica del campo de microondas.
- b).- Al calor transferido por conducción y evaporación.

Así las propiedades dieléctricas, las cuales influyen la relación de absorción de energía y distribución de energía dentro del producto son de considerable importancia en el diseño y eficiencia de procesos de microondas en alimentos.

Aunque una derivación teórica de las ecuaciones es compleja, un simple entendimiento puede ser obtenido por inspección en los balances de calor para una de las placas. Como lo elabora el método de SCHMIDT una placa interna del material y la superficie de una placa puede ser examinada. Una placa interna es ilustrada en la figura 2.2

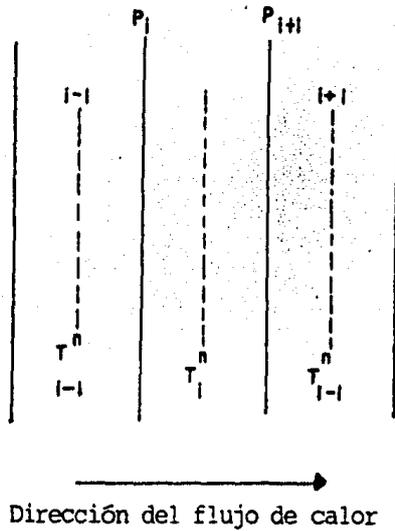
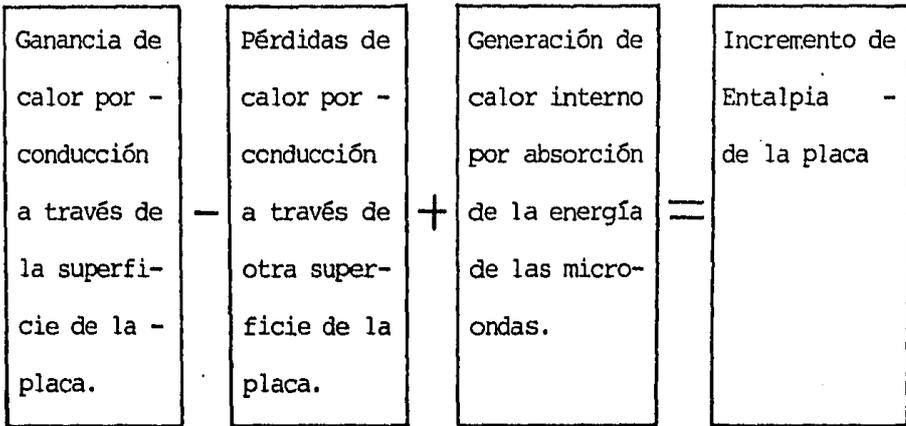


Fig2.2 Calentamiento por microondas en una placa interna.

El balance de calor para una placa sobre un incremento de tiempo es :



Esto puede ser expresado en términos matemáticos como:

$$\frac{kA}{\Delta x} (T_{i-1}^n - T_i^n) - \frac{kA}{\Delta x} (T_i^n - T_{i+1}^n) + q_1 A = \frac{A \Delta x C_p \rho}{\Delta t} (T_i^{n+1} - T_i^n) \quad (2.13)$$

calor ganado	calor perdido	calor	incremento de
(W)	(W)	generado	Entalpia (W)
		(W)	

Donde: k Es la conductividad térmica del alimento (W/m°K)

Δx Es el espesor de la placa (m)

A Es el área a través de la cual el calor fluye (m²)

- C_p Es el calor específico del alimento (J/Kg °K)
 ρ Es la densidad del alimento (Kg/m³)
 Δt Es el intervalo de tiempo (Seg)
 T Es la temperatura (°K)
 n Es el número de intervalo de tiempo menos uno
(no es un exponente)
 q_i Es la relación del calor absorbido por unidad
de área de la placa de la radiación de micro-
ondas (W/m²)

Si la radiación de microondas en la superficie de la (IESIMA) placa es (P_i) y en la parte de atrás (la cual es la superficie de la placa $i+1$) es (P_{i+1}), la relación entre las dos de acuerdo a la ecuación (2.8) es :

$$P_{i+1} = P_i \exp (-2\alpha \Delta x) \quad (2.14)$$

y

$$q_i = P_i - P_{i+1} \quad (2.15)$$

El balance de calor de la ecuación (2.13) puede multiplicarse por ($\Delta x/kA$) simplificándose a :

$$T_{i-1}^n - T_i^n - T_i^n + T_{i+1}^n + q_i \frac{\Delta x}{k} = \frac{\Delta x^2 C_p \rho}{\Delta t k} (T_i^{n+1} - T_i^n) \quad (2.16)$$

El término $(\Delta t k / \Delta x^2 C_p \rho)$ es el número de Fourier, (F_0) y la ecuación puede ser escrita como:

$$T_i^{n+1} - T_i^n = F_0 (T_{i-1}^n + T_{i+1}^n - 2T_i^n - q_i \frac{\Delta x}{k}) \quad (2.17)$$

Si el número de Fourier es fijado a la mitad eligiendo valores adecuados para (Δx) y (Δt) , la ecuación se simplifica a :

$$T_i^{n+1} = \frac{1}{2} (T_{i-1}^n + T_{i+1}^n + q_i \frac{\Delta x}{k}) \quad (2.18)$$

Esta ecuación puede ser expresada en palabras como :

" La temperatura en un incremento de placa al final de un incremento de tiempo es igual a un medio de la suma de las temperaturas de las dos placas adyacentes al final de un incremento de tiempo junto con el calor generado internamente "

En el caso de conducción excluyendo el calentamiento de microondas, la expresión que involucra (q_i) es suprimida y la ecuación se reduce a la ecuación de conducción

empleada por el método de Schmidt, donde la temperatura en un punto es el promedio de los dos puntos adyacentes en un incremento de tiempo.

2.5.2 Modelo para el calentamiento por microondas de una placa externa.

En la figura 2.3 se muestra la superficie de una placa. En este caso el balance de calor es analizado desde el exterior de la placa y el camino es exactamente el mismo excepto en que el calor ganado a través del lado izquierdo de la placa es por convección y no por conducción

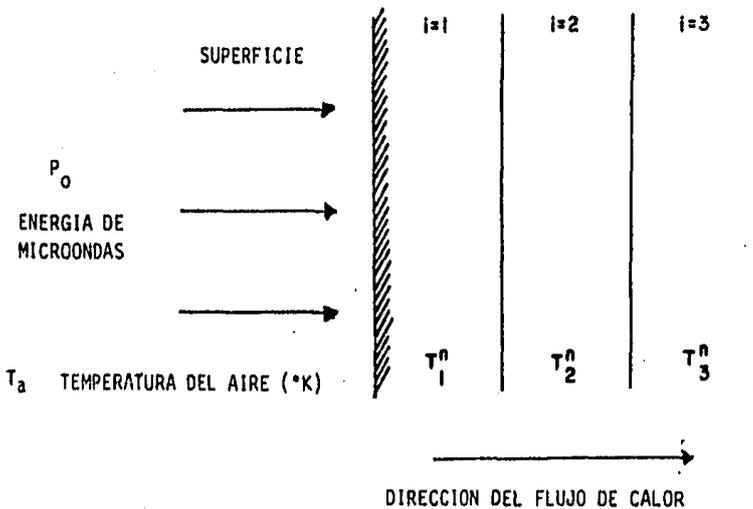


Fig.2.3 Calentamiento por microondas en la superficie de una placa.

El balance de calor para la superficie de la placa - sobre un incremento de tiempo es :

$$hA (T_a - T_1^n) - \frac{kA}{\Delta x} (T_1^n - T_2^n) + q_1 A = \frac{A \Delta x C_p \rho}{\Delta t} (T_1^{n+1} - T_1^n) \quad (2.19)$$

relación de calor ganado por con- vección (W)	relación de calor pérdido (W)	relación de calor generado (W)	relación de incremento de Entalpia (W)
--	--	---	---

Donde : (h) Es el coeficiente de convección en la superficie $(W/m^2 \text{ } ^\circ K)$.

Para el caso de la superficie de la placa, la radiación de microondas en la superficie del lado izquierdo es igual a la potencia en la superficie (P_0). De aquí :

$$q_1 = P_0 - P_2 \quad (2.20)$$

y

$$P_2 = P_0 \exp (-2\alpha \Delta x) \quad (2.21)$$

La ecuación de balance de calor para la superficie de la placa puede ser simplificada por el mismo camino que -

para el caso de la placa interior antes presentado, obteniéndose la siguiente ecuación :

$$T_1^{n+1} = \frac{1}{2} \left[\frac{h\Delta x}{k} (T_a - T_1^n) + q_1 \frac{\Delta x}{k} + T_1^n + T_2^n \right] \quad (2.22)$$

Un analisis hecho para la ecuación (2.18) como para la ecuación (2.22) permite ver que el término significativo de las ecuaciones es el referido a la generación de calor interno por absorción de la energía de microondas, - lo que confirma que el principal mecanismo de calentamiento es debido a las microondas y que la conducción y convección son secundarias. Así mismo es posible hacer cálculos aproximados considerando unicamente este término y las - temperaturas involucradas, siempre y cuando el alimento - presente poca variación del coeficiente de atenuación (α) con la temperatura, debido a que (q) esta en función de - (α).

2.5.3 Ejemplo de cálculo

A continuación se ilustra el método de cálculo.

Una placa de alimento, de 40 mm. de espesor originalmente a una temperatura de 0°C, es calentada en un horno de microondas, con la energía de microondas incidente so-

lo sobre su superficie, durante tres minutos. La potencia de las microondas es 100 kW/m^2 y la temperatura del aire en el horno es de 20°C . Las propiedades físicas del alimento son:

Densidad	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
Calor específico	$C_p = 4200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
Conductividad térmica	$k = 1.07 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
Coefficiente de convección en la superficie	$h = 5 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$
Coefficiente de atenuación de microondas	$\alpha = 35 \text{ m}^{-1}$

Si el alimento es dividido en 8 placas de $x=0.005 \text{ m}$ - y si F_0 es $1/2$, entonces el valor de Δt es fijado substituyendo los datos en :

$$F_0 = \frac{\Delta t \cdot k}{\Delta x^2 \cdot C_p \cdot \rho} = 0.5$$

Despejando Δt

$$\Delta t = \frac{0.5 \cdot \Delta x^2 \cdot C_p \cdot \rho}{k}$$

Sustituyendo valores se tiene que $\Delta t=49.06 \text{ seg}$.

Con este (Δt) se realizarán los cálculos para tres - intervalos de tiempo que nos darán aproximadamente los --

tres minutos de la aplicación de las microondas. El primer paso en los cálculos es asignar una columna para cada una de las placas, siendo representada la superficie por la columna de la izquierda y la superficie interna por la columna de la derecha: como se ve en la Fig. 2.3 inicialmente cada una de estas placas esta a una temperatura de 0°C . El siguiente paso en los cálculos es evaluar (q_i) para cada una de las placas para el primer incremento de tiempo.

Superficie externa (placa 1) de la ecuación (2.8) se tiene:

$$P_2 = P_0 \exp(-2\kappa \Delta x) = (100,000 \text{ W/m}^2) \exp \left[-2 (35\text{m}^{-1}) (0.005\text{m}) \right]$$

$$P_2 = 70,468 \text{ W/m}^2$$

Entonces el calor absorbido de las microondas en la placa 1 es:

$$q_1 = P_0 - P_2 = 100,000 - 70,468 = 29,532$$

$$q_1 = 29,523 \text{ W/m}^2$$

Para la placa # 2

$$P_2 = 70,468 \text{ W/m}^2$$

$$P_3 = P_2 \exp(-2\alpha \Delta x) = 70,468 \exp\left[-2(35\text{m}^{-1})(0.005\text{m})\right]$$

$$P_3 = 49,657 \text{ W/m}^2$$

$$q_2 = P_2 - P_3 = 70,468 - 49,657 = 20,811$$

$$q_2 = 20,811 \cdot \text{W/m}^2$$

Estos cálculos se repiten para las placas restantes. Los valores de (P_i) son reportados en la tabla 2.2.

El cambio de temperatura en la superficie de la placa # 1 al final del primer intervalo de tiempo es calculado usando la ecuación (2.22) esto es:

$$T_1^1 = \frac{1}{2} \left[\frac{(5)(0.005)}{1.07} (20-0) + \frac{(29523)(0.005)}{1.07} + 0 + 0 \right] = 69.2^\circ\text{C}$$

Es importante notar que el valor de ('n') para el primer intervalo de tiempo es el número de intervalo de tiempo que se esta evaluando que en este caso es 1 menos 1.

Con lo cual $n=0$. Así para el segundo intervalo de tiempo $n = 2-1 = 1$, y así sucesivamente.

La ecuación (2.18) es usada similarmente para evaluar las placas internas. Los resultados son presentados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Resultados de los cálculos del ejemplo numérico

	1	2	3	4	5	6	7	8
NUMERO DE PLACA	SOBRE LA SUPERFICIE							BAJO LA SUPERFICIE
TEMP. INICIAL	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_1 (P_0=100,000)$	70468	49657	34992	24659	17376	12245	8629	6080
	29532	20811	14665	10333	7283	5131	3616	2536
$T_1^1 q_1$ (1er. periodo de tiempo)	69.2	48.6	34.3	24.1	17.0	12.0	8.4	6.2
$P_1 (P_0=100,000)$	70468	49657	34992	24659	17376	12245	8629	6080
	29532	20811	14665	10333	7283	5131	3616	2536
$T_1^2 q_1$ (2° periodo de tiempo)	127.3	100.4	70.6	49.8	35.0	24.7	17.5	13.4
$P_1 (P_0=100,000)$	70468	49657	34992	24659	17376	12245	8629	6080
	29532	20811	14665	10333	7283	5131	3616	2536
$T_1^3 q_1$ (3° periodo de tiempo)	181.6	147.5	109.4	76.9	54.3	38.3	27.5	21.5

2.5.4 Generalización de los modelos para placas internas y externas.

En general podemos escribir las ecuaciones para evaluar la temperatura en una placa de la siguiente forma:

Temperatura en la primera placa (en cima de la superficie) al final del intervalo de tiempo. Ec. (2.22)

$$\begin{aligned} & \frac{h\Delta x}{k} \left(\text{Temperatura del aire - temperatura de la misma placa al final del período de tiempo anterior.} \right) \\ & + \frac{\Delta x}{k} \left(\text{Calor generado en la placa durante este intervalo de tiempo, } q_i \right) \\ & + \text{Temperatura de la misma placa al final del período de tiempo anterior.} \\ & + \text{Temperatura de la placa adyacente al lado derecho al final del período de tiempo anterior.} \end{aligned}$$

Temperatura en una placa interna al final de un intervalo de tiempo. Ec. (2.18)

$$\begin{aligned} & \text{Temperatura de la placa adyacente del lado izquierdo al final del período anterior.} \\ & + \text{Temperatura de la placa adyacente del lado derecho al final del período de tiempo anterior.} \\ & + \frac{\Delta x}{k} \left(\text{calor generado en la placa durante este intervalo de tiempo, } q_i \right) \end{aligned}$$

Los cálculos que son presentados en la tabla 2.2 no pueden dar resultados exactos por algunas razones. Primero la exactitud depende de la elección de valores pequeños para Δx y Δt ; en este caso los valores escogidos no fueron

pequeños. Además, en la práctica, los alimentos contienen altos porcentajes de agua y la temperatura no subiría arriba de 100°C hasta que el secado de la superficie tenga lugar. Por último las propiedades físicas son dependientes de la temperatura. En particular (q) es muy sensible a cambios en la temperatura, como se presenta en la Tabla 2.3

Tabla 2.3 Coeficientes de atenuación para agua a diferentes temperaturas.

Temp. (°c)	α (Agua) (m^{-1})
0	62.4
20	35.2
40	20.9
60	14.2
80	9.5
100	7.3

En orden de obtener resultados más exactos, es necesario hacer cálculos más laboriosos usando valores mucho más pequeños de (Δx) y (Δt), para ello es recomendable utilizar una computadora.

CAPITULO III

HORNOS DE MICROONDAS Y DISEÑO

- 3.1 El horno de microondas.
 - 3.1.1 Componentes principales de un horno de microondas.
 - 3.1.1.1 Descripción y funcionamiento del magnetrón.
- 3.2 Diferentes tipos de hornos de microondas.
 - 3.2.1 El horno Batch.
 - 3.2.2 Horno continuo con radiadores parabólicos.
 - 3.2.3 Horno continuo con cinco magnetrones.
 - 3.2.4 Horno continuo con un solo magnetrón de gran potencia.
 - 3.2.5 Horno continuo con guía ondas de laberinto.
- 3.3 Consideraciones de diseño para un horno de microondas
 - 3.3.1 Diseño de la capacidad del magnetrón y evaluación del tiempo de procesado.
 - 3.3.2 Dimensionamiento de la cavidad de un horno de microondas.
 - 3.3.2.1 Modos en el interior de la cavidad de un horno.
 - 3.3.2.2 Cálculo de los modos y dimensiones de la cavidad.

3.1 El horno de microondas.

3.1.1 Componentes principales de un horno de microondas.

Un horno de microondas está constituido de siete componentes principales:

- 1) El abastecedor de energía, conformado por un transformador que convierte la energía eléctrica de 240 v. - - 60 Hz de corriente alterna a 4 Kv (A.C.) la que a su vez es rectificadada a 4 Kv. de corriente directa; y - que es la energía requerida por el magnetrón para hornos pequeños.
- 2) El magnetrón el cual es un oscilador que convierte la energía de baja frecuencia (60 Hz) a energía de alta frecuencia que generalmente puede estar entre 915 MHz y 2450 MHz.
- 3) El guía ondas, el cual permite la transferencia de - - energía del magnetrón al horno.
- 4) La cavidad del horno constituida por paredes metálicas donde la energía es reflejada y distribuida a los alimentos que ahí se encuentran.
- 5) Un ventilador, cuya función es mantener frío el magnetrón.
- 6) Un agitador de campo el cual es un dispositivo que se encuentra dentro de la cavidad y es semejante a un ventil

lador. Esta hecho de metal y su función es aumentar - la homogeneidad en la distribución de las ondas dentro de la cavidad.

7) Controles de seguridad y operación del horno.

La figura 3.1 muestra en términos generales las partes de un horno de microondas batch.

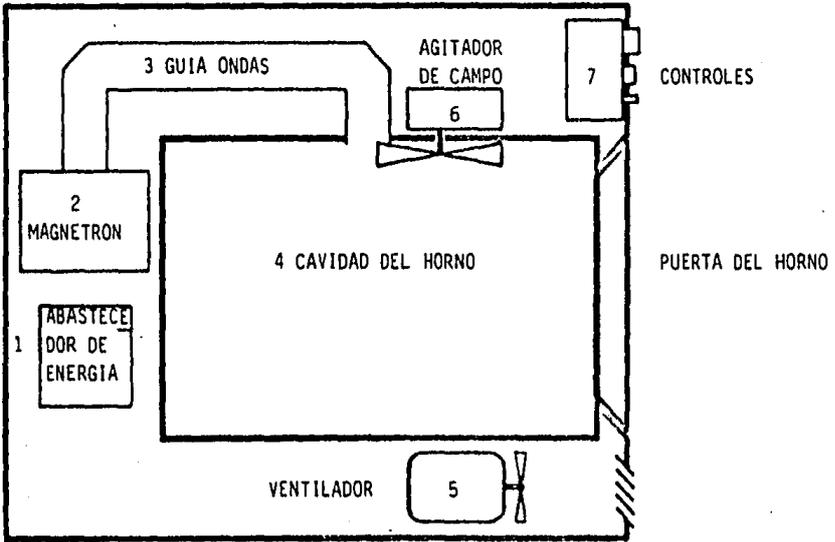


Fig. 3.1 Partes esenciales de un horno batch de microondas.

3.1.1.1 Descripción y funcionamiento del magnetrón.

El magnetrón puede imaginarse como un bloque de latón cilíndrico, de unos 6 cm de diámetro y unos 4 cm de espesor con un agujero grande en el centro y ocho, ó más agujeros pequeños entre el centro y el borde exterior. (ver figura 3.2). Unas ranuras ponen en comunicación el agujero grande con los pequeños. Ambos extremos están cerrados con terminales. Los agujeros pequeños forman cavidades. Cuando el magnetrón esta en funcionamiento, los electrones recorren un camino hacia adelante y hacia atrás a lo largo de las cavidades, como se indica con flechas en una de ellas. (figura 3.2). En el centro se encuentra un cátodo cilíndrico con un alambre de calefacción interna. Un cable esta conectado al extremo más próximo del filamento de calefacción; otro cable esta conectado al extremo más alejado.

Un pequeño gancho en una de las cavidades actúa como espira de captación para este tubo particular, extrayendo energía de microondas de esta cavidad (y con ello de todas las demás) cuando oscila. Esta energía alimenta a una línea de transmisión concentrica corta, la cual termina en un radiador de un cuarto de longitud de onda que penetra en el extremo de un guía ondas (fig. 3.2 y 3.3).

El bloque del magnetrón actúa como ánodo o placa y es ta conectado a tierra. Cuando llega un impulso al tubo, - el cátodo se hace negativo. Esto hace a la placa relativa mente positiva, y los electrones procedentes del cátodo ca liente empiezan a dirigirse a ella. Sin embargo, un fuer te imán permanente de forma de herradura situado exterior mente, con su polo norte en un extremo del cátodo y su po lo sur en el otro extremo, produce un campo magnético in-- tenso en la dirección del agujero central. Según la regla de la mano derecha para motores, los electrones se desvían formando ángulo recto con las líneas de fuerza que atravie san. Ello da como resultado el que, tal como se muestra - en la figura 3.2, los electrones recorran un camino elípti co según progresan hacia el área del ánodo.

El potencial positivo del ánodo acelera los electro-- nes hacia él. Esto equivale a decir que los electrones re cogen energía de la diferencia de potencial. Cuando los - electrones dan vueltas al pasar por las ranuras en el área del ánodo, inducen tensiones entre las caras de ellas, que ponen a las corrientes en oscilación a lo largo de las su perficies de las paredes de las cavidades. De este modo - la energía de los electrones del cátodo se transfiere a - las corrientes oscilantes de las cavidades. Todas las ca vidades tienen el mismo tamaño y oscilan a la misma fre--

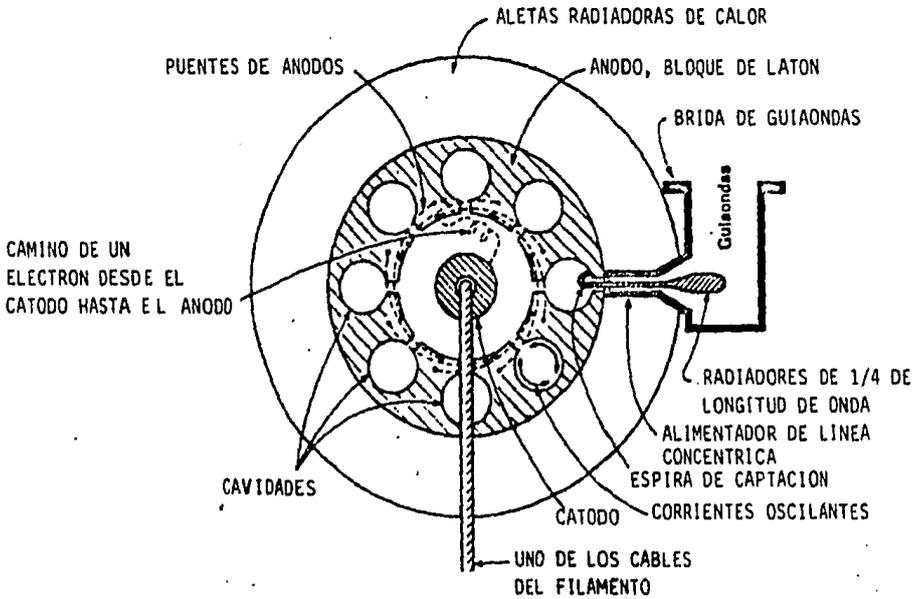
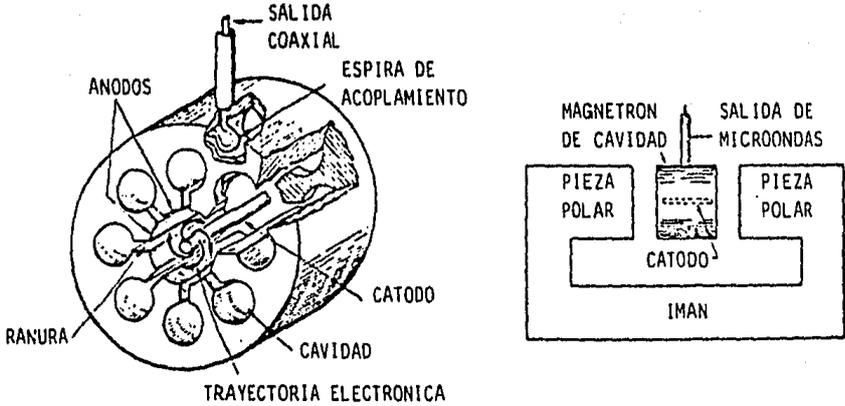


Fig. 3.2 Esquema básico de un magnetrón.

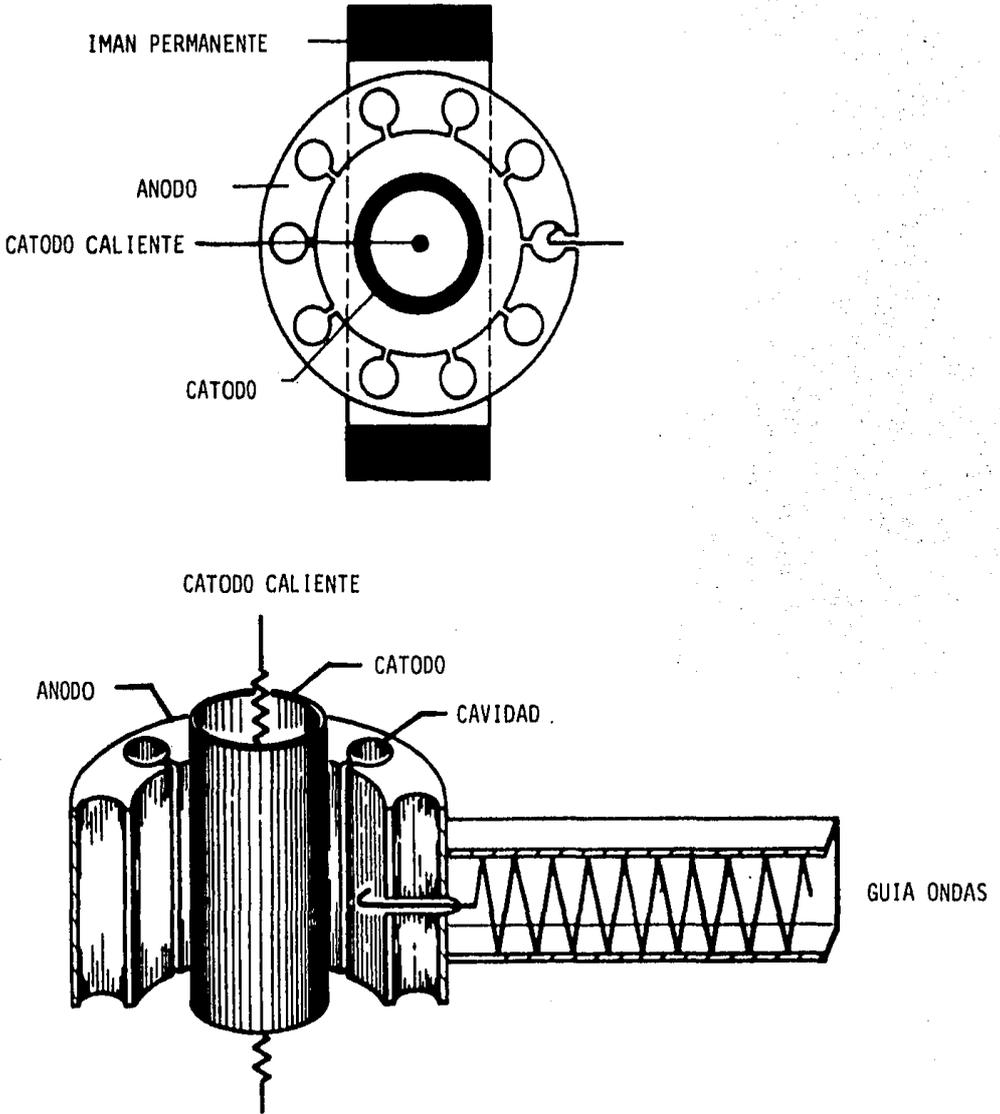


Fig. 3.3 Magnetrón y guía ondas.

cuencia. Sin embargo, las cavidades adyacentes tienen a cada momento corrientes en direcciones opuestas. Se ha encontrado que conectando, mediante puentes, las caras alternas del anodo como se muestra en la figura 3.2, en líneas de trazos, se aumenta el rendimiento a un 50%, mientras que un magnetrón sin estas conexiones, viene a ser de un 35% solamente.

3.2 Diferentes tipos de hornos de microondas.

3.2.1 El horno batch.

El primer tipo de aparato de procesado por microondas que se desarrollo fué el tipo de horno batch, como el que se ve en la figura 3.1. La radiación es emitida del tubo de potencia magnetrón a la cavidad, donde las ondas son reflejadas en todas direcciones y son absorbidas por los alimentos. Originalmente este tipo de hornos operaba a 3000 MHz y en la actualidad éstos son usados en la banda de 2450 MHz.

3.2.2 Horno continuo con radiadores parabólicos.

El segundo tipo de procesador por microondas utiliza cinco radiadores parabólicos de 1-2 kw como se muestra en la figura 3.4 que radian los alimentos puestos en una - -

correa de transmisión hecha de un material con baja pérdida dieléctrica. En este tipo de horno los alimentos son expuestos a la energía de microondas en una distancia de cerca de 5 cm sobre la correa de transmisión, y entonces el alimento se equilibra hasta que llega al siguiente radiador parabólico. Se usan hasta cinco radiadores de 2 kw. Este tipo de unidades puede tener un particular uso en el descongelado de alimentos con diferentes características de pérdidas dieléctricas.

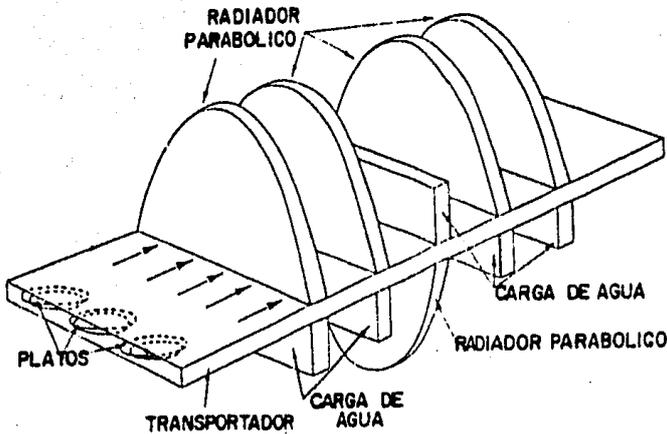


fig. 3.4 Horno continuo con radiadores parabólicos.

3.2.3 Horno continuo con cinco magnetrones.

Un tercer tipo de horno fué desarrollado similar al anterior. Este utiliza cinco generadores de potencia -- (magnetrones) a lo largo de una línea de transportación.- Este sistema también opera a 2450 MHz y es presentado en la figura 3.5 y su potencia total es de 10 kw.

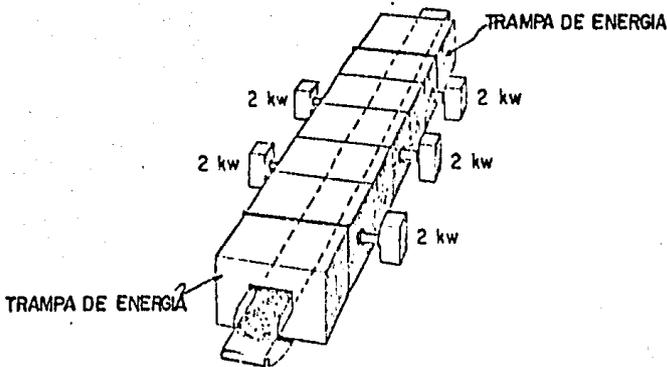


fig. 3.5 Horno continuo con cinco magnetrones.

3.2.4 Horno continuo con un solo magnetron de gran potencia

Otro tipo de horno de microondas continuo se ha desarrollado el cual alimenta ls microondas de un simple y --

grande tubo generador de 25 kw al interior de un tunel - a través de una serie de ranuras como se presenta en la figura 3.6 . En este horno en los dos extremos del tunel - son colocadas trampas de energía las cuales tienen dos funciones: (1) evitan fugas de excesos de radiación en los extremos del tunel, en lugar de ser absorbidas por cargas de agua. (2) Absorben la energía cuando no hay carga en el tunel para no dañar el magnetrón. El sistema de aire forzado unido al calentamiento remueve el vapor de agua.

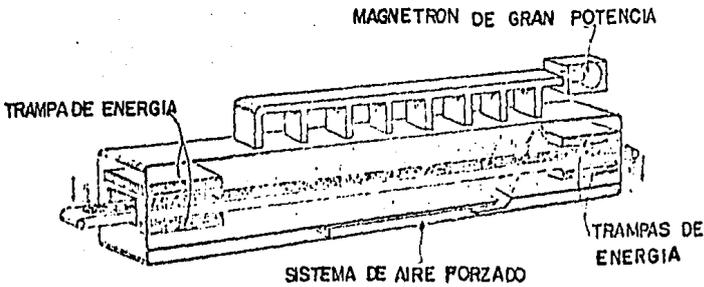


fig. 3.6 Horno continuo con un solo magnetrón de gran potencia.

3.2.5 Horno continuo con guía ondas de laberinto.

Uno de los últimos hornos desarrollados, utiliza un -
guía ondas doblado o un sistema de laberinto, en donde la
energía se conduce a través de un ducto y el producto -
atraviesa, el guía ondas (fig.3.7). De este modo se dis-
pone de mayor energía al inicio del tránsito a través del
laberinto, donde el producto está más húmedo. Conforme el
producto pasa a lo largo del tunel se absorbe energía y -
cerca del final del guía ondas, donde el producto esta se-
co la energía disponible y requerida es mínima. Este sis-
tema es particularmente útil para el secado de papel, tex-
tiles, hojas de madera, etc.

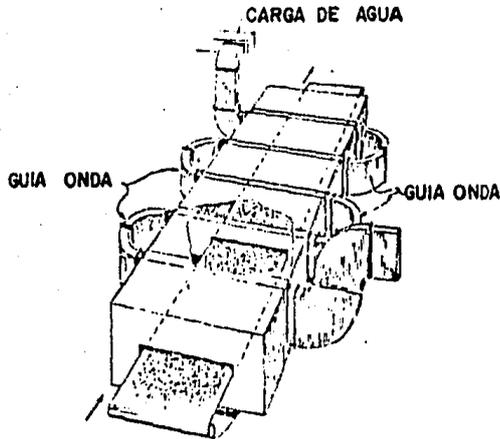


Fig. 3.7 Horno continuo con guía ondas de laberinto

3.3 Consideraciones de diseño para un horno de microondas

Las ventajas indiscutibles que ofrece el calentamiento por microondas para muchas aplicaciones en alimentos por su forma característica de rápido calentamiento a profundidad y gran uniformidad, han generado cada vez más interés en esta industria. Se han llevado a cabo mejoras significativas en el equipo y las bases y procedimientos para el cálculo del proceso han sido también mejoradas, y se espera que el calentamiento por microondas se convierta en una operación unitaria u operación estandar en la industria de alimentos, sola o en combinación con otros métodos de calentamiento. Para lograr lo anterior, será necesario implementar, en la medida que se tengan más conocimientos, un procedimiento de diseño que lleve finalmente a especificar un horno de microondas en condiciones óptimas, complementándolo con la experimentación. Debido al reciente desarrollo del calentamiento por microondas, los procedimientos de cálculo para su diseño son difíciles de encontrar, ya que aún no se tiene un pleno conocimiento de su comportamiento.

A continuación, se presenta a grandes rasgos un procedimiento básico para el diseño de un horno de microondas, batch considerando principalmente tres aspectos: energía eléctrica, generación de calor y distribución de energía -

de microondas dentro de la cavidad del horno, para su dimensionamiento.

En lo que se refiere al consumo de energía eléctrica, se presenta un esquema de balance de energía que permite evaluar los requerimientos en este sentido y su forma de consumo. Desde el punto de vista de generación de calor se plantea un balance de energía calorífica sobre la carga de alimentos a tratar, para determinar la capacidad del magnetrón y el tiempo de procesado y por último, se presenta una técnica que permite evaluar las dimensiones adecuadas de la cavidad resonante para tener una distribución de energía de microondas uniforme.

El diseño de un horno de microondas se puede dividir principalmente en dos partes; el diseño del magnetrón y el diseño de las dimensiones de la cavidad resonante. El diseño del magnetrón, consiste a su vez de dos partes: el diseño referido a la parte electrónica, el cual cae fuera del contexto de este trabajo y el diseño referido a determinar su capacidad.

3.3.1 Diseño de la capacidad del magnetrón y evaluación del tiempo de procesado.

El procedimiento para determinar la capacidad del magnetrón consiste en evaluar la energía requerida por un alimento para procesarlo. Esto se calcula mediante un balance de energía calorífica sobre el alimento. Primeramente se presenta un esquema del balance de energía y su forma de consumo dentro de un horno de microondas en la figura - 3.8.

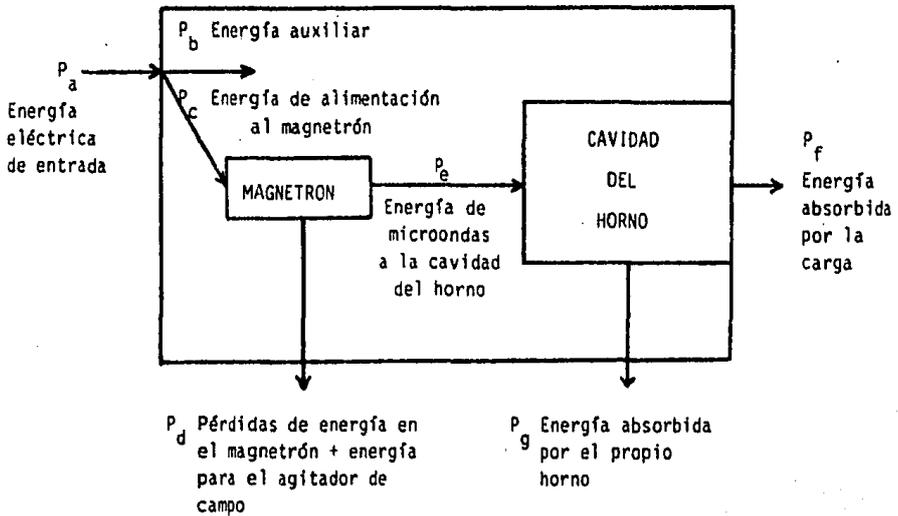


Fig. 3.8 Balance de energía en un horno de microondas.

Energía eléctrica de entrada (P_a)

La corriente eléctrica de abastecimiento, es una corriente alterna (A.C.) la cual varía de acuerdo a la potencia requerida. Normalmente se usa de 120 V y hasta 13 amperes en una fase a 60 ciclos /seg. para baja potencia y 220 V hasta 440 V en tres fases 60 ciclos/seg. y hasta 480 amperes, para potencias altas.

La energía eléctrica a la entrada esta dada por :

$$P_a = (\text{diferencia de potencial}) (\text{corriente}) (\text{tiempo}) = Eit \text{ (watt seg)} \quad (3.1)$$

Energía eléctrica auxiliar. (P_b)

Es la energía consumida por los accesorios auxiliares como luces, ventilador, etc. y es dada por la siguiente ecuación:

$$P_b = P'_b t \quad (\text{watt seg}) \quad (3.2)$$

Donde P'_b es la potencia consumida por los accesorios en watts.

t es el tiempo de operación en segundos.

Energía de alimentación al magnetrón (P_c)

Es la energía empleada por el magnetrón para generar - microondas e incluye el consumo de energía eléctrica para el transformador y el agitador de campo.

$$P_c = P_a - P_b \quad (\text{watt seg}) \quad (3.3)$$

Pérdidas de energía en el magnetrón (P_d).

Para evaluar este término normalmente se considera - una eficiencia del 70% de acuerdo a KIRK D. y entonces:

$$P_d = (P_c) (0.3) \quad (\text{watt seg}) \quad (3.4)$$

Energía de microondas a la salida del magnetrón (P_e).

Es la energía de microondas dada por el magnetrón, y es la energía que será absorbida por la carga de alimentos dentro de la cavidad, y por el propio horno. El término - (P_e) determina directamente la capacidad del magnetrón y - esta dado por la siguiente ecuación de acuerdo al balance:

$$P_e = P_c - P_d \quad (\text{watt seg}) \quad (3.5)$$

O bien

$$P_e = P_f + P_g \quad (3.6)$$

Donde

P_f es la energía absorbida por la carga de alimentos.

P_g es la energía absorbida por el propio horno.

El término (P_f) para los fines de diseño es el término significativo para determinar la capacidad del magnetrón y es evaluado de acuerdo a un balance de calor. Para el caso donde no exista cambio de fase (P_f) esta definido unicamente por el calor sensible necesario para calentar un alimento a la temperatura deseada, mediante:

$$P_f = \rho C_p (T_2 - T_1) \quad (\text{cal/cm}^3) \quad (3.7)$$

Donde

ρ es la densidad del alimento (gr/cm^3)

C_p es la capacidad calorífica del alimento ($\text{cal/gr}^\circ\text{C}$)

T_1 es la temperatura inicial del alimento ($^\circ\text{C}$)

T_2 es la temperatura final del alimento ($^\circ\text{C}$)

P_f es el calor necesario para procesar el alimento de T_1 a T_2 (cal/cm^3)

NOTA:

En el caso en que exista cambio de fase debe considerarse el calor latente para evaluar (P_f) .

El término (P_f) obtenido a través del balance termodinámico, da la capacidad del magnetrón, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{CAP. MAG.} = \frac{(P_f)(V)}{\eta} + P_g \quad (\text{cal}) \quad (3.8)$$

Donde

V es el volumen de alimentos a tratar (cm^3)

η es un factor de eficiencia que puede considerarse de (0.7) (-)

P_g es la energía absorbida por el propio horno. (cal)

Cap. Mag. es dada en (cal).

El término (P_g) puede despreciarse debido a que es muy pequeño frente a (P_f) , excepto en procesos intermitentes cortos.

El tiempo de procesado puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$P_f = Pt \quad (3.9)$$

Donde

t es el tiempo de procesado (seg.)

p es la energía absorbida de la ecuación 2.7
(watt/cm³)

La ecuación (2.7) da la energía absorbida por un alimento cuando es sometido a un campo de microondas.

$$P = 55.61 \times 10^{-14} (E^2) (K'') (f) \quad (2.7)$$

Para evaluar la energía absorbida por un alimento deben tomarse en cuenta las limitaciones de los parámetros de la ecuación dadas anteriormente y que a continuación -
sumarizamos:

El voltaje (E) está limitado para prevenir una descarga en el aire.

El factor de pérdida relativo (K'') es una función de la temperatura y puede ser obtenido aproximadamente de los datos del apéndice I, ya que no se dispone de una ecuación para evaluarlo como una función de la temperatura.

La elección de la frecuencia es difícil y además de - considerarse las propiedades dieléctricas de los alimentos a tratar para su elección deben tomarse en cuenta los siguientes factores:

1) Considerar la relación inversa de la frecuencia con la ecuación de profundidad a la mitad de potencia (HPD) ec - (2.12). (A mayor frecuencia menor profundidad de penetración). Y así mismo, considerar la relación directa de la - frecuencia con la ecuación de absorción de energía de microondas (2.7). (A mayor frecuencia mayor absorción de - energía).

2) Considerar la forma y tamaño del alimento.

3) Considerar que los alimentos son de naturaleza heterogénea y por tanto, constituidos por componentes con características de pérdidas dieléctricas diferentes.

Una vez evaluado (P) y (P_f) se determina el tiempo de procesado de acuerdo a la ecuación (3.9) que reorganizando en base al análisis dimensional considerando que un watt--seg = 1 joules, 1 Cal.= 4.186 joules y despejando el tiempo se tiene:

$$t = \frac{4.186 P_f}{P} \quad (\text{seg.}) \quad (3.10)$$

Donde

(P_f) esta en (cal/cm^3) y (P) en (watt/cm^3)

Entonces la capacidad del magnetrón puede también ser evaluada de acuerdo a la ecuación:

$$\text{CAP. MAG.} = \frac{(P)(V)}{\eta} \quad (\text{watts}). \quad (3.11)$$

La tabla 3.1 que se basa en información reportada en la literatura enlista valores aproximados para la capacidad del magnetrón en términos de kw Hr/Kg y cal/Kg para diversas aplicaciones del calentamiento por microondas.

Las cifras deben ser divididas por un factor de eficiencia de energía, que dependerá en gran parte de lo bien que sea diseñada la combinación del magnetrón y la cavidad con respecto a la carga a ser tratada.

Tabla 3.1 Requerimientos de energía para diferentes usos en alimentos. (Asumiendo 100% de eficiencia de energía.)

Nombre del proceso	Capacidad kWhr/Kg	del magnetrón Cal/Kg
Deshielado (descongelado)	0.125	107,512
Cocinado	0.166	142,777
Blanqueado	0.091	78,191
Pasteurizado	0.100	86,010
Deshidratación hasta el 2% de humedad	1	860,010
Secado del 25% al 2% de humedad	0.200	172,020
Horneado	0.067	57,340
Horneado completo	0.033	28,670
Destrucción de insectos	0.022	19,113

Una vez calculada la capacidad del magnetrón, es conveniente hacer un análisis de la historia térmica del ali-

mento a tratar mediante el calculo del perfil tiempo-temperatura y determinar con mayor exactitud el tiempo de procesado, así mismo es también conveniente hacer algunos - - calculos para evaluar la absorción de energía a diferentes profundidades con la ecuación de penetración a fin de tener un mejor conocimiento del comportamiento del alimento, y poder reevaluar el tiempo óptimo de procesado, y la capacidad del magnetrón.

Por último se presenta un diagrama de flujo para determinar la capacidad del magnetrón en base al procedimiento anteriormente descrito.

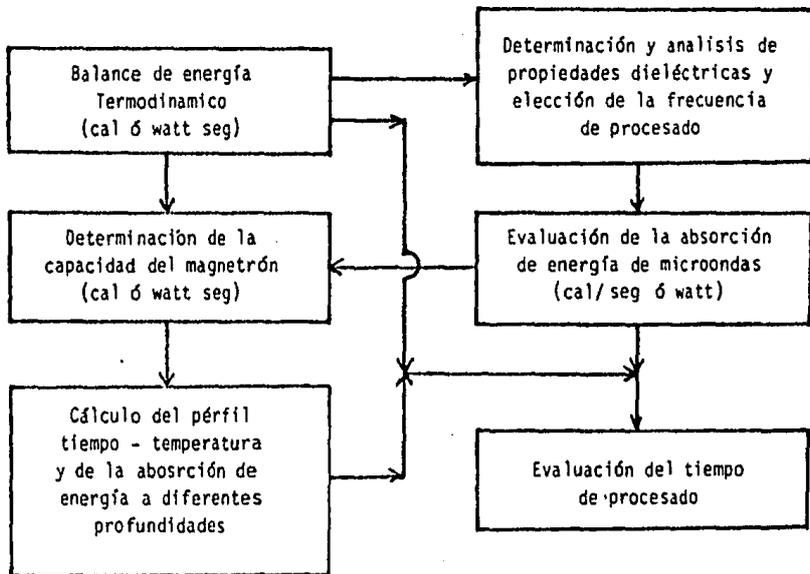


Fig. 3.9 Diagrama de flujo para evaluar la capacidad del magnetrón y el tiempo de procesado.

3.3.2 Dimensionamiento de la cavidad de un horno de microondas.

El mecanismo de calentamiento en un horno de microondas resulta de la interacción de la radiación de energía de un campo electromagnético de alta frecuencia y el interior de un alimento. La energía producida por el magnetrón es propagada en la cámara interna del horno la cual es, en realidad una cavidad resonante multimodal, donde la energía es reflejada en las paredes que producen modelos de ondas estacionarias.

El diseño de la cavidad debe hacerse para lograr en lo posible una distribución uniforme de la densidad de energía dentro de la cavidad, para homogenizar el calentamiento de los alimentos y para asegurar que la cavidad presente la carga apropiada para el magnetrón.

3.3.2.1 Modos en el interior de la cavidad de un horno.

Si se tiene un guía ondas en el que las ondas se propagan a lo largo del eje (Z) como es ilustrado en la figura (3.10), y colocamos dos pequeñas placas como se muestra, entonces creamos una cavidad de microondas. Esta cavidad es resonante en un rango particular de frecuencias.

Por ejemplo, si el campo (E) varía como es presentado en la figura (3.11) donde se tienen dos medias ondas a lo ancho, tres medias ondas en la dirección de la profundidad, y dos medias ondas en la dirección de la altura, entonces la cavidad será resonante en el modo TE_{232}

El modo TE es el modo en que se propaga una particular onda eléctrica transversal en un guía ondas. En general, uno u otro de los campos (eléctrico o magnético) no tendrá componente a lo largo de la guía de ondas. Cuando el campo eléctrico es tal que esta enteramente en planos transversales al guía ondas (entonces las líneas magnéticas se extienden en parte a lo largo de la guía), a este modo se le denomina TE ó Modo eléctrico transversal. Por otra parte, cuando es el campo magnético el que sólo tiene componentes transversales, el modo se designa como magnético transversal TM.

La longitud de onda a la cual la resonancia puede ocurrir es dada por :

$$\lambda = \frac{2}{\sqrt{(M/W)^2 + (N/D)^2 + (P/H)^2}} \quad (3.12)$$

Donde

λ es la longitud de onda de la frecuencia resonante (cm).

M, N, P son los números de medias ondas de variación del campo (E) en las direcciones W, D, H respectivamente (-)

W es el ancho de la cavidad (cm)

D es la profundidad de la cavidad (cm)

H es la altura de la cavidad (cm)

Ya que la energía en un guía ondas puede propagarse - en ambos modos TE y TM podemos tener estos dos casos en una cavidad. Así también, tendremos un modo TM_{232} , dado - por la misma ecuación. Ya que ambos modos pueden ocurrir a la misma frecuencia pero con diferentes configuraciones de campo éstos son llamados modos degenerados.

Se ha encontrado que la uniformidad del calentamiento se incrementa por dos factores; (1) eligiendo dimensio-- nes, las cuales den un gran número de modos resonantes dentro de los límites de la frecuencia del magnetrón - - - - (915 MHz \pm 25 ó 2450 MHz \pm 25). (2) Adicionando un - agitador de campo que cambie constantemente el patrón de - energía dentro del horno.

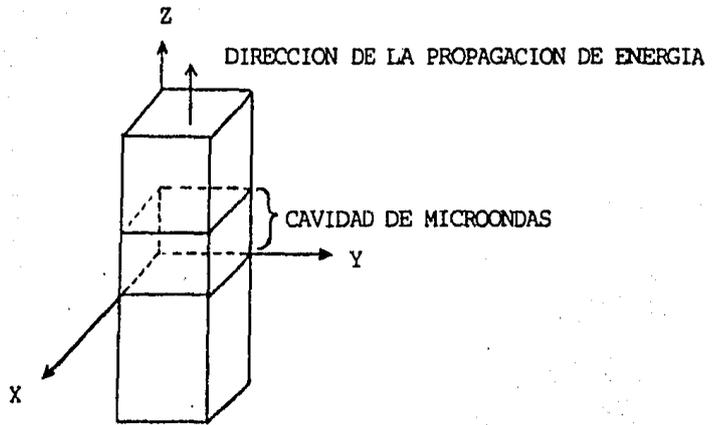


Fig. 3.10 Guía onda con dos pequeñas placas que forman la cavidad de microondas.

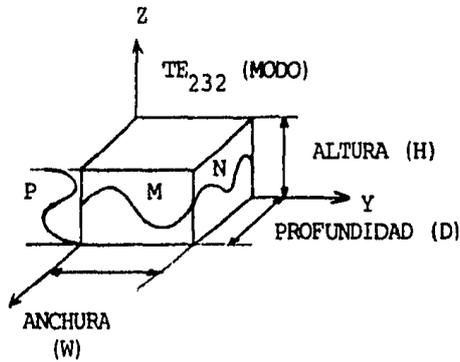


Fig. 3.11 Cavidad de microondas formada en la figura 3.10 con la representación esquemática de la variación del campo (E) para el modo TE₂₃₂

3.3.2.2 Cálculo de los modos y dimensiones de la cavidad.

Existen esencialmente dos tipos de cavidades empleadas en los hornos de microondas: La cilíndrica y la rectangular. De éstas, la más comunmente usada y por ello la más desarrollada es la rectangular. La cavidad cilíndrica es muy poco usual.

La energía de microondas dentro de la cavidad viaja - hacia adelante y hacia atrás, reflejándose sucesivamente - en cada extremo, estas ondas que se mueven en direcciones opuestas dan un campo neto en la sección al formarse ondas estacionarias, si el tiempo de viaje de estas ondas es tal que esta sincronizado con la energía alimentada a la cavidad, habrá resonancia.

La ecuación (3.12) sirve para el cálculo de los modos y las dimensiones de una cavidad resonante rectangular. - Esencialmente la ecuación esta resulta para todas las combinaciones de (M), (N) y (P) y para pequeños incrementos en las dimensiones. El mejor diseño será aquel que - proporcione el mayor número de modos resonantes para dimensiones que sean adecuadas para tratar el volumen de alimentos deseado.

Con el fin de simplificar la secuencia de cálculos iterativos, cuando no se dispone de una computadora, Harold S. Hauck desarrollo un nomograma que permite obtener las dimensiones y los modos resonantes en una cavidad rectangular.

Dicho nomograma se presenta en la figura (3.12) y sus limitaciones a continuación se enlistan:

- 1) Es unicamente válido para la frecuencia de $2450 \text{ MHz} \pm 25 \text{ MHz}$ ó bien para longitudes de onda de 12.12 a 12.37 cm.
- 2) Es válido sólo para cavidades rectangulares.
- 3) Las dimensiones de la cavidad más grande que puede ser obtenida son:

Ancho (W) = 51 cm

Profundidad (D) = 27.26 cm

Altura (H) = 27.26 cm.

Para entrar al nomograma hay que suponer primeramente las dimensiones de la cavidad en base al volumen de carga a tratar, geometría y asumiendo que el espaciamiento entre los alimentos es el mínimo necesario.

$$\left(\frac{u}{H}\right)^2 = \left(\frac{\text{ANCHO}}{\text{ALTURA}}\right)^2$$

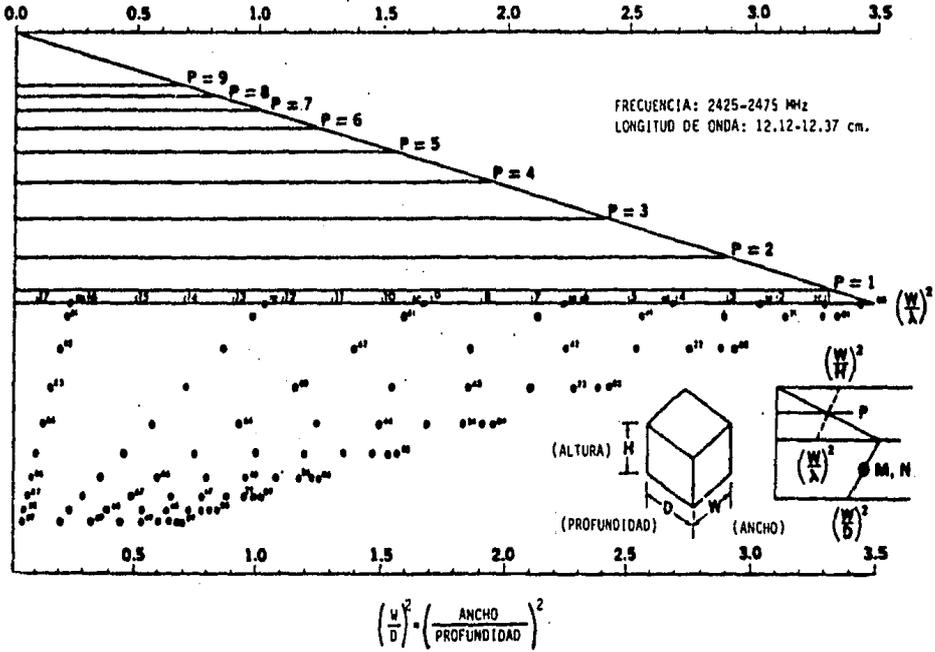


Fig. 3.12 Modos resonantes y dimensiones para una cavidad de microondas rectangular.

Una vez supuestas las dimensiones de la cavidad se --
procede a utilizar el nomograma como se indica en el ejem-
plo a la derecha de la figura (3.12) de acuerdo con la si-
guiente secuencia:

1) Evaluar las relaciones:

$$(W/H)^2 = (\text{ancho/altura})^2$$

$$(W/D)^2 = (\text{ancho/profundidad})^2$$

$$(W/\lambda)^2 = (\text{ancho/longitud de onda})^2$$

La última relación debe calcularse usando ambas longitudes de onda 12.12 y 12.37 cm, correspondientes a 2475 y 2425 MHz respectivamente.

Las longitudes de onda se calculan a partir de la ecuación (1.15) como sigue:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300}{2475} = 0.1212 \text{ m} = 12.12 \text{ cm}$$

2) Trazar líneas desde $(W/H)^2$ en la escala superior hasta ambos valores de $(W/\lambda)^2$ en la escala central correspondiente a $P=0$

3) Trazar líneas desde ambos valores de $(W/\lambda)^2$ en la escala central hasta el valor de $(W/D)^2$ en la escala inferior. Todos los puntos que queden dentro del pequeño triángulo formado corresponden a modos para $P=0$, ocurriendo dentro de los límites de longitud de onda de 12.12 a 12.37 cm.

4) Dibujar líneas desde el origen del eje $(W/H)^2$ a través de la intersección de las líneas dibujadas en el paso 2) con la línea $P=1$, prolongándolas hasta la escala central correspondiente a $(W/\lambda)^2$. Corregir estos nuevos puntos en la escala central con $(W/D)^2$ en la escala inferior. Todos los puntos dentro del nuevo triángulo corresponden a modos para $P=1$.

5) Repetir el paso 4) usando la línea $P=2$, obteniendo los modos para $P=2$. Este paso se repite para todas las líneas (P) que intersectan con las líneas del paso 2).

Este procedimiento debe ser repetido para varias suposiciones de dimensiones hasta poder determinar bajo que dimensiones se encuentra el mayor número de modos resonantes, y de esta manera definir finalmente la cavidad.

Es necesario aclarar que el procedimiento antes descrito es muy simple e ideal y que el diseño final de un horno debe ser ajustado experimentalmente, considerando además el agitador de campo y la posibilidad de encontrar la mejor ubicación del magnetrón y la carga, dentro de la cavidad.

En la actualidad el diseño y construcción de hornos -

de microondas continuos como el presentado en la figura - (3.5) se esta haciendo bajo el concepto de constituirlos de pequeños paquetes individuales. Es decir, conformarlos de una serie de hornos que operen individualmente con lo - que se obtiene una gran flexibilidad en el proceso, lográndose además un fácil mantenimiento sin necesidad de parar toda una planta. De este modo hornos con estas características pueden ser diseñados de acuerdo al procedimiento anterior rearreglándolo a las condiciones deseadas. La velocidad de la banda transportadora puede ser calculada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$B = \frac{P\eta}{MC_p \Delta T} \quad (3.13)$$

Donde

B es la velocidad del transportador (m/seg)

P es la energía de microondas en (cal/seg)

η es el factor de eficiencia (ad)

M es el peso de los alimentos en (gr/m)

C_p es la capacidad calorifica en (cal/gr °c)

ΔT incremento de temperatura deseado (°c)

La velocidad del transportador y los requerimientos - de zonas de equilibrio determinan finalmente la longitud -

total de la línea de procesado, el ancho del transportador y el número de magnetrones y/o cavidades o zonas de calentamiento por microondas.

CAPITULO IV

APLICACIONES DE CALENTAMIENTO POR MICROONDAS EN ALIMENTOS

4.1 Revisión general de aplicaciones en la industria de alimentos.

4.1.1 Deshielado.

4.1.2 Cocinado.

4.1.3 Blanqueado.

4.1.4 Pasteurización.

4.1.5 Esterilización.

4.1.6 Secado.

4.1.7 Horneado.

4.1.8 Aplicaciones especiales.

4.1 Revisión general de aplicaciones en la industria de alimentos.

Los usos actuales y potenciales del calentamiento por microondas en la industria de alimentos son numerosos y su importancia va en aumento. La tabla (4.1) resume las aplicaciones actualmente en uso a escala industrial, laboratorios y a nivel de planta piloto.

Tabla (4.1) Aplicaciones del calentamiento por microondas en el campo de alimentos. Escala industrial (I), planta piloto (P), laboratorio (L).

PROCESO	PRODUCTOS TRATADOS	ESCALA DE APLICACION
Deshielado-fusión	Materiales crudos e intermedios.	I
Cocinado	Pollos, tocino, - salchichas, arroz	I
Blanqueado inactivación enzimática.	Maíz, papas, vegetales, flores.	P, L

Tabla 4.1 (continuación)

PROCESO	PRODUCTOS TRATADOS	ESCALA DE APLICACION
Pasteurización	Pan	I
	Alimentos precocidos, jamón, pescado	L
	Bebidas.	
Esterilización	Alimentos precocidos	L
Deshidratación	Pastas,	I
	Granos, grasas, jugos de fruta.	P
	Secado de carne congelada.	L
Horneado	Inflación ó levanta- miento de pastas	I
	Horneado, horneado final	I, P
	Rostizado	Café, cacahuates	L
Destrucción de insectos.	Granos y cereales	P, L

4.1.1 Deshielado.

Muchos alimentos antes de ser procesados son congelados y almacenados por varios días. Cuando éstos son deshielados, comunmente se presentan problemas de contaminación al utilizar técnicas convencionales para acelerar el deshielado mediante el calentamiento por convección de aire ó el deshielado con agua. Como consecuencia, el calentamiento por microondas ha sido de gran interés para esta aplicación. Recientemente se han comenzado a utilizar las microondas para el deshielado de carne y pescado y se han mejorado las técnicas combinando el deshielado por microondas y el convencional para evitar el calentamiento incontrolable cuando se usan solo microondas. Cuando se calientan productos congelados se logra una buena profundidad de penetración, y una buena distribución de temperatura. Se han reportado tiempos de tratamiento menores de 1 min. a capacidades de hasta 1/2 ton/Hr con costos de procesado menores de 0.1 ¢ USD/kg para una planta de 10 kw.

El deshielado por microondas puede ser controlado eficazmente si se elige cuidadosamente el espesor de la muestra, su forma geométrica y si se proporciona una distribución uniforme del campo, para lograr un calentamiento

to homogéneo.

Se debe enfatizar que las mayores ventajas del deshielo por microondas son en velocidad, uniformidad, flexibilidad, y requerimientos de espacio de piso.

El principio básico de esta aplicación se basa en el hecho de que en muchas plantas de alimentos el deshielo completo no es necesario ni deseable, como es el caso de las plantas descongeladoras francesas para el pretratamiento de cortes de carne congelados de hasta 15 cm de espesor que son deshuesados, cortados y salados en estado parcialmente congelado.

4.1.2 Cocinado.

El cocinado industrial de alimentos representa un mercado de rápido crecimiento. Por ello se han desarrollado continuamente nuevos procesos de cocinado continuo para mejorar rendimiento, calidad y economía. Actualmente se conoce de varias plantas para el cocinado rápido de piezas de pollo en un proceso continuo por microondas-vapor que operan en los Estados Unidos Americanos en ambas frecuencias 915 MHz y 2450 MHz.

Como regla general, aparece la combinación del calentamiento por microondas con alguna fuente convencional de calor como vapor, aire caliente, calentamiento infrarrojo, etc., debido a las altas temperaturas que durante el cocinado por microondas alcanzan los alimentos, una combinación de vapor resulta adecuada puesto que mantiene el peso perdido en límites aceptables y previene el gasto de energía por evaporación de agua.

En la industria del cocinado de partes de pollo, la combinación de microondas vapor se utiliza ampliamente por las razones expuestas.

Un sistema de cocinado continuo por microondas-vapor diseñado por la compañía Litton industries' Atherton, cocina hasta 3000 lb/Hr de piezas de pollo, con un costo de procesado de menos de 1 ¢ USD/lb.

Algunas de las características de este sistema son presentadas a continuación:

El cocinado se realiza bajo una técnica combinada de microondas-vapor. Con ello se logra un proceso continuo y un cocinado uniforme de las piezas de pollo tanto en la superficie como en el interior. Cuando se utilizan única

mente microondas, las partes interiores son completamente cocinadas no sucediendo así en las exteriores. Se utilizan dos hornos de microondas-vapor para cocinar piezas de tamaños diferentes en tiempos de procesado similares. -- Piernas y alas requieren menos cocinado y son pasadas a través de un horno de baja potencia. Pechugas y muslos necesitan mayor energía, y son procesados en una unidad de alta potencia.

Una vez cocinadas las piezas de pollo, éstas son tratadas como se indica en el diagrama de la figura (4.1) para concluir el proceso.

El cocinado se realiza en dos hornos de microondas - de 4 x 50 ft (1.2 x 15.2 m). El horno de alta potencia - para piezas grandes esta conformado por 32 modulos. Este tiene una potencia de 80 kw de energía de microondas a - una frecuencia de 2450 MHz. El horno de baja potencia - esta constituido por 20 modulos con una potencia de 50 kw a 2450 MHz. Ambos utilizan bandas transportadoras de - 3 x 55 ft (1 x 16.7 m) hechas de fibra de vidrio, que no absorben las microondas, y que llevan las piezas de pollo a través de los hornos. La banda transporta una carga - aproximada de 2 a 3 lb/ft². El vapor circula a través de los hornos y esta regulado en tres zonas.

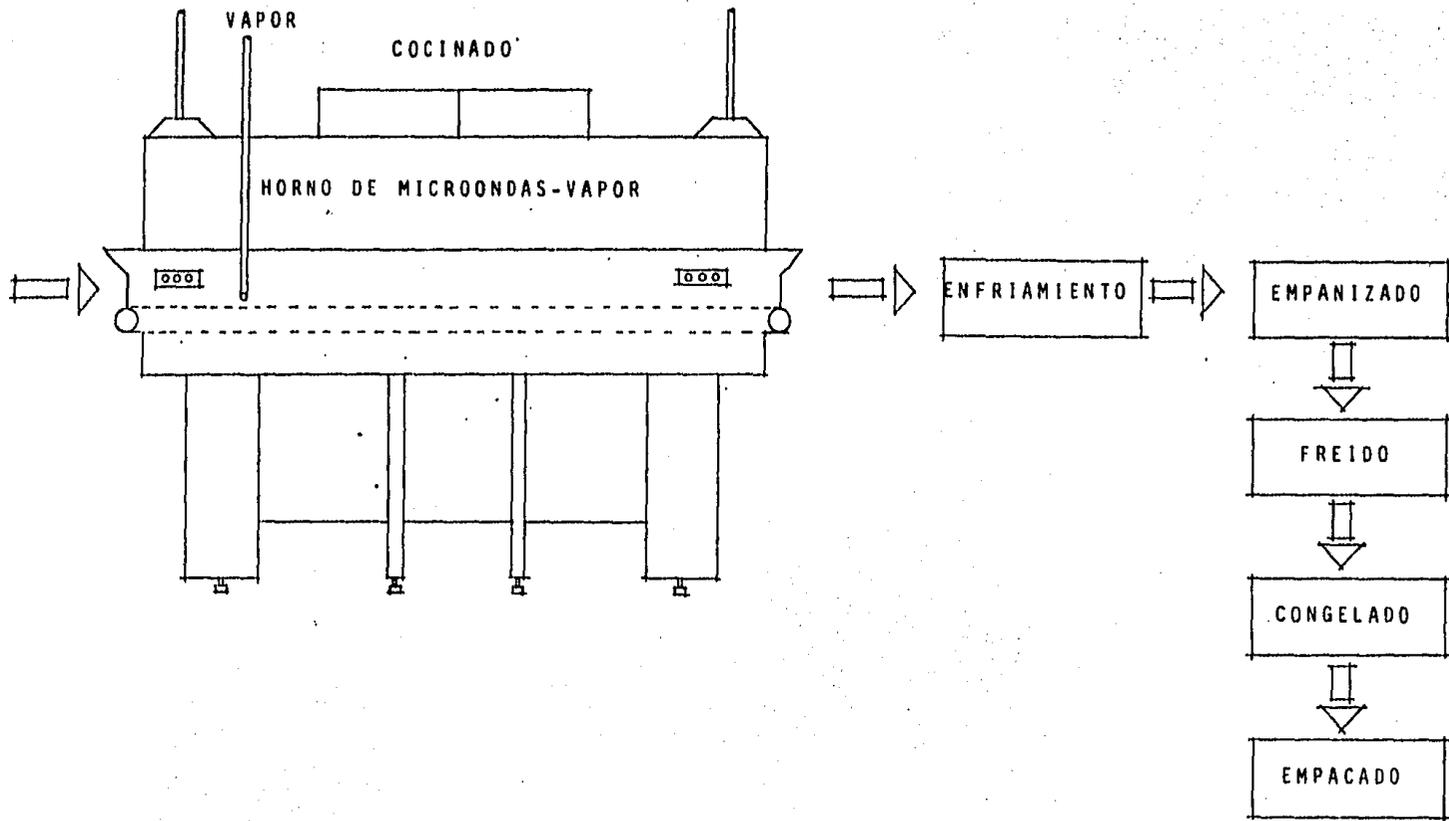


Fig. 4.1 Diagrama de flujo de una planta para cocinar piezas de pollo con una tecnica combinada de microondas-vapor.

Los resultados positivos del cocinado por microondas dependen no solo del corto tiempo de procesado (se han reportado reducciones de tiempo de procesado de hasta 75%) sino también, de la posibilidad de desarrollar un perfil de temperatura homogéneo dentro del alimento. Esto es ilustrado en la figura (4.2) obtenida de los estudios de transferencia de calor y masa en experimentos de cocinado convencionales de carne en laboratorios, calentada en un horno por convección de aire caliente hasta una temperatura en el centro de la muestra de 70°C, con aire a 225°C, obteniéndose los perfiles de humedad y temperatura.

Las líneas punteadas indican el posible mejoramiento en el rendimiento si se utiliza un método para dar un perfil de temperatura más homogéneo en el interior de la muestra. El calentamiento por microondas definitivamente ofrece el potencial para lograr esto con una adecuada combinación de calentamiento convencional.

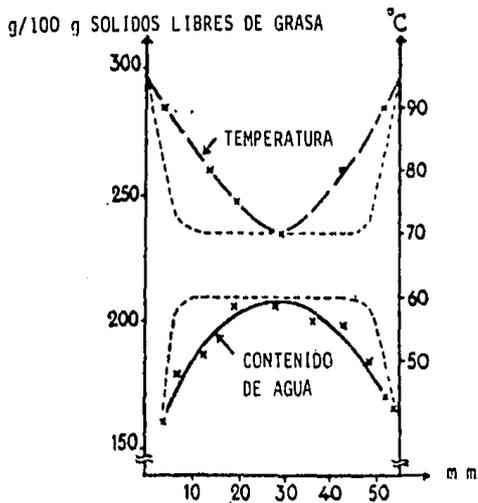


Fig. 4.2 Perfiles de temperatura y humedad en el cocinado de carne hasta una temperatura central de 70°C. Las líneas punteadas indican el posible perfil obtenido por combinación de microondas y métodos convencionales.

Cuando es requerida una costra café en la superficie del alimento, el calentamiento por microondas debe ser combinado con algún método de tostado, como un freidor de aceite o tostador, un horno de convección ó calentamiento infrarrojo. Los resultados de las investigaciones sobre alimentos demuestran que combinando el calentamiento convencional para tostado seguido por microondas para finalizar el cocimiento a la temperatura central deseada, se reduce sustancialmente el tiempo de procesado. El espesor de la muestra es el parametro de mayor importancia pa

ra determinar la combinación apropiada.

El tocino precocido, el cual solo necesita un recalentamiento rapido en una parrilla u horno, es un proceso altamente atractivo. El proceso industrial por microondas de este producto fue introducido hace algún tiempo - utilizando equipo operado a 2450 MHz. Se ha reportado - que una ventaja económica del proceso se encuentra en la extracción de grasa fundida de mejor calidad que la que - es obtenida con equipo de calentamiento infrarrojo.

Se han obtenido buenos resultados también, en el cocinado de salchichas en Canadá, en el precocido de arroz en Estados Unidos y en el Dorado de hamburguesas con una técnica combinada de tostado convencional y calentamiento - por microondas.

4.1.3 Blanqueado.

En el blanqueado de alimentos los objetivos son; la inactivación de enzimas las cuales de otra manera deteriorarán la calidad al almacenar, remover el aire y ablandar - el tejido de algunos vegetales conservados en latas. Experimentos exitosos en el laboratorio han sido reportados para el blanqueado por microondas de papas, elote y algu-

nos vegetales.

Es discutible si las posibles ventajas sobre el blanqueado convencional con vapor o agua caliente, compensarán el costo adicional de estos productos de bajo costo.

Para piezas gruesas tal como el elote, se obtiene una reducción notable en el tiempo de procesado de inactivación de enzimas, junto con una ventaja en el sabor, comparado con el proceso a vapor.

Se ha sugerido una combinación de agua caliente y microondas para obtener un proceso económico.

4.1.4 Pasteurización.

La función primaria de la pasteurización es la de destruir microorganismos vegetativos y esporas sensibles al calor. Se han reportado experimentos con microondas a gran escala, sobre la pasteurización de rebanadas de pan y pasteles para la inactivación de esporas de moho, las cuales infectan el pan durante las operaciones de enfriamiento y empaado. Calentamiento por microondas, después del empaado, por 2 ó 3 minutos hasta una temperatura final entre 65 y 70°C reduce la infección de moho e incre-

menta la vida de anaquel. Los preservadores químicos, permitidos en la mayoría de países, pueden dar una calidad comparable, pero pueden hasta cierto punto afectar sabor y volumen adversamente. Se han instalado en los últimos años algunas plantas industriales para la pasteurización por microondas de pan en Suiza. Los hornos utilizados son de tipo continuo, con una potencia de 40 kw.

Se reportan igualmente buenos resultados en la pasteurización por microondas de jamón empacado y otros alimentos precocidos a escala de laboratorio.

En la tabla (4.2) se muestra el resultado de un trabajo experimental para la pasteurización de jamón empacado, en donde se obtuvieron las condiciones más satisfactorias de procesado.

El experimento se realizó en dos unidades diferentes: un tunel parabólico con una potencia de 2 kw operado a - - 2450 MHz y un tunel también operado a 2450 MHz con 3 magnetrones de 1.5 kw c/u.

Tabla 4.2 Pasteurización de jamón a 2450 MHz.

	TUNEL PARABOLICO 2450 MHz.	TUNEL GUIA ONDA 2450 MHz
Espesor del jamón (cm)	3	3
Peso (gr)	400	400
Tipo de envoltura	cryovac	cryovac
Energía de entrada al magnetron.	4000	2800
P_1 kw/kg carga		
Energía de salida en la carga	1000	1000
P_2 kw/kg carga		
Eficiencia P_2/P_1 %	25	35
Velocidad del transpor tador (cm/min.)	20	45
Número de pasos	8	2
Tiempo efectivo de tratamiento (min)	4	4

Así mismo, excelentes resultados han sido obtenidos en la pasteurización de leche, cerveza y otras bebidas -- no viscosas, pero es muy dudable que el calentamiento -- por microondas pueda competir económicamente con los eficientes métodos de calentamiento en uso comercial para -- este propósito.

4.1.5 Esterilización

En la esterilización de alimentos por calor, el tratamiento debe ser suficiente para matar todas las bacterias patógenas con un margen muy alto de seguridad, el -- tiempo de tratamiento puede ser considerablemente reducido mediante el procesado por microondas, sin introducir -- peligro a la salud o calidad de los alimentos y proporcionando además, mejoras en cuanto a sabor.

Las técnicas convencionales de esterilización resultan inadecuadas para alimentos gruesos y esto representa una definitiva aplicación para el calentamiento por microondas.

La dependencia de la temperatura de la mayoría de -- las reacciones térmicas en materiales biológicos pueden -- ser aproximadas en relaciones de líneas rectas en diagra-

mas semilogaritmicos, mostrando el tiempo requerido para un grado dado de cambio en la calidad, inactivación ó -- termodestrucción como una función de la temperatura. La figura (4.4) indica de forma general la destrucción térmica bacteriana, inactivación enzimática y diferentes grados de cambio en el sabor de un alimento calentado. En la figura se ve que un proceso térmico equivalente a 4 -- min. a 130°C combinará la estabilidad biológica con la re -- tención de una buena calidad sensorial, mientras que la -- estabilización del proceso convencional llevado a 121°C -- requerirá 30 min. y sólo obtendrá un producto aceptable.

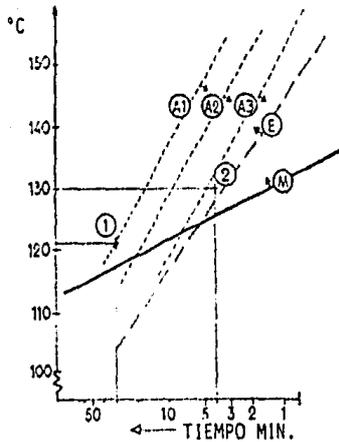


Fig. 4.4 Relación tiempo-temperatura y diferentes aspectos de cali dad y esterilización. E: inactivación enzimática arriba -- de esta curva; M: muerte de esporas arriba de esta curva; (A1), (A2), (A3): calidad de sabor mínima aceptable (A1) buena (A2), y excelente (A3) bajo estas líneas. Los pun-- tos (1) y (2) representan tratamientos de calor equivalen

tes a 121 y 130°C para obtener la esterilización con seguridad.

Debido a la baja conductividad térmica de alimentos sólidos es imposible alcanzar altas temperaturas en cortos tiempos (HTST) tratando alimentos de algunos centímetros de espesor por métodos de calentamiento convencionales.

Con el calentamiento por microondas es posible la esterilización bajo el concepto (HTST) alcanzando la temperatura de esterilización con una razonable uniformidad - del perfil de temperatura, sin embargo existen, algunos - problemas como el de encontrar un medio adecuado de rápido enfriamiento, y el de control de temperatura.

Un sistema de esterilización por microondas ha sido desarrollado para esterilizar alimentos como piezas de pollo y salchichas empacadas con envolturas de polipropileno. El equipo esta conformado principalmente por tres -- sistemas:

- 1) Un sistema de presurizado.
- 2) Un horno de microondas continuo.
- 3) Un sistema de enfriamiento.

El sistema de presurizado es empleado para evitar la ruptura de las bolsas de polipropileno durante el calentamiento, el horno de microondas tiene una capacidad de 10 kw a 2450 MHz, y el sistema de enfriamiento es operado en forma batch. El sistema es presentado esquemáticamente - en la figura 4.5

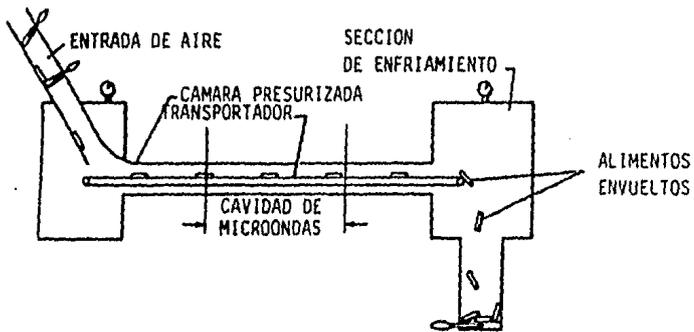


Fig. 4.5 Sistema de esterilización de alimentos en envolturas de polipropileno.

Bajo este sistema los productos son procesados satisfactoriamente alrededor de 121°C, y la calidad de sabor es mejorada en comparación con el calentamiento convencional, además de que el proceso es seguro desde el punto de vista microbiológico. El método es de considerable interés por su potencial y puede proveer de un sistema por el cual la calidad de alimentos enlatados competirá directa-

mente con los alimentos congelados. Un proceso (HTST) - está siendo desarrollado que proporcionará la ventaja adicional de acortar a un más el tiempo de procesado.

4.1.6 Secado.

El calentamiento por microondas no es económico para la deshidratación completa, existiendo mejores alternativas para el secado final de alimentos.

En el secado convencional la resistencia al calor de los productos parcialmente secos es a menudo un factor limitante, sin embargo mientras la superficie del material previamente seca es una limitante en el secado convencional, en el secado por microondas esta superficie presenta una baja absorción de energía de microondas en comparación con la humedad del centro del material, proporcionando una ventaja en el calentamiento por microondas.

Uno de los procesos que ha sido más desarrollado es el de secado de pasta (tallarines) por microondas. El proceso por microondas que se ha comercializado produce cerca de 1 ton/Hr y el equipo consiste principalmente de dos magnetrones con una potencia de 25 kw cada uno a 915-MHz. Estos magnetrones alimentan las microondas a través

de un guía onda a una cavidad resonante que tiene dos cámaras de 2 ft de alto, 3 ft de ancho y 12 ft de longitud cada una. (figura 4.6)

En este proceso los tallarines primero son secados brevemente en un secador vibratorio donde se remueve un poco el contenido de humedad sin que la pasta se pegue ó aglutine. Posteriormente son puestos sobre una banda transportadora de nylon la cual los lleva a través de las cámaras de microondas en un simple paso. El tiempo de exposición es de aproximadamente 10 min. aire caliente es pasado por las cámaras para arrastrar el vapor. Finalmente los tallarines son transportados a un enfriador y a empaque.

Las ventajas de este proceso son: La reducción del tiempo de procesado, la posibilidad de procesar con altas temperaturas con lo que se logra conjuntamente un efecto de pasteurización, el equipo de microondas sólo ocupa de un 20 a 25% del espacio de piso que ocupa el equipo de secado convencional y se presume que se incrementa la capacidad de producción en un 400%.

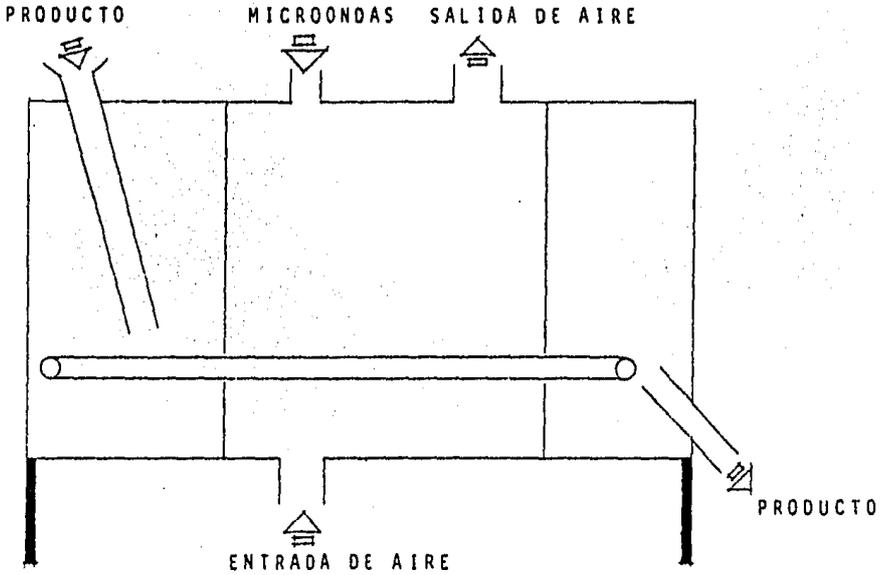


Fig. 4.6 Diagrama de flujo para el procesado de pasta - por microondas.

En la tabla 4.3 se presenta una comparación de costos para microondas y secado convencional y puede notarse una ventaja en las microondas.

Tabla 4.3 Comparación de costos de secado convencional y microondas.

	COSTO	
	§ (CAD)/Hr.	
	Secado convencional	Secado por microondas
Utilidades	2.69	2.22
Limpieza (sanidad)	0.60	0.04
Mantenimiento	1.12	0.10
Costo del magnetrón	--	1.00
Espacio	<u>0.26</u>	<u>0.08</u>
Total	4.67	3.44

Otro reciente y novedoso desarrollo es en el secado al vacío de jugos de frutas y removedores de agua de grasas a nivel de plantas piloto. En el secado al vacío de jugos, el jugo de frutas preconcentrado, es enviado a través de una tubería dentro de la cámara al vacío y continuamente es pasado a través de una sección de calenta--

miento por microondas, el nivel de humedad es reducido a 3% en 25 min. Debido al rápido tratamiento de calor y el corto tiempo de procesado, la calidad del producto es mejorada y por ello su comercialización, sobre aquellos con sistemas de deshidratación al vacío convencional.

El uso del calentamiento por microondas en el secado de congelados ha tenido considerable interés debido a la dramática reducción del tiempo de procesado y a las ventajas económicas que actualmente comienzan a vislumbrarse.

El secado de congelados a vacío es un proceso intrinsecamente lento. La energía necesaria para la sublimación es alta, y bajo procesos convencionales esta debe ser transferida por conducción de calor a través de una capa de alimento con una conductividad térmica muy baja. El calentamiento por microondas provee una distribución de energía que no es afectada por las capas secas, y que es absorbida principalmente en la región congelada. Ya que la región congelada tiene una alta conductividad térmica, la energía es conducida para la sublimación dando como resultado un secado rápido.

Los problemas que se han presentado en el secado de congelados por microondas tales como la ionización de -

gases en la cámara de secado, calentamientos desiguales - dando lugar a fusión y en casos extremos la desintegración explosiva de alimentos han sido resueltos obteniéndose una tecnología adecuada para el secado de congelados - que puede ser utilizada comercialmente. Actualmente el número de aplicaciones comerciales es pequeño y esta en crecimiento. La compañía Nestlé, está usando secado de congelados para café.

El problema principal para la comercialización de este proceso ha sido lo referido a el costo del equipo de microondas en comparación al convencional, pero afortunadamente este problema también, ha sido resuelto mediante un proceso combinado de calentamiento por radiación térmica y microondas.

La tabla (4.4) presenta una comparación de costos del proceso convencional y el combinado de radiación térmica y microondas donde puede observarse una ventaja del proceso combinado de radiación térmica y microondas.

Tabla 4.4 Comparación de costos del secado de congelados convencional y el proceso combinado de radiación térmica y microondas.

COSTOS	CONVENCIONAL	COMBINADO RADIACION Y MICROONDAS
	\$ (U.S.D.)	\$(U.S.D.)
Capital de inversión total	1,320,000	1,235,560
Costos de operación	6.142 ¢/kg	5.465¢/kg
Costos totales de operación	12.85¢/kg	10.8 5¢/kg

4.1.7. Horneado.

Para el horneado de pan blanco se han reportado sucesos técnicos experimentales en Inglaterra en combinación de microondas a 915 MHz y calentamiento con aire reduciéndose notablemente el tiempo de horneado.

Las ventajas de este proceso son: La reducción del tiempo de horneado; la reducción de espacio ocupado -- por el equipo de microondas, y el aumento de volumen de pan tratado.

Un desarrollo interesante y significativo en el campo del horneado es la producción de donas, en donde

las microondas han sido probadas con éxito tanto en el levantamiento de levaduras y en el freido utilizando una combinación de microondas y freido en aceite. En el caso de levantamiento de levaduras ha sido posible reducir el tiempo de prueba de 25-30 min. a 4 min. en una operación continua.

La combinación de freir en aceite y calentamiento por microondas, ha dado como resultado un producto único que no se hubiera podido conseguir con una técnica convencional solamente, reduciendo significativamente la densidad del producto, tiempo que se frie, acumulación de grasa, y mejorando la uniformidad del producto y el tiempo de vida de anaquel. Para ambos procesos reducciones muy significativas se adjudican tanto en costos y gastos generales; lo cual hace una situación ideal para la aplicación de las microondas en alimentos.

4.1.8 Aplicaciones especiales.

El calentamiento continuo de líneas de tubos de productos viscosos tales como caldos de carne ó emulsiones de carne presentan problemas considerables cuando se aplican técnicas convencionales debido a que el calor debe ser transferido a través de una pared del tubo al producto por conducción, lo que conduce al calentamiento

no uniforme que ensucia las paredes del tubo. Este problema ha sido resuelto por un sistema de microondas Alemán, en el cual el producto es impulsado a través de un tubo de teflón que esta colocado en el centro de una cavidad resonante circular, que permite una concentración del campo extremadamente alta y rangos de calentamiento rápidos sin el sobre-calentamiento de las paredes del tubo. Un sistema similar es presentado en la fig. - 4.7 que esta siendo usado en Inglaterra para cocinar líquidos viscosos en una corriente bajo presión.

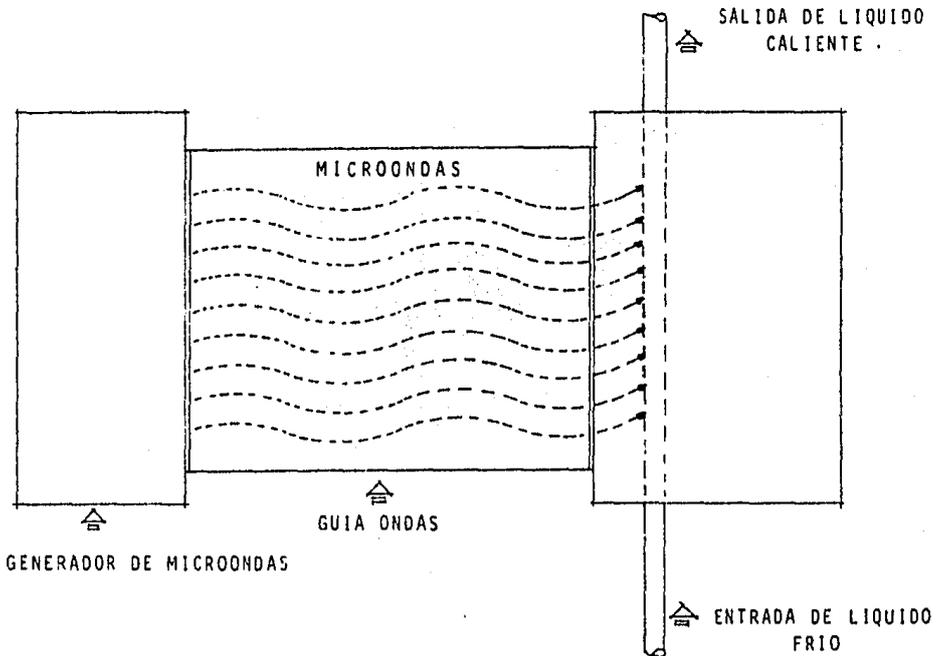


Fig. 4.7 Cambiador de calor de microondas.

C O N C L U S I O N E S

El calentamiento por microondas es un proceso relativamente nuevo de transmisión de energía. Su aplicación - en la industria de alimentos y aún a nivel doméstico, ha revelado numerosas ventajas sobre otros procesos ó utilizado en combinación con ellos.

Las microondas son ondas de energía radiante que difieren de otras radiaciones electromagnéticas por su longitud de onda y frecuencia. La radiación por microondas de manera semejante a la radiación térmica, puede ser absorbida, transmitida o reflejada y causa también un efecto de calentamiento sobre la materia.

El calentamiento por microondas no se produce desde la superficie del cuerpo hacia el interior sino en todo su volumen, restringido esto, únicamente por su penetración. De este modo la transferencia no depende de la conductividad térmica del material sino de la constante dieléctrica relativa (ϵ'_r ó K'), del factor de pérdida dieléctrica relativo (ϵ''_r ó K'') y de la tangente de pérdidas --- ($\tan\delta$), las cuales reflejan la habilidad de un material para absorber energía de microondas y varían a su vez con la composición química, la frecuencia y la temperatura.

El campo de diseño, aplicación y construcción de hornos de microondas, tanto a nivel doméstico como industrial, - está actualmente en rápido desarrollo debido a vertiginosa multiplicación de los procesos en que se pueden utilizar.

Sus partes, así como sus características, se definen lo mas ampliamente posible, tanto como los métodos incipientes de cálculo de capacidades y dimensiones.

La observación más significativa en este campo es la generación de una nueva alternativa que presenta características totalmente diferentes a los sistemas de calentamiento convencionales, que se traducen en determinantes ventajas en el area de alimentos, donde por definición se manejan materiales extremadamente sensibles a la temperatura.

Es inminente el uso generalizado de las microondas en la industria alimentaria, de manera que su conocimiento debe ser una condición indispensable de observar en las instituciones que como la nuestra pretenden desarrollarse en este campo.

Este trabajo contribuye al conocimiento del tema y -

con mucho más visión, fomenta la inquietud y la curiosidad de aquellos que por vocación ó por su desarrollo profesional se dedican a cuestiones relacionadas con la industria alimentaria.

A P E N D I C E I

TABLA I.1	Propiedades dieléctricas del agua en sus tres fases a 3000 MHz....	129
TABLA I.2	Propiedades dieléctricas del agua en función de la temperatura a 1000 MHz.....	129
FIGURAS I.1 - I.2	Fración de energía de microondas absorbida en función del espesor y la temperatura a 1000 MHz y 3000 MHz respectivamente....	130
FIGURA I.3	Requerimientos de energía para calentar agua.....	131
FIGURAS I.4 a I.7	Propiedades dieléctricas de mezclas acuosas en función de la concentración a 1000 MHz, 3000 MHz y 25°C.....	132
TABLAS I.3 - I.4	Propiedades dieléctricas de geles: Difco agar y agarosa en función de la concentración y la temperatura a 1000 MHz y 3000 MHz.....	133
FIGURAS I.8 - I.9	Propiedades dieléctricas de leche descremada en función de la temperatura a 1000 MHz y 3000 MHz.....	134
TABLA I.5	Propiedades dieléctricas de papas en función de la composición a 1000 MHz, 3000 MHz y 77°F.....	135
TABLA I.6	Propiedades dieléctricas de papas en función de la composición y la temperatura a 1000 MHz y 3000 MHz.....	135
FIGURAS I.9 a I.12	Propiedades dieléctricas de papas con almidón granuladas y gelatinizadas en función de la concentración a 1000 MHz y 3000 MHz.....	136
FIGURAS I.13 a I.15	Factor de pérdida dieléctrica de carne de res en función del contenido de agua, cenizas y grasas respectivamente a 915 MHz.....	137
TABLA I.7	Propiedades dieléctricas de emulsiones de carne a 900 MHz y 2800 MHz en función de su composición a 20°C.....	138
TABLA I.8	Propiedades dieléctricas de alimentos semisólidos en función de la composición y la temperatura a 915 MHz y 2450 MHz.....	139
TABLA I.9	Propiedades dieléctricas de alimentos varios en función de la composición y la temperatura a 900 MHz.....	140
TABLA I.10	Propiedades dieléctricas de carne, papas y zanahorias en función de la temperatura a 3000 MHz y 2800 MHz.....	141
TABLA I.11	Propiedades dieléctricas de salsa (gravy) y sopa de vegetales a 3000 MHz y 2800 MHz.....	142
TABLA I.12	Propiedades dieléctricas de aceites y grasas comerciales en función de la temperatura 1000 MHz y 3000 MHz.....	143
TABLA I.13	Descripción de aceites y grasas de la TABLA I.12.....	144
FIGURA I.16	Propiedades dieléctricas de alimentos en función del contenido de agua a 2800 MHz y 20°C.....	145
FIGURA I.17	Propiedades dieléctricas de alimentos en función de la temperatura a 2800 MHz.....	146
FIGURA I.18	Profundidad de penetración de la energía de microondas en función de la temperatura para: agua, carne cruda de res y salsa (gravy) a 915 MHz y 2450 MHz.....	147

Tabla I.1 Propiedades dieléctricas del agua en sus tres fases a 3000 MHz

FASE	T (°C)	(K')	tanδ	(K'')
LIQUIDA	1,5	80,5	0,31	25
SOLIDA	-12	3,2	0,0009	0,0029
VAPOR BAJA PRESION				0

Tabla I.2 Propiedades dieléctricas del agua en función de la temperatura a 1000 MHz

TEMPERATURA		K'	tan δ	K''
(°F)	(°C)			
32	0	87,1	0,1040	9,09
50	10	84,4	0,0745	6,32
68	20	80,0	0,0558	3,29
86	30	76,5	0,0430	3,29
104	40	73,0	0,0345	2,52
122	50	69,8	0,0281	1,96
140	60	66,6	0,0232	1,54
167	75	62,1	0,0184	1,14

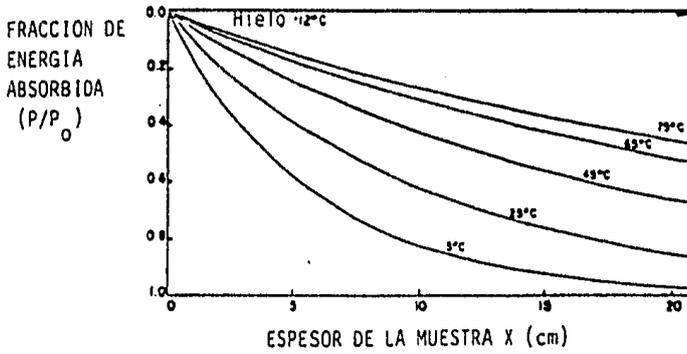


Fig. 1.1 Fracción de energía de microondas absorbida (P/P_0) como una función del espesor (x) para agua a diferentes temperaturas y 1000 MHz.

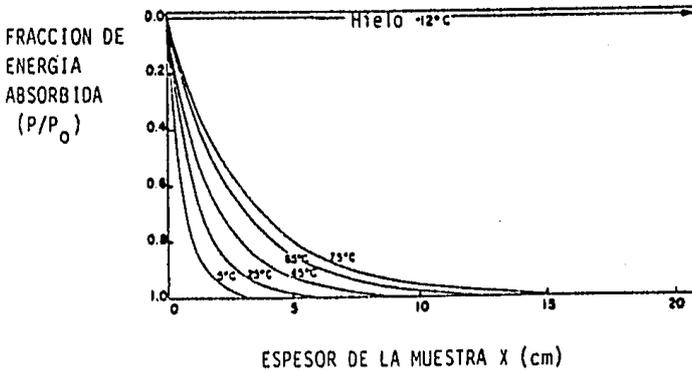


Fig. 1.2 Fracción de energía de microondas absorbida (P/P_0) como una función del espesor (x) para agua a diferentes temperaturas y 3000 MHz.

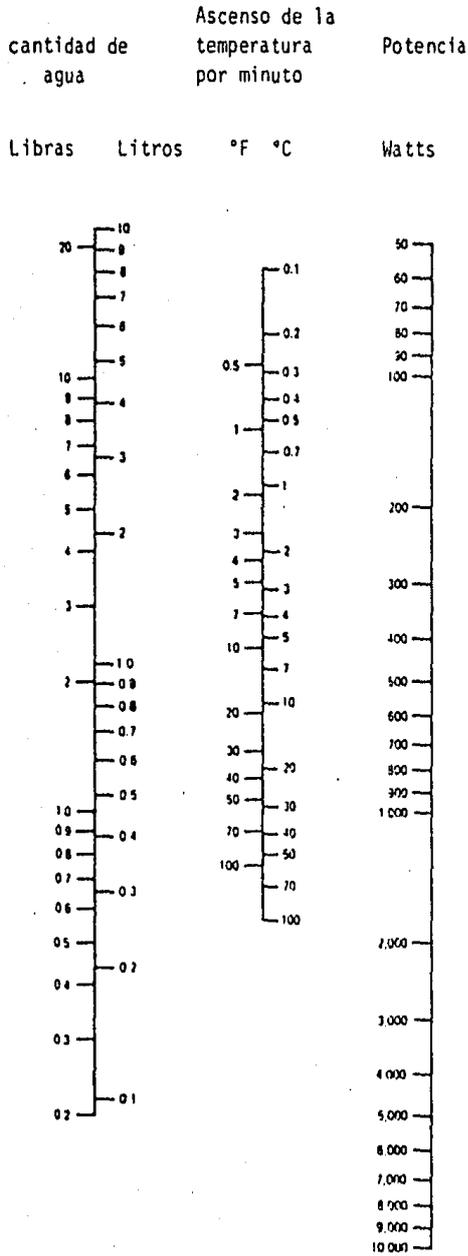


Fig. 1. 3 Requerimientos de energía para calentar agua.

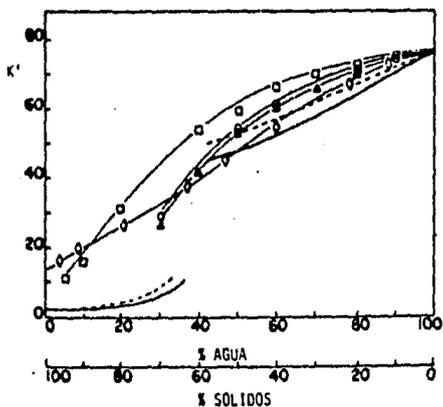


Fig. 1.4 Constante dieléctrica (K') de mezclas acuosas en función de la concentración a 1000 MHz y 25°C.

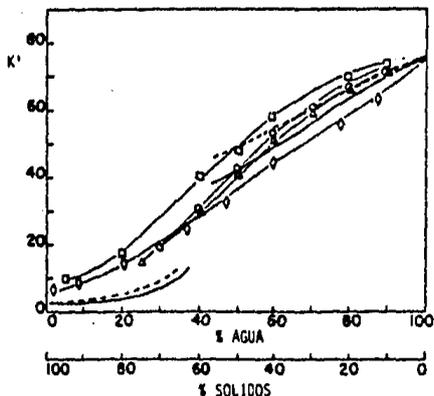


Fig. 1.5 Constante dieléctrica (K') de mezclas acuosas en función de la concentración a 3000 MHz y 25°C.

- Papas con almidón granuladas
- - - Papas con almidón gelatinizadas
- Glucosa
- △ Sacarosa
- ◇ Fructosa
- Glicerol

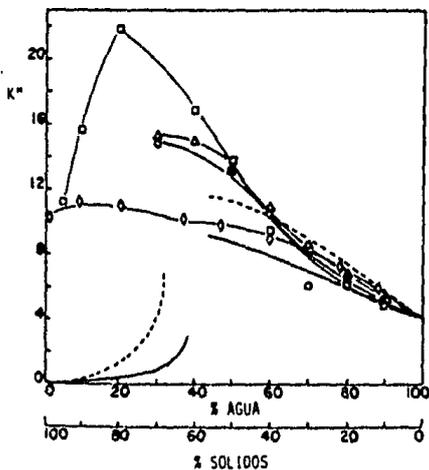


Fig. 1.6 Factor de pérdida dieléctrica de mezclas acuosas en función de la concentración a 1000 MHz y 25°C.

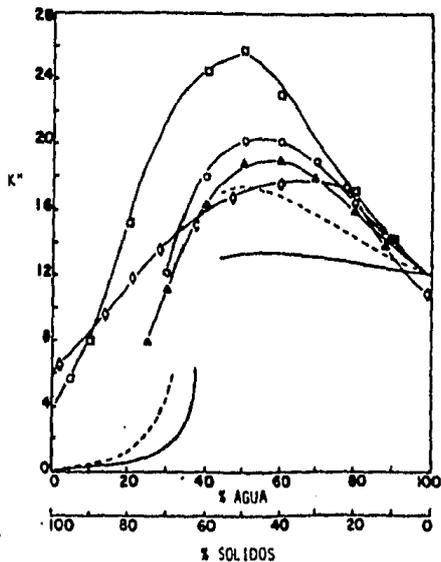


Fig. 1.7 Factor de pérdida dieléctrica de mezclas acuosas en función de la concentración a 3000 MHz y 25°C.

Tabla 1.3 Propiedades dieléctricas de geles de difco agar.

Concentración (% Peso)			Frecuencia					
Sólidos	Agua	Temp (°C)	1.0 GHz			3.0 GHz		
			ϵ'	$\tan \delta$	ϵ''	ϵ'	$\tan \delta$	ϵ''
0.0	100	5	85.1	0.090	7.70	80.2	0.275	22.06
		25	77.1	0.052	3.99	76.7	0.157	12.04
		45	71.4	0.031	2.20	70.7	0.106	7.49
		65	65.0	0.022	1.40	64.0	0.076	4.90
0.48	99.52	5	85.0	0.094	7.98	79.8	0.280	22.3
		25	76.6	0.059	4.50	76.3	0.160	12.2
		45	71.1	0.039	2.90	70.4	0.109	7.7
		65	65.4	0.032	2.10	64.0	0.081	5.2
0.89	99.11	5	84.5	0.097	8.20	79.3	0.288	22.8
		25	76.8	0.064	4.90	76.0	0.163	12.4
		45	71.2	0.048	3.42	70.3	0.111	7.8
		65	65.1	0.046	3.00	64.4	0.090	5.8
2.30	97.70	5	84.1	0.102	8.56	77.4	0.302	23.4
		25	75.5	0.080	6.06	74.8	0.171	12.8
		45	70.4	0.075	5.31	70.1	0.123	8.6
		65	66.7	0.076	5.10	64.1	0.098	6.3
2.68	97.32	5	84.4	0.112	9.50	77.1	0.307	23.7
		25	75.2	0.088	6.58	74.5	0.169	12.6
		45	70.6	0.082	5.82	69.8	0.126	8.8
		65	66.5	0.087	5.78	64.5	0.102	6.6

Tabla 1.4 Propiedades dieléctricas de geles de agarosa.

Concentración (% Peso)			Frecuencia					
Sólidos	Agua	Temp (°C)	1.0 GHz			3.0 GHz		
			ϵ'	$\tan \delta$	ϵ''	ϵ'	$\tan \delta$	ϵ''
0.0	100	5	85.1	0.090	7.70	80.2	0.275	22.06
		25	77.1	0.052	3.99	76.7	0.157	12.04
		45	71.4	0.031	2.20	70.7	0.106	7.49
		65	65.0	0.022	1.40	64.0	0.076	4.90
0.57	99.43	5	84.6	0.092	7.80	79.6	0.281	22.4
		25	76.8	0.054	4.16	76.4	0.160	12.2
		45	71.3	0.037	2.61	70.5	0.106	7.5
		65	65.3	0.026	1.70	63.3	0.079	5.0
0.98	99.02	5	84.4	0.094	7.91	79.0	0.286	22.6
		25	76.6	0.056	4.29	76.1	0.159	12.1
		45	71.4	0.040	2.88	70.5	0.111	7.8
		65	65.7	0.030	2.01	63.8	0.080	5.1
1.81	96.19	5	84.0	0.096	8.05	77.4	0.297	23.0
		25	75.6	0.060	4.50	75.5	0.163	12.3
		45	71.0	0.051	3.62	70.2	0.114	8.0
		65	66.4	0.033	2.20	63.4	0.082	5.2
2.43	97.57	5	83.2	0.098	8.20	77.0	0.302	23.3
		25	75.2	0.063	4.75	73.2	0.164	12.0
		45	70.9	0.058	4.10	70.2	0.114	8.0
		65	66.2	0.041	2.72	63.2	0.084	5.3

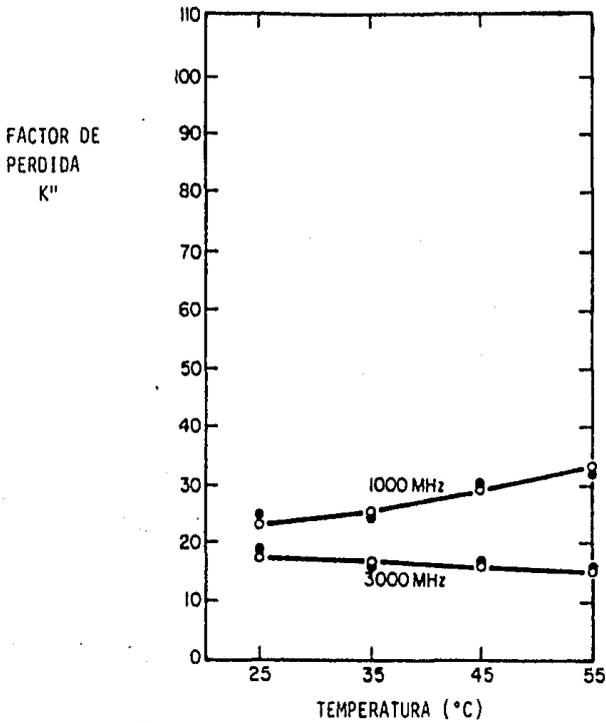


Fig. 1.8 Factor de pérdida dieléctrica en función de la temperatura para leche descremada a 1000 MHz y 3000 MHz.

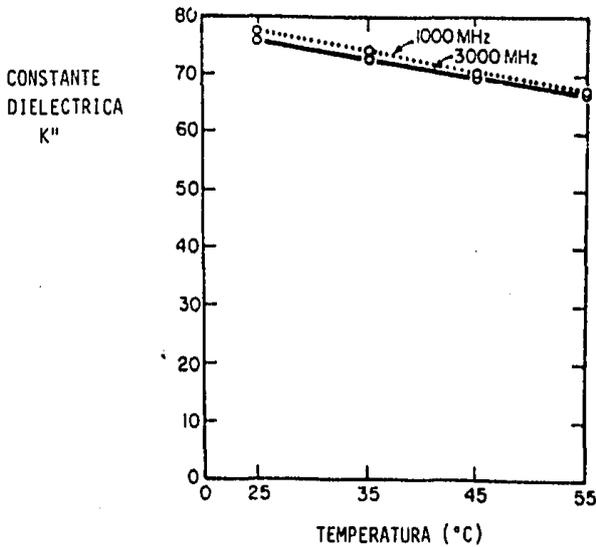


Fig. 1.9 Constante dieléctrica en función de la temperatura para leche descremada a 1000 MHz y 3000 MHz.

Tabla I.5 Propiedades dieléctricas de papas en función de la composición a 1000 MHz, 3000 MHz y 77° F.

	Frecuencia		Humedad volátiles (%)	Total de lípidos (%)	Contenido de Nitrogeno (%)	Cenizas (%)
	1,000 MHz	3,000 MHz				
ϵ'	65.1	57.3	79.5	0.192	0.340	0.116
$\tan\delta$	0.301	0.274				
ϵ''	19.6	15.7				
ϵ'	74.7	69.1	83.3	0.239	0.357	0.113
$\tan\delta$	0.351	0.247				
ϵ''	26.1	17.0				
ϵ'	70.3	62.9	81.2	0.211	0.348	0.113
$\tan\delta$	0.368	0.274				
ϵ''	24.8	17.2				

Tabla I.6 Propiedades dieléctricas de papas en función de la composición y la temperatura a 1000 MHz y 3000 MHz.

	Frecuencia		Temp. (°F)	Humedad volátiles (%)	Total de lípidos (%)	Contenido de Nitrogeno (%)	Cenizas (%)
	1,000 MHz	3,000 MHz					
ϵ'	5.76	5.18	77	15.3	19.1	1.24	3.35
$\tan\delta$	0.357	0.55					
ϵ''	2.06	2.85					
ϵ'	6.74	5.74	122	15.3	19.1	1.24	3.35
$\tan\delta$	0.373	0.66					
ϵ''	2.52	3.78					
ϵ'	7.30	6.48	178	15.3	19.1	1.24	3.35
$\tan\delta$	0.425	0.72					
ϵ''	3.10	4.66					
ϵ'	7.90	5.86	77	13.2	30.5	1.30	3.36
$\tan\delta$	0.202	0.257					
ϵ''	1.59	1.51					
ϵ'	.....	3.88	77	11.8	16.1	1.89	3.86
$\tan\delta$	.....	0.299					
ϵ''	.....	1.162					
ϵ'	3.90	3.80	71.6	8.3	27.0	1.39	3.12
$\tan\delta$	0.156	0.188					
ϵ''	0.61	0.71					
ϵ'	4.39	4.04	122	8.3	27.0	1.39	3.12
$\tan\delta$	0.257	0.184					
ϵ''	1.13	0.74					
ϵ'	4.61	4.23	178	8.3	27.0	1.39	3.12
$\tan\delta$	0.287	0.195					
ϵ''	1.33	0.83					
ϵ'	3.26	2.88	77	6.25	27.0	1.29	3.84
$\tan\delta$	0.208	0.102					
ϵ''	0.68	0.29					
ϵ'	1.888	1.860	70.7	2.6	35.9	1.35	3.43
$\tan\delta$	0.0344	0.0367					
ϵ''	0.065	0.068					
ϵ'	1.894	1.860	122	2.6	35.9	1.35	3.43
$\tan\delta$	0.0405	0.0440					
ϵ''	0.077	0.082					
ϵ'	1.980	1.910	176	2.6	35.9	1.35	3.43
$\tan\delta$	0.0458	0.0515					
ϵ''	0.090	0.098					
ϵ'	2.04	1.775	77	1.25	33.7	1.27	4.06
$\tan\delta$	0.073	0.0383					
ϵ''	0.15	0.068					

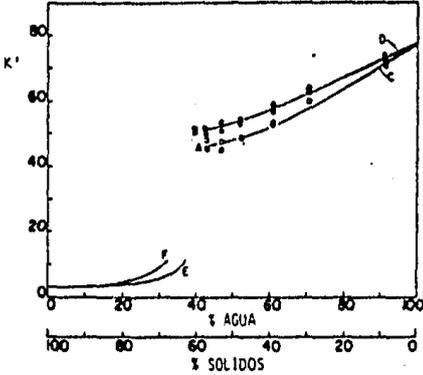


Fig. 1.9 Constante dieléctrica (K') para papas con almidón granuladas y gelatinizadas en función de la concentración a 1000 MHz y 25°C.

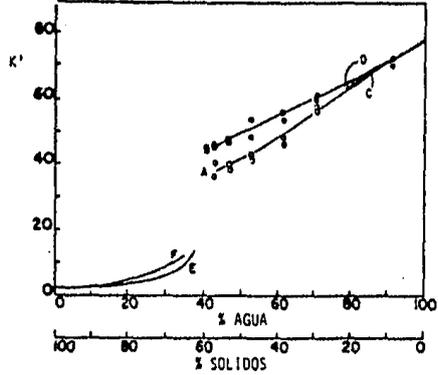


Fig. 1.10 Constante dieléctrica (K') para papas con almidón granuladas y gelatinizadas en función de la concentración a 3000 MHz y 25°C.

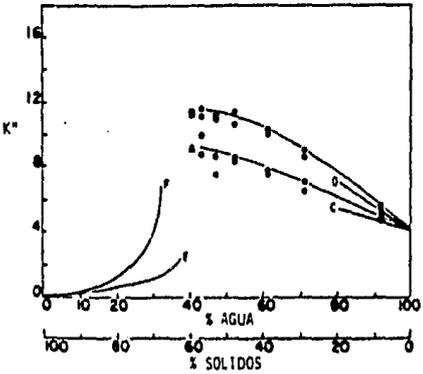


Fig. 1.11 Factor de pérdida dieléctrica (K'') para papas con almidón granuladas y gelatinizadas en función de la concentración a 1000 MHz y 25°C.

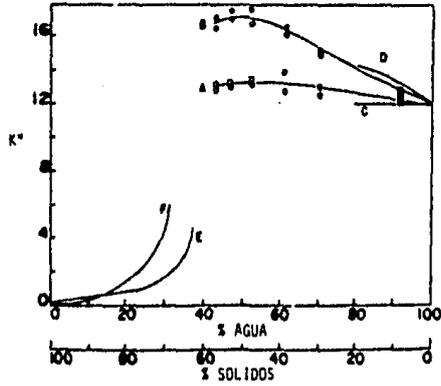


Fig. 1.12 Factor de pérdida dieléctrica (K'') para papas con almidón granuladas y gelatinizadas en función de la concentración a 3000 MHz y 25°C.

- GRANULAR (LINEAS A,C,E)
- GELATINIZADA (LINEAS B,D,F)

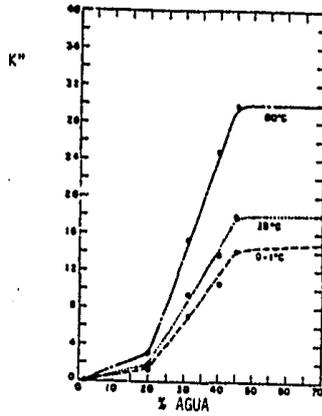


Fig. 1.13 Factor de pérdida dieléctrica (K'') de carne de res en función del contenido de agua a 915 MHz y tres temperaturas.

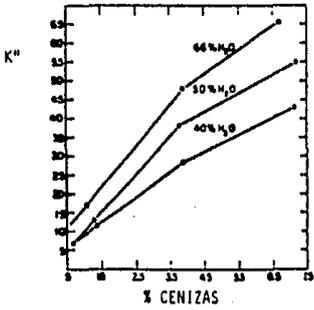


Fig. 1.14 Factor de pérdida dieléctrica (K'') de carne de res en función del contenido de cenizas a 915 MHz y 25°C.

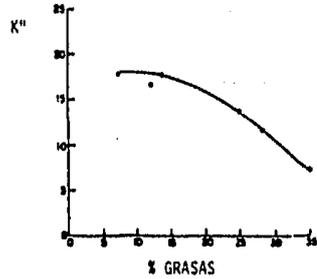


Fig. 1.15 Factor de pérdida dieléctrica (K'') de carne de res en función del contenido de grasa en igual relación de proteínas-cenizas y contenido de agua constante a 915 MHz y 25°C.

Tabla I.7 Propiedades dieléctricas de emulsiones de carne a 900 y 2800 MHz en función de su composición a 20°C.

% AGUA	% PROTEÍNAS	ϵ'_r 900 MHz	ϵ''_r 900 MHz	ϵ'_r 2800 MHz	ϵ''_r 2800 MHz
90	9	70.0	12.2	71.2	13.7
55	10	34.6	8.3	32.6	8.75
65	10	41.6	9.2	40.7	10.3
75	10	52.3	10.7	53.3	12.0
80	10	57.3	11.0	58.8	12.9
50	15	29.8	9.0	28.2	8.2
55	15	34.8	10.7	32.2	9.7
60	15	40.2	11.7	39.5	11.9
65	15	45.5	13.0	44.8	13.1
70	15	51.0	13.6	52.0	13.8
75	15	55.1	14.4	56.1	14.0
80	15	61.1	15.1	62.5	15.0
80	18	62.4	16.8	62.9	15.7
55	20	35.3	12.2	31.7	11.0
60	20	40.2	13.5	38.9	12.6
65	20	44.8	14.2	44.3	13.9
70	20	50.3	15.1	51.3	14.9
75	20	56.6	16.3	57.6	15.7
61.2	23.5	41.4	14.8	39.3	13.7
73.8	24.1	56.9	18.3	57.9	17.3
50	25	32.3	12.5	28.5	10.2
55	25	35.5	13.4	31.2	11.5
65	25	46.7	16.8	45.7	15.6
70	25	51.6	17.3	52.4	16.6
65	30	46.2	17.9	45.7	16.3
0	0	2.58	0.18	2.77	0.18
15	0	8.32	0.4	9.94	1.4
25	0	13.3	0.67	15.6	2.32
35	0	20.5	0.96	22.5	3.29
50	0	30.7	1.54	30.4	5.16
65	0	42.5	1.94	43.1	6.25
75	0	52.3	2.55	57.0	7.0
85	0	66.4	3.1	68.9	9.2
100	0	77.5	3.77	78.5	11.6
55	5	33.8	5.3	33.7	7.4
65	5	42.2	6.2	43.5	8.8
75	5	51.0	7.0	52.4	9.6
85	5	67.1	8.7	69.7	11.7
90	5	69.5	8.6	71.3	12.0
85	10	62.6	11.9	63.6	12.1
45	15	24.0	7.8	24.1	6.55
45	20	25.3	8.9	24.8	7.4
40	25	23.1	8.5	21.8	6.9
45	25	29.4	11.8	26.8	8.9
45	30	29.5	11.7	24.5	9.1
55	30	38.1	15.0	31.0	12.2
35	35	16.9	6.6	17.6	5.7
50	35	30.8	13.6	26.8	10.0
55	35	35.7	14.7	29.3	11.6
25	45	12.6	4.4	12.8	4.2
45	45	29.4	12.9	25.0	9.8
50	50	29.9	5.7	26.7	7.9

Tabla I.8 Propiedades dieléctricas de alimentos semisolidos, en función del contenido de humedad, sales libres y temperatura a 915 MHz y 2450 MHz.

ALIMENTO	% HUMEDAD	CONCENTRACION DE SALES LIBRES (M)	T (°C)	915 MHz		2450 MHz	
				K'	K''	K'	K''
CARNE DE RES	72.8	0.15	25	62	27	61	17
			50	55	39	55	18
CARNE DE PUERCO	67.2	0.16	25	59	26	58	16
			50	52	38	52	17
JAMON	77.5	0.61	25	61	96	60	42
			50	54	140	53	55
PAPAS	76.4	0.09	25	65	19	64	14
			50	58	27	58	13
ZANAHORIAS	90.9	0.09	25	73	20	72	15
			50	65	28	65	14

Tabla 1.9 Propiedades dieléctricas de alimentos varios en función de su composición y temperatura a 900 MHz.

	CONTENIDO		-20°C		-10°C		+3°C		+20°C		+40°C		+60°C		
	DE	GRASA													
	HUMEDAD	%	ϵ_1'	ϵ_1''	ϵ_1'	ϵ_1''	ϵ_1'	ϵ_1''	ϵ_1'	ϵ_1''	ϵ_1'	ϵ_1''	ϵ_1'	ϵ_1''	
Carne cruda sin grasa. (res)	73.7	1.3	promedio $\pm \Delta$	4.8 0.1	0.82 0.05	6.2 0.05	1.84 0.02	59.0 0.7	19.7 0.25	58.0 0.6	21.9 0.25	55.0 0.6	25.9 0.27	50.9 0.5	31.2 0.33
Carne cruda con grasa. (res)	70.5	5.1	promedio $\pm \Delta$	4.5 0.1	0.62 0.03	6.1 0.2	1.71 0.10	53.9 1.2	18.0 0.34	52.5 1.3	20.2 0.42	49.2 0.9	24.6 0.62	47.4 0.9	29.5 0.92
Carne cocida (res)	66.6	1.9	promedio $\pm \Delta$	4.5 0.17	0.58 0.03	5.5 0.14	0.89 0.05	47.0 1.1	15.9 0.44	44.3 1.2	16.8 0.50	40.3 1.3	19.7 1.2	33.5 0.37	19.6 0.26
Pescado cocido	77.5	0.1	promedio $\pm \Delta$	4.5 0.06	0.61 0.04	5.5 0.1	1.10 0.07	54.2 1.3	17.1 0.42	51.2 1.5	18.0 0.71	48.0 1.5	20.6 0.85	43.5 1.5	23.6 1.0
Papa cruda	78.4	—	promedio $\pm \Delta$	4.0 0.16	0.36 0.04	4.8 0.16	0.86 0.07	69.5 0.8	18.3 0.43	64.9 1.7	19.3 0.78	59.2 1.4	22.2 0.72	53.4 1.5	25.6 0.94
Papa cocida	81.1	—	promedio $\pm \Delta$	3.8 0.08	0.28 0.02	4.8 0.27	0.86 0.14	71.5 1.5	18.9 0.61	68.3 1.6	19.9 0.77	63.5 1.7	22.8 0.94	58.8 1.8	25.8 1.5
Puré de papa	80.7	0.9	promedio $\pm \Delta$	4.0 0.18	0.35 0.015	5.2 0.16	0.98 0.04	66.7 1.7	22.9 0.28	63.5 1.5	25.5 0.35	59.5 1.4	30.5 0.78	53.6 1.4	38.1 1.1
Salsa (Gravy) ²	88.9	4.9	promedio $\pm \Delta$	4.6 0.1	1.42 0.13	6.5 0.26	4.4 0.36	73.0 0.7	31.2 0.39	67.5 0.5	41.9 0.45	57.4 0.7	64.2 1.1	-50 1.5	120 4.3
Aqua destilada			promedio $\pm \Delta$					82.8 0.4	7.0 0.10	78.7 0.4	4.2 0.13	71.9 0.3	2.4 0.09	66.1 0.5	1.5 0.04
NaCl 0.1M.			promedio $\pm \Delta$					81.5 0.6	17.8 0.35	76.9 1.1	20.6 0.42	71.2 0.6	25.6 0.43	64.1 0.8	31.2 0.53

¹ Intervalo de confianza 95%

² Contenido de cloruro de sodio 1.5%

Tabla I.10 Propiedades dieléctricas de carne, papas y zanahorias en función de la temperatura a 3000 MHz y 2800 MHz.

ALIMENTO		3000 MHz				2800 MHz			
		TEMPERATURA °C				TEMPERATURA °C			
		-20	-10	0	+20	+40	+60	+80	+100
CARNE DE RES CRUDA	K'	4,8	6,2	47,8	47,7	45,2	44,4	42,6	41,2
	tanδ	0,119	0,253	0,337	0,281	0,277	0,270	0,308	0,333
	K''	0,57	1,57	16,1	13,4	12,5	12,0	13,1	13,7
	α	6,66	16,05	58,92	49,29	47,24	45,78	50,90	54,02
CARNE DE RES COCIDA	K'	5,3	6,1	35,4*	35,4	43,0	41,8	40,7	39,06
	tanδ	0,125	0,161	0,387*	0,328	0,253	0,263	0,278	0,301
	K''	0,66	0,98	13,7*	11,6	10,9	11,0	11,3	11,9
	α	7,34	10,14	58,02*	49,37	42,30	43,27	45,01	47,48
PURE DE PAPA	K'	4,6	---	66,7*	64,6	60,6	56,3	54,2	52,9
	tanδ	0,07	---	0,382*	0,336	0,287	0,293	0,304	0,299
	K''	0,32	---	25,5*	21,7	17,4	16,5	16,5	15,8
	α	3,82	---	78,71*	68,52	56,76	55,82	56,85	55,12
ZANAHORIA	K'	4,2	5,5	75,6*	71,5	70,1	65,5	61,8	58,0
	tanδ	0,081	0,064	0,336*	0,250	0,168	0,180	0,202	0,231
	K''	0,34	0,35	25,4*	17,9	11,8	11,8	12,5	13,4
	α	4,24	3,83	73,92*	53,88	36,02	37,25	40,58	44,84

* -3 °C

Tabla I.11 Propiedades dieléctricas de salsa (gravy) y sopas vegetales a 3000 MHz y 2800 MHz

ALIMENTO		3000 MHz				2800 MHz			
		TEMPERATURA °C				TEMPERATURA °C			
		-20	-10	0	+20	+40	+60	+80	+100
SALSA (GRAVY)	K'	5,2	9,2	76,9	73,4	76,4	75,5	73,6	70,4
	tan δ	0,250	0,467	0,364	0,360	0,315	0,352	0,356	0,374
	K''	1,3	4,3	27,7	26,4	24,1	26,6	26,2	26,3
	α	14,5	35,45	80,12	77,83	69,88	77,37	77,16	79,08
SOPA DE VERDURAS	K'	3,9	5,1	74,7	70,2	65,8*	63,6*		
	tan δ	0,074	0,176	0,32	0,249	0,257*	0,286*		
	K''	0,29	0,9	23,9	17,5	16,9*	18,2*		
	α	3,76	10,28	70,06	53,17	53,01*	57,96*		

* 3000 MHz

Tabla 1.12 Propiedades dieléctricas de 11 aceites y grasas comerciales^a en función de la temperatura a 1000 y 3000 MHz.

		1,000 MHz			3,000 MHz		
		77°F ^b	120°F ^c	180°F ^d	77°F ^e	120°F ^f	180°F ^g
1	ϵ'	2.612	2.705	2.715	2.506	2.590	2.594
	$\tan\delta$	0.0644	0.0645	0.0517	0.0551	0.0643	0.0617
	ϵ''	0.168	0.174	0.140	0.138	0.168	0.160
2	ϵ'	2.638	2.703	2.713	2.526	2.567	2.587
	$\tan\delta$	0.0664	0.0643	0.0538	0.0566	0.0645	0.0630
	ϵ''	0.175	0.174	0.146	0.143	0.166	0.163
3	ϵ'	2.629	2.669	2.673	2.515	2.536	2.554
	$\tan\delta$	0.0650	0.0641	0.0547	0.0568	0.0651	0.0627
	ϵ''	0.174	0.171	0.146	0.143	0.165	0.160
4	ϵ'	2.584	2.651	2.656	2.486	2.527	2.541
	$\tan\delta$	0.0612	0.0600	0.0516	0.0509	0.0608	0.0583
	ϵ''	0.158	0.159	0.137	0.127	0.154	0.148
5	ϵ'	2.531	2.568	2.610	2.430	2.454	2.492
	$\tan\delta$	0.0582	0.0567	0.0512	0.0487	0.0582	0.0576
	ϵ''	0.147	0.146	0.134	0.118	0.143	0.144
6	ϵ'	2.596	2.630	2.662	2.491	2.529	2.546
	$\tan\delta$	0.0578	0.0575	0.0519	0.0497	0.0583	0.0573
	ϵ''	0.150	0.152	0.138	0.124	0.147	0.146
7	ϵ'	2.530	2.654	2.665	2.420	2.534	2.550
	$\tan\delta$	0.0582	0.0576	0.0514	0.0482	0.0578	0.0571
	ϵ''	0.147	0.153	0.137	0.117	0.146	0.146
8	ϵ'	2.622	2.620	2.628	2.497	2.499	2.515
	$\tan\delta$	0.0625	0.0588	0.0522	0.0533	0.0600	0.0587
	ϵ''	0.164	0.154	0.137	0.133	0.150	0.148
9	ϵ'	2.550	2.649	2.657	2.466	2.521	2.546
	$\tan\delta$	0.0616	0.0557	0.0507	0.0511	0.0568	0.0570
	ϵ''	0.157	0.148	0.135	0.126	0.143	0.145
10	ϵ'	2.615	2.655	2.637	2.498	2.539	2.526
	$\tan\delta$	0.0625	0.0606	0.0547	0.0532	0.0597	0.0588
	ϵ''	0.163	0.161	0.144	0.133	0.152	0.148
11	ϵ'	2.601	2.655	2.660	2.487	2.536	2.546
	$\tan\delta$	0.0624	0.0607	0.0549	0.0507	0.0599	0.0590
	ϵ''	0.162	0.161	0.143	0.126	0.152	0.150

^a La descripción de estos aceites y grasas se presenta en la tabla 1.13.

^{b, e} Rango de temperatura (77-80.6)°F (25-27)°C.

^c Rango de temperatura (121-127.4)°F (49.4-53)°C.

^d Rango de temperatura (172.9-184)°F (78.2-84.4)°C.

^f Rango de temperatura (121-127.4)°F (49.4-53)°C.

^g Rango de temperatura (172.9-184)°F (78.2-84.4)°C.

Tabla I.13 Descripción de grasas y aceites comerciales de la tabla I.12

1 Aceite de soya	Refinado, Blanqueado y Deodorizado
2 Aceite de maiz	Refinado, Blanqueado y Deodorizado
3 Aceite de algodón	Refinado, blanqueado y Deodorizado
4 Manteca de puerco	Deodorizada
5 Sebo	Deodorizado para freido
6 Tex 425	Mezcla de grasas animales y vegetales
7 Kremit	Hidrogenado de grasas vegetales
8 Aceite esp. 522	De algodón parcialmente Hidrogenado para freir
9 Kremax	De grasas vegetales selectivamente Hidrogenado para freir
10 Aceite de tocino extraido convencionalmente	
11 Aceite de tocino extraido por microondas	

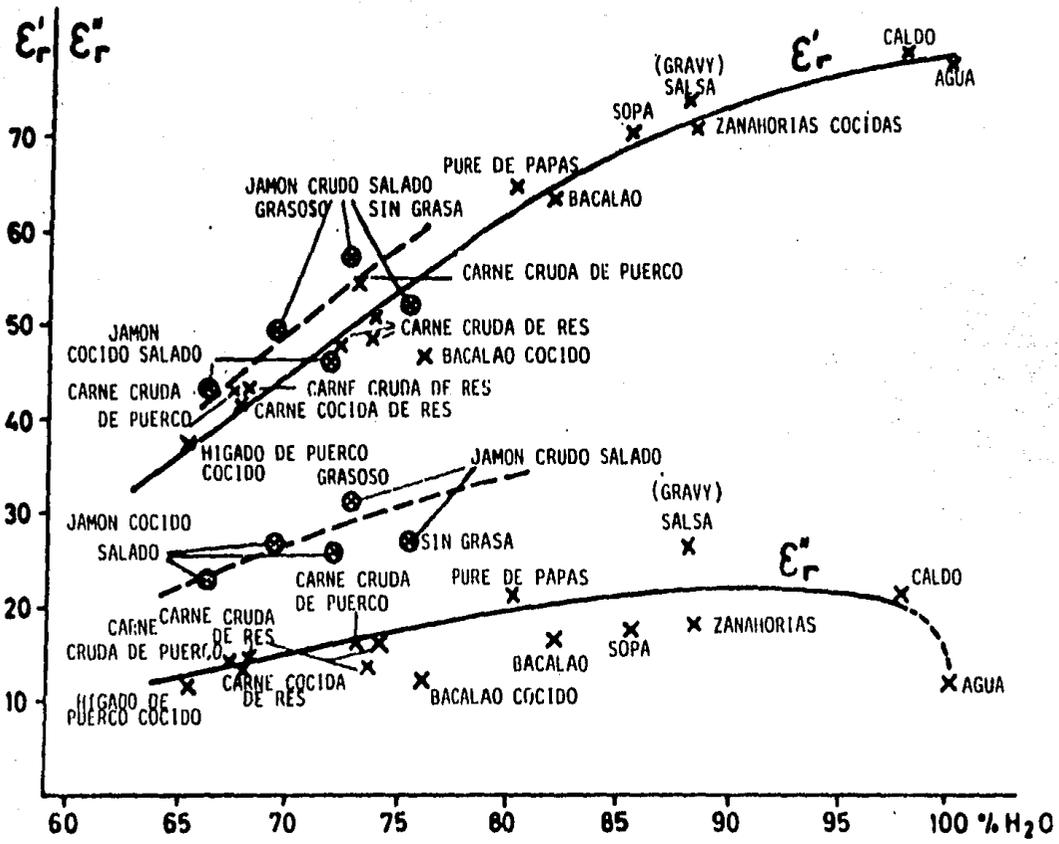


Fig. I.16 Propiedades dieléctricas de alimentos a 20 °C y 2800 MHz. Los círculos indican alimentos salados.

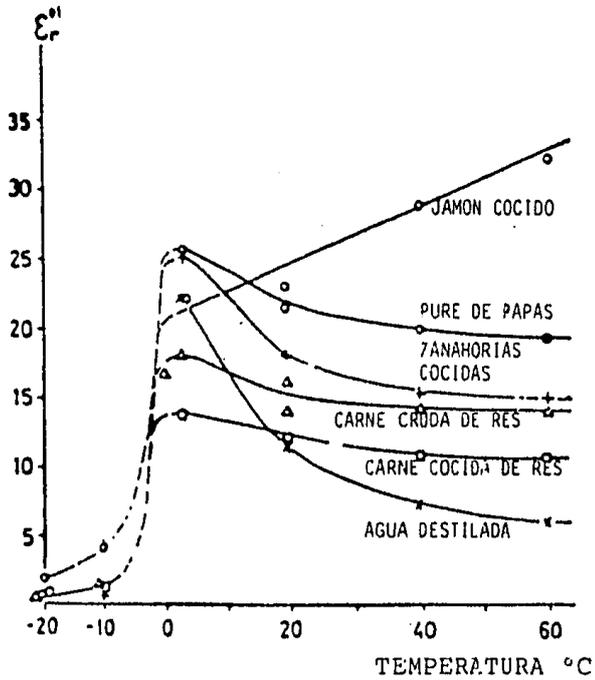
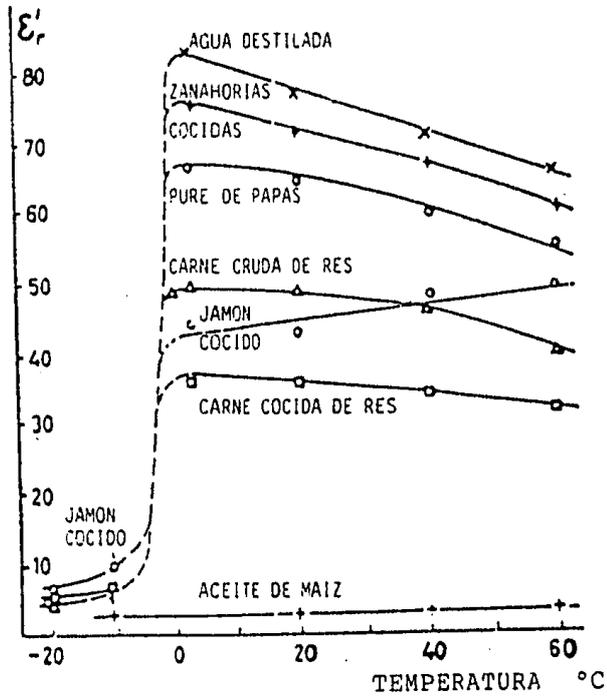


Fig. I.17 Variación de la constante dieléctrica (ϵ' ó K') y el factor de pérdida dieléctrica (ϵ'' ó K'') con la temperatura para alimentos a 2800 MHz.

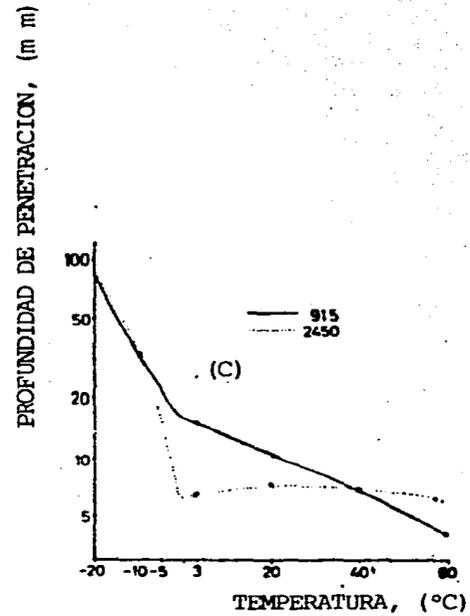
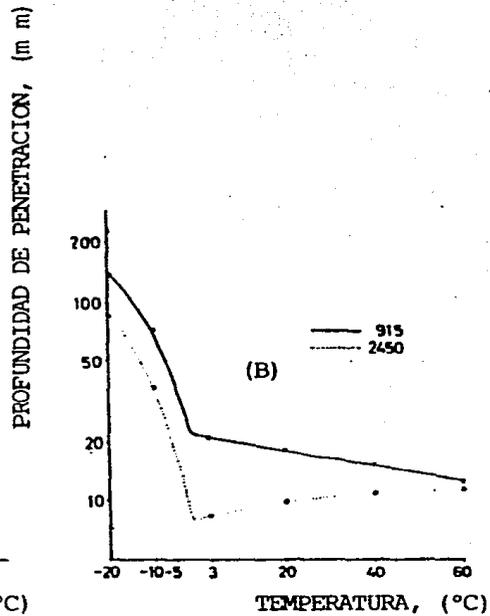
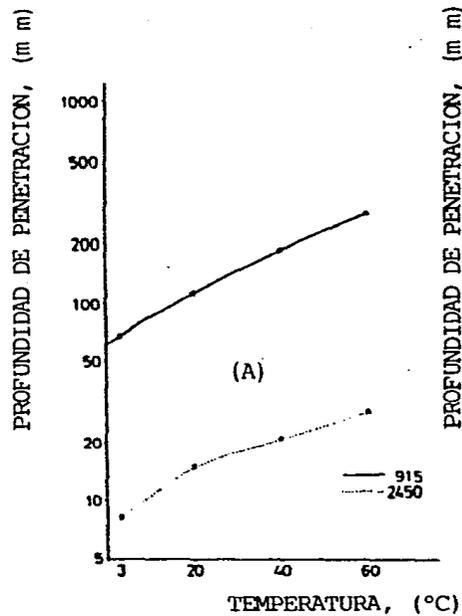


Fig. I.18 Profundidad de penetración de la energía de microondas en función de la temperatura y frecuencia para: (A) agua, (B) carne cruda de res, (C) salsa (gravy).

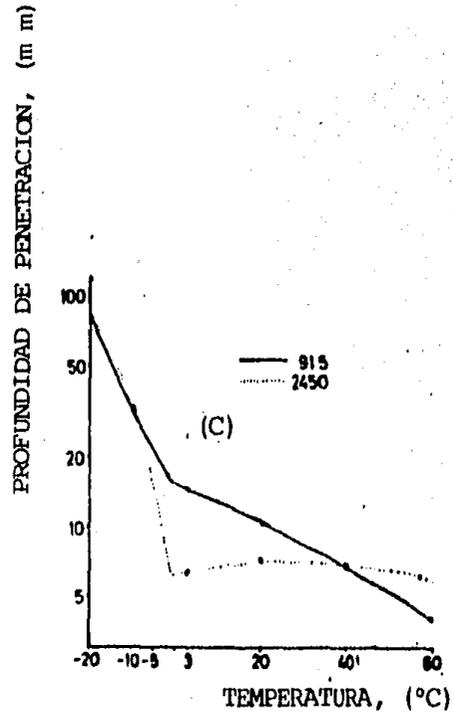
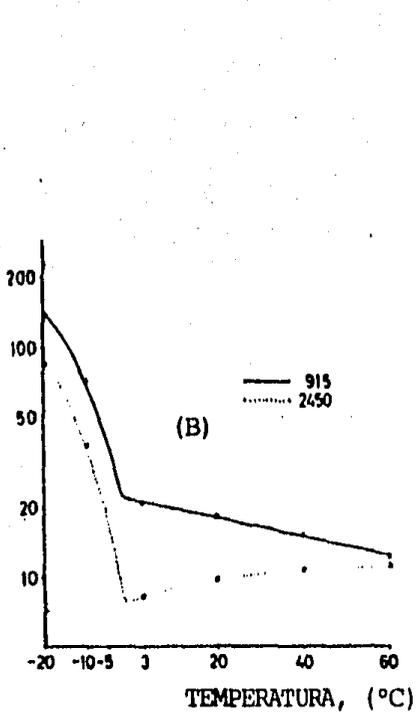
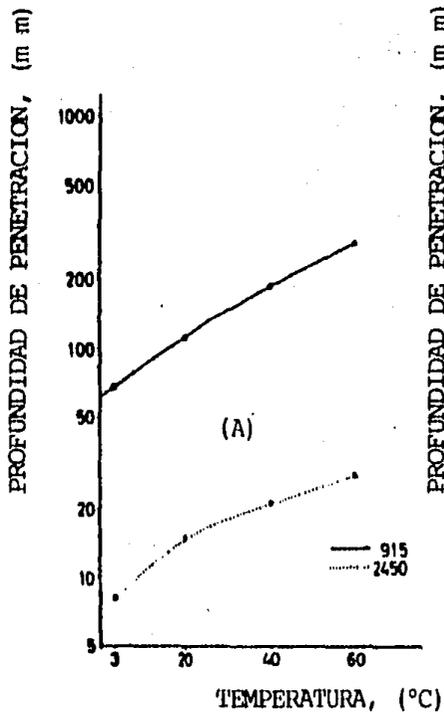


Fig. I.18 Profundidad de penetración de la energía de microondas en función de la temperatura y frecuencia para: (A) agua, (B) carne cruda de res, (C) salsa (gravy).

R I B L I O G R A F I A

- 1) Albrecht N. K. and Purchase M. E. " A comparasion of methods for determining the wattage output and energy distribution in microwaves ovens," IEEE Transactions on industry applicatons, Vol. IA-13, No. 4, July/August, pp. 335-342, 1977.
- 2) Allaire Royal P. " Potencial application for the microwave," Food Technology --- pp. 1222-1224, August, 1965.
- 3) Ayoub John A., Berkowitz D., Kenyon E. M. and Wadsworth C. K. " Continuous microwave sterilization of meat in flexible pouches," J. Food Sci. Vol. 39 pp. 309-313, 1974.
- 4) Bengtsson N. E. and Green W. " Radio-frequency pasteurization of cured hams," J. Food Sci., Vol. 35, pp. 681-687, 1970.
- 5) Bengtsson N. E. and Ohlsson T. " Microwave heating in the food industry," Proceeedings of the IEEE, Vol. 62, No. 1 January, pp. 44-54, 1974.
- 6) Collison R. and Beer N. J. " Energy utilization during microwave cooking," J. Food Technol., Vol. 15, pp. 455-457, 1980.
- 7) Copson David A. " Microwave heating," Avi publishing Co. Westport, Conn. U.S.A. 1975.
- 8) Charm S. E. " Fundamentals of food engineering," Avi publishing Co. Westport, Conn. U.S.A. 1978.
- 9) Daly P. N. " Microwave-compatible food service products," Food Technol., Vol. 25, September, pp. 918-921, 1971.
- 10) Geddes J. P. "Seek new uses for microwave," Food Eng., April, pp. 62-65, 1967.
- 11) Goldblith S. A. "Basic principles of microwave and recent developments," Advanes in food research, 15, pp. 277-296, 1967.
- 12) Goldblith S.A. " Microwave and process design," Process Biochem, July, pp 37, 38, 1969.
- 13) Hammond L. H. " Economic evaluation of UHF dielectric vs. radiant heating for freeze-drying," Food technol., Vol. 21, May, pp. 735-743, 1967.
- 14) Hauck Harold S. " Desigh considerations for microwave oven cavities," IEEE Transactions on industry and general applications, Vol. IGA-6, No. 1, January/February, pp. 71-80, 1970.
- 15) Heisig Ch. G. and Kobe K.A. " Selective Melting of frozen solutions with radio - frequency power," Ind. Eng. Chem., Vol. 50, No. 10, October, pp. 1517-1520, 1958.

- 16) Herman A. W. " Introduction to microwave energy: Principles and applications," Report No. PB-217 377, NTIS, 1970.
- 17) Halliday D. and Resnick R. " Fisica" parte II, Ed. Continental, S. A., México 1977.
- 18) Hoover M. W. and Markantonatos A. " UHF dielectric heating in experimental acceleration of freeze-drying of foods," Food Technol., Vol. 20, No. 6, pp. 807-846, 1966.
- 19) Huxsoll C.C., Dietrich W.C. and Margan A. I. Jr. " Comparison of microwave with steam or water blanching of corn-on-the-cob," Food Technol., Vol. 24, No. 3, pp 290 296, 1970.
- 20) Jeppson M. R. " Consider microwaves," Food Engineering, pp. 49-52, November, 1964.
- 21) Johnston M.B. and Baldwin R. E. " Influence of microwave reheating on selected - quality factors of roast beef," J. Food Sci, Vol. 45, pp. 1460-1462, 1980.
- 22) Bookwalter G. N., Shukla T.P. and Kwolek W.F. " Microwave processing to destroy Salmonellae in corn-soy-milk Blends and effect on product quality," J. Food Sci., Vol. 47, pp. 1683-1686, 1982.
- 23) Kenyon E. M., Westcott D. E., La Casse P. and Gould J. W. " A system for continuous thermal processing of food pouches using microwave energy," J. Food Sci., Vol. 36, pp. 289-293, 1971.
- 24) Kern D. Q. " Procesos de Transferencia de calor," C. E. C. S. A., México, 1977.
- 25) Kirk D. and Holmes A. W. " The heating of foodstuffs in a microwave oven," J. Fd. Technol., Vol. 10, pp. 375-384, 1975.
- 26) Korschgen B. M., Berneking J. M. and Baldwin R. E. " Energy requirements cooking beef rib roast," J. Food Sci., Vol 45, pp. 1054-1055, 1980.
- 27) Krul L., Attema E. P. W. and de Haan C. D. " Modelling of microwave heating processes," Microwave power symposium, Jun. 28-30, pp. 77-79, 1978.
- 28) Lefevre S., Mangin B. and Resvan Y. " Industrial materials drying by microwave and hot air," Microwave power symposium, Jun. 28-30, pp. 65-67, 1978.
- 29) Lorenz K. and Dilsaver W. " Microwave heating of food materials at various Altitudes," J. Food Sci., Vol 41, pp. 699-702, 1976.
- 30) Maurer R. L., Tremblay M. R. and Chadwick E. A. " Microwave processing of pasta," Food Technol., Vol. 25, No. 12, pp. 1244-1249. 1971.
- 31) Mc. Cabe W. L. and Smith J. C. " Operaciones básicas de Ingeniería Química," Ed. Reverte, S. A., España, 1978.
- 32) Mai J., Tsai C.-H., Armbruster G., Chu P. and Kinsella J. E. " Effects of microwave cooking on food fatty acids: No evidence of Chemical alteration or isomerization," J. Food Sci., Vol. 45, pp. 1753-1755, 1980.

- 33) Manwaring J. " What H-F heating is doing now," Food Engineering, August, pp 114-119, 1967.
- 34) Markus J. " Diccionario de Electrónica y tecnica nuclear," Ed. Marcombo, S. A., España, 1972.
- 35) Milson A. and Kirk D. " Principles of design and operation of catering equipment," Avi publishing Co. Westport, Conn. U.S.A. 1980.
- 36) Mcconnell D. R., Foerstner A. and Bucksbaum A. M. " Microwave-oven design for radiation safety," IEEE Transaction on Ind. and general applications, Vol. IGA-6, No. 6, Nov/Dec, pp. 681-688, 1970.
- 37) Moore L. J., Harrison D. L. and Dayton A. D. " Differences among top round steaks cooked by dry or moist heat in a conventional or a microwave oven," J. Food Sci., Vol. 45, pp. 777-781, 1980.
- 38) Mudgett R. E. " Electrical properties of food in microwave processing," Food Technol., February, pp. 109-115, 1982.
- 39) Mudgett R. E., Smith A. C., Wang D. I. C. and Goldblith S. A. " Prediction on the relative dielectric loss factor in aqueous solutions of nonfat dried milk through chemical simulation," J. Food Sci., Vol. 36, pp. 915-980, 1971.
- 40) Mudgett R. E., Wang D. I. C., and Goldblith S. A. " Prediction of dielectric properties in nonfat milk at frequencies and temperatures of interest in microwave processing," J. Food Sci., Vol. 39, pp. 52-54, 1974.
- 41) Mudgett R. E., Wang D. I. C. and Goldblith S. A. " Prediction of dielectric properties in oil-water and alcohol-water mixtures at 3000 MHz, 25°C based on pure component properties," J. Food Sci., Vol. 39, pp. 632-635, 1974.
- 42) Ohlsson T., Bengtsson N. E. and Risman P. O. " The frequency and temperature dependence of dielectric food data as determined by a cavity perturbation technique," J. of Microwave Power, Vol. 9, No. 2, pp. 129-145, 1974.
- 43) Ohlsson T., Henriques M. and Bengtsson N. E. " Dielectric properties of model meat emulsions at 900 and 2800 MHz in relation to their composition," J. Food Sci., Vol. 39, pp. 1153-1156, 1974.
- 44) Pace W. E., Westphal W. B. and Goldblith S. A. " Dielectric properties of comercial cooking oils," J. Food Sci., Vol. 33, pp. 30-36, 1968.
- 45) Pace W. E., Westphal W. B., Goldblith S. A. and Van Dyke D. " Dielectric properties of potatoes and potato chips," J. Food Sci., Vol. 33, pp. 37-42, 1968.
- 46) Pollak G. A. and Foin L. C. " Comparative heating efficiencies of a microwave and a convencional electric oven," Food Technol., pp. 454-457, 1960.
- 47) Potter N. N. " La ciencia de los alimentos," Edutex, S. A., México, 1973.

- 48) Rockwell W. C., Lowe E., Huxsoll C. C. and Morgan A. I. Jr. "Aparatus for experimental microwave processing," Food Technol., Vol. 21, pp. 1257-1258, September, 1967.
- 49) Roebuck B. D. and Goldblith S. A. " Dielectric properties of carbohydrate-water mixtures at microwave frequencies," J. Food Sci., Vol. 37, pp. 199-204, 1972.
- 50) Roebuck B. D. and Goldblith S. A. " Dielectric properties at microwave frequencies of agar gels," J. Food Sci., Vol. 40, pp. 899-902, 1975.
- 51) Sale A. J. H. " A riview of microwaves for food processing," J. Fd. Technol. Vol.11, pp. 319-329, 1976.
- 52) Schiffmann R. F., Roth H., Stein E. W., Kaufman B. Jr., Hochhauser A. and Clark F. " Application of microwave energy to doughnut production," Food Technol., Vol. 25, July, pp. 718-722, 1971.
- 53) Shrader R. L. "Comunicación Elctrónica," Mc Graw-Hill, México, 1975.
- 54) Snderland J. E. " An economic study of microwaves freeze-drying," Food Technol., February, pp. 50-56, 1982.
- 55) Van Dyke D., Wang D. I. C. and Goldblith S. A. " Dielectric loss factor of reconstituted ground beef: The effect of chemical composition," Food Technol., Vol. 23, July, pp. 994-946, 1969.
- 56) Von Hippel A. R. " Dielectric and waves," MIT Press, Cambridge Mass, 1954.
- 57) Von Hippel A. R. " Dielectric materials and applications," MIT Press Cambridge Mass, 1954.
- 58) Young V. J. " Las microondas," Ed. URMO, España, 1970.
- 59) " Microwaves dry pasta," Food Engineering, April, pp. 94-96, 1972.
- 60) "Microwave heating cooking and food preparation," NTIS/PS-79/0633, 1970-May 1979.
- 61) " Teams microwaves," Food Engineering, pp. 72-73, November, 1967.