

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Guayaba

4.1.1 Generalidades

La guayaba de nombre científico *Psidium guajava* es un miembro importante de la familia dicotiledónea de las Mirtáceas (Fig. 1). Se cree que se originó en América Central y en la parte meridional de México, pero en la actualidad crece en todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Somogyi *et al.*, 1996).

La guayaba es un árbol bajo o un arbusto de 2 a 8 m de altura, posee una copa amplia y extendida que se ramifica cerca del suelo. El tronco es corto con ramas bajas, de color verde a café claro y está cubierto de una corteza lisa y escamosa (Malo y Campbell, 1994). Las ramitas jóvenes son cuadrangulares. Las flores son hermafroditas, axilares que se presentan solitarias o en pequeños racimos; dan origen al fruto por autofecundación o polinización cruzada (Baraona y Sancho, 1992). La fruta puede ser redonda como una manzana, o puede estrecharse en un extremo como una pera (Teubner *et al.*, 1990). Posee una cáscara de textura rugosa de color amarillo, de aroma intenso y muy persistente (García-Rivas, 1991). La pulpa puede ser blanca, rosada, amarilla o roja, de sabor dulce a ácido; puede contener pocas o muchas semillas. En estado silvestre, se encuentran frutas de 3 a 10 cm de diámetro y de 50 a 500 g (Jagtiani *et al.*, 1988); pero bajo cultivo, el tamaño se puede incrementar hasta 12.7 cm y el peso hasta 680 g (Luh, 1980).



Fig. 1 Guayaba *Psidium guajava* (Hipernatural, 2009)

En promedio, un árbol de guayaba produce en su primer año 100 frutos, alcanzando una fase de maduración en su quinto año cuando es capaz de producir 500 frutos y a partir de entonces mantiene ese nivel durante el resto de su vida. Su crecimiento y desarrollo se ve favorecido en aquellos lugares donde se mantienen temperaturas entre los 16 y 34 °C, con un factor de humedad relativa entre 36 y 96%. Se recomienda su cultivo en la franja tropical y en zonas subtropicales que no rebasen los 1,400 metros sobre el nivel del mar con una precipitación anual de 1,100 a 1,800 mm³ (SIAP, 2009).

4.1.2 Composición nutricional y bioquímica

A causa del bajo contenido de semillas de la guayaba (1.6-4.4 %), su porción comestible es relativamente alta (Tabla I), lo cual no sólo incrementa su rendimiento para propósitos de procesamiento sino también incrementa su atractivo nutricional.

La guayaba es una excelente fuente de ácido ascórbico con valores arriba de 100 mg/100 g. También es una excelente fuente de niacina, la porción comestible contiene más de 1 mg/100 g. Contiene calcio, hierro, fósforo, vitaminas como la riboflavina y fibra (Jagtiani *et al.*, 1988).

Tabla I. Contenido nutricional guayaba. Valores para una porción de 100 g (INEGI, 2009)

Composición guayaba	
Porción comestible	82%
Energía	51 kcal
Humedad	86.10%
Proteínas	0.8 g
Grasa	0.6 g
Cenizas	11.8 g
Carbohidratos	11.9 g
Fibra	5.6 g
Calcio	20 mg
Hierro	0.3 mg
Fósforo	25 mg
Retinol	32 mg
Ácido Ascórbico	183 mg
Tiamina	0.1 mg
Rivoflavina	0.1 mg
Niacina	1.2 mg

Ácidos orgánicos. Los ácidos orgánicos no volátiles en purés de guayaba congelados fueron reportados por Chan *et al.* (1971). La cromatografía de capa fina de los ácidos mostró la presencia de ácido láctico, málico, cítrico, ascórbico y galacturónico. Los ácidos cítrico y málico estuvieron presentes casi en las mismas cantidades y el ácido láctico estuvo presente en cantidades mucho menores en guayabas cultivadas. En guayabas silvestres, el ácido cítrico fue el ácido predominante con menores cantidades de ácido málico y láctico. La acidez titulable de purés de guayabas cultivadas y guayabas silvestres fue de 18.40 y 14.08 miliequivalentes por 100 g, respectivamente (Luh, 1980).

Azúcares. Aproximadamente el 40 % de los carbohidratos totales son azúcares, los cuales incluyen fructosa como el azúcar predominante, seguidos por glucosa y fructosa (Luh, 1980; Somogyi *et al.*, 1996).

Constituyentes volátiles. Los componentes volátiles de puré de guayaba congelado fueron estudiados por Stevens *et al.* (1970). Los constituyentes fueron separados por cromatografía de gases y fueron dirigidos a un espectrofotómetro de masas vía separador molecular. El hexanol y cis-3-hexano-1-1 estuvieron presentes en altas concentraciones. Se identificaron otros alcoholes pero en cantidades más pequeñas como el 2-metil-1-propanol, l-pentel-3-ol, l-pentanol, l-octanol y l-nonanol. Otra característica del aceite de guayaba es el número presente de compuestos aromáticos, particularmente los ésteres. Una pequeña cantidad de benzaldehído está presente. Los compuestos aromáticos metil benzoato, β -fenil-etil acetato, metil cinamato y cinamil acetato están presentes y probablemente contribuyen al agradable aroma frutal de la guayaba. Uno de los compuestos de los cuales sin duda contribuyen al aroma floral es el β -ionone. Pequeñas cantidades de limoneno y citral también están presentes y son ejemplos de los terpenos encontrados en la guayaba.

4.2 Producción nacional e internacional de guayaba

La India encabeza la producción de guayaba fresca en el mundo con un estimado de 2.1 millones de toneladas de fruta fresca. Otros principales productores de fruta fresca o

procesada son México, Pakistán, China Egipto, Brasil, África del sur, Venezuela, República Dominicana, Kenya, Puerto Rico, Jamaica, Australia y Hawai (Jagtiani *et al.*, 1988).

México ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en producción de guayaba con el 6.1 por ciento de la oferta internacional, lo que equivale a 290 300 toneladas (Fig. 2); superado por India, China y Pakistán (SAGARPA, 2009).

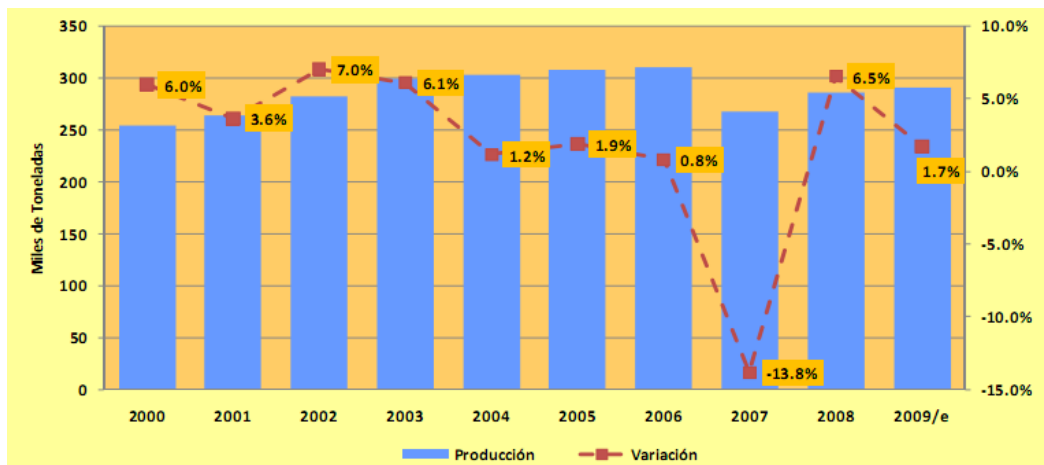


Fig. 2 Producción de guayaba en México 2000-2009 (SIAP, 2009)

Esta fruta se cultiva en poco más de 22,100 hectáreas localizadas en 22 estados del país, destacando por su aportación los estados de Michoacán, Aguascalientes, Zacatecas, Estado de México, Jalisco y Querétaro (Fig. 3), siendo el valor de la producción del orden de 1,165,000 de pesos.

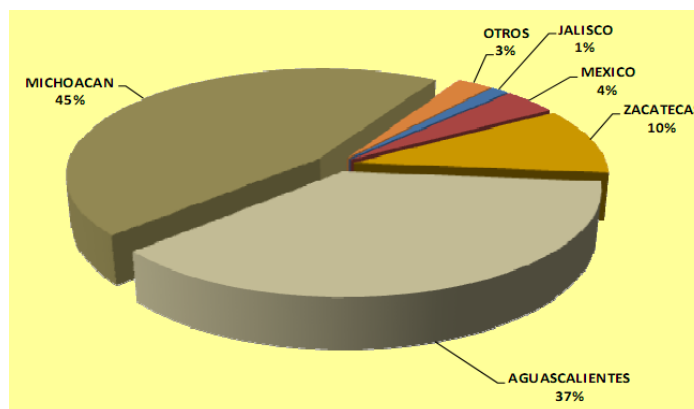


Fig. 3 Participación estatal en la producción nacional de guayaba en el 2008 (SIAP, 2009)

El cultivo de este producto se lleva a cabo por un poco más de 10 mil familias campesinas, en una superficie cercana a las 23 mil hectáreas (Tabla II). Los rendimientos unitarios promedio son de 13 toneladas por hectárea y con un precio en el mercado por arriba de 3900 pesos por tonelada (Senado de la República, 2007).

Tabla II. Producción nacional de guayaba 2000-2008 (SIAP, 2009)

Período	Sup. Sembrada (Ha)	Sup. Cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)	PMR (\$/Ton)	Valor Producción (Miles de Pesos)
2000	20,618.87	19,333.87	254,159.97	13.15	\$ 3,106.5	789,536.97
2001	20,444.55	19,993.80	263,413.63	13.17	\$ 3,054.5	804,588.28
2002	22,827.86	22,034.11	281,945.56	12.8	\$ 3,064.3	863,959.72
2003	23,317.36	22,630.86	299,173.46	13.22	\$ 2,773.6	829,774.00
2004	23,386.74	22,608.49	302,648.65	13.39	\$ 2,600.8	787,113.25
2005	23,561.49	23,071.99	308,380.47	13.37	\$ 2,772.6	855,016.24
2006	23,878.79	23,206.29	310,920.90	13.4	\$ 3,440.6	1,069,738.46
2007	23,620.89	22,841.39	267,911.71	11.73	\$ 3,997.5	1,070,980.59
2008	22,373.59	21,497.84	285,434.83	13.28	\$ 4,082.1	1,165,166.99

De acuerdo con la SAGARPA (2009), entre las 20 frutas más importantes que se producen en México, la guayaba destaca por su relevante creación de empleos al generar alrededor de cuatro millones de jornales y 24 500 empleos directos.

4.3 Exportación de guayaba

Durante los dos últimos años, la producción de guayaba ha adquirido importancia económica en términos del valor de las exportaciones.

En 2008, las exportaciones a los mercados de Estados Unidos, Canadá, Japón, España, Francia y Guatemala alcanzaron las 1,333.1 toneladas con un valor de 1.1 millones de dólares (Fig. 4). De enero a septiembre del 2009, se exportaron más de 1,900.2 toneladas de guayaba con un valor 3.9 millones de dólares; siendo el principal mercado de exportación la región de América del Norte (SIAP, 2009).

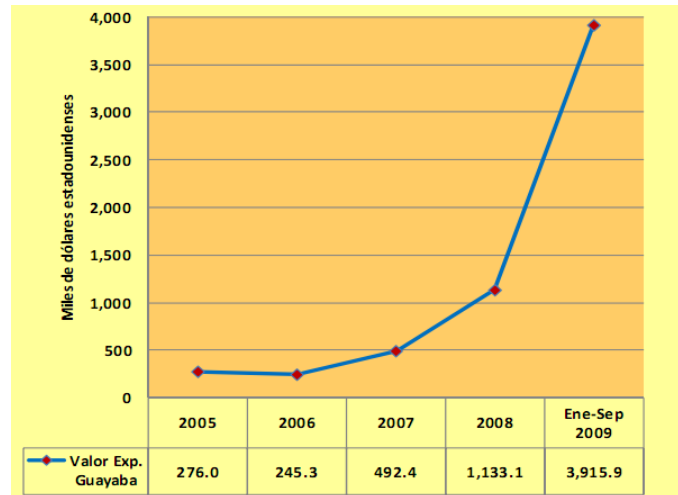


Fig. 4 Valor de las exportaciones de guayaba en miles de dólares (SIAP, 2009)

4.4 Procesamiento de la guayaba

4.4.1 Puré de guayaba

El puré de guayaba es también conocido como pulpa de guayaba, es un producto líquido preparado mediante el molido o pulpeado de guayabas enteras. El puré es comúnmente utilizado en néctares, mezclas de jugos, jarabes, helado, mermeladas y gelatinas (Jagtiani *et al.*, 1988).

La fruta cosechada se madura generalmente a temperatura ambiente por dos o siete días. La guayaba madura, la cual se caracteriza por un color amarillo y un intenso olor, se prefiere como materia prima.

Las guayabas se colocan en una banda de inspección. Aquellas piezas seriamente estropeadas se descartan. La fruta que ha pasado la inspección se transporta hacia un sistema de lavado, el cual se conforma de una sección de remojo, una sección de cepillado y una sección de enjuagado en serie. La fruta lavada pasa a través de un rebanador y se alimenta en un pulpeador. El pulpeador remueve las semillas y el tejido fibroso forzando el producto a pasar por una malla de 0.6-1mm de acero inoxidable.

El puré puede ser procesado en néctar, jarabe, mermelada o puede ser pasteurizado en un intercambiador de calor tubular o de superficie raspada a 93-96 °C

por 36 segundos o a 88-90 °C por 60 s; enfriado en dos etapas de 4 °C y empacado en algún contenedor (Somogyi *et al.*, 1996).

4.4.2 Puré de guayaba congelado

Quizás la mejor forma de preservar el sabor y el color del puré de guayaba es congelando; el puré puede ser empacado y congelado sin ningún tratamiento posterior. No es necesario calentar el producto para inactivar las enzimas. Un congelador de agua-nieve debe ser instalado en la línea de procesamiento para enfriar el producto antes de ser llenado en los contenedores. La ventaja del pre-enfriamiento es que el puré se va a congelar más rápido manteniendo una mayor calidad. El puré debe ser congelado en un congelador de corriente de aire a aproximadamente a -29 °C y almacenado a -18 °C (Jagtiani *et al.*, 1988).

4.4.3 Jugo de guayaba clarificado

El jugo de guayaba clarificado puede ser usado en la fabricación de gelatina de guayaba o en varias bebidas de jugos (Jagtiani *et al.*, 1988). Es básicamente transparente y ligeramente colorado de rosa, amarillo o blanco, dependiendo de la variedad. La fruta es macerada y tratada con una preparación comercial de enzima péctica. La pulpa es pasada a través de una prensa hidráulica de placas para obtener un jugo. El jugo es rápidamente calentado en un intercambiador de calor para la inactivación de enzimas y clarificado a través de un filtro de placas. Finalmente, el jugo clarificado es empacado y almacenado (Somogyi *et al.*, 1996).

4.4.4 Concentrado de guayaba

Puede ser ventajoso concentrar puré de guayaba o jugo de guayaba clarificado para almacenamiento a largo plazo o para envíos al extranjero. El equipo disponible para esta operación incluye a los evaporadores de película descendiente, evaporadores de película ascendente y un evaporador centrífugo. Generalmente el puré se somete a un pre-tratamiento de despectinización de enzima para reducir la viscosidad antes de empezar

el proceso de evaporación. Un puré despectinizado puede ser concentrado a 34 °Bx y permanece fluido en el evaporador. El jugo clarificado de guayaba se puede concentrar hasta 66 °C. La pérdida de sabor durante la evaporación puede ser remediada reduciendo la concentración del producto con jugo clarificado o puré fresco pasteurizado.

Para preservar el buen sabor y la calidad del color, los concentrados de guayaba deben ser envasados en empaques de baja permeabilidad de oxígeno y deben ser almacenados en congelación (Somogyi *et al.*, 1996).

4.4.5 Jarabe de guayaba

El puré de guayaba puede ser utilizado en la preparación de jarabes para impartir colores y sabores naturales deseables. Estos jarabes son satisfactorios para panqueques, waffles, helados, salsas, o para usos similares en postres.

Los jarabes de mesa generalmente contienen más del 65 % de azúcar, lo cual los hace resistentes al daño microbiológico. Sin embargo, se ha encontrado que se deben agregar agentes antimicrobianos para asegurar la estabilidad microbiológica requerida después de que se abre la botella. La formulación de un jarabe de guayaba es la siguiente: para 10 a 20 kg de puré de guayaba, se mezcla un jarabe de piña de 64 °Bx, después se le adicionan 20 kg de azúcar y la mezcla es calentada a 88 °C; después es vertida en contenedores de vidrio o latas. Los contenedores son sellados y calentados por tres minutos para esterilizar la tapa. Finalmente los contenedores son enfriados en un baño de agua (Jagtiani *et al.*, 1988).

4.4.6 Base para bebida de guayaba

El jugo de guayaba, puré o concentrados, pueden ser mezclados con azúcar y otros materiales para obtener bases de bebidas. Una base para diluirla en una bebida de frutas debe contener jugo de fruta o puré, y aditivos alimentarios como azúcar, ácidos de frutas, conservadores y material comestible para modificar el color, sabor y consistencia. Se requieren concentrados de jugo o purés para bases con una dilución prevista con 5

volúmenes de agua para dar una bebida que contenga 10 % o más de fruta. La formulación para una base para bebida de guayaba es la siguiente: 27.2 kg de puré de guayaba (25.4 °Bx), 18.1 kg de agua, 64.4 kg de azúcar, 1.5 kg de ácido cítrico, 56.7 g de benzoato de sodio, 56.7 g de sorbato de potasio y 283.5 g de goma tragacanto (Luh, 1980).

4.4.7 Néctar de guayaba

La Norma Mexicana NXM-F-078-S-1980 (1980) define al néctar de guayaba como el producto alimenticio, líquido, pulposo elaborado con el jugo y pulpa de guayabas (*Psidium guajava*) maduras, sanas, limpias, lavadas, finamente divididas y tamizadas, concentradas o no, congeladas o no, adicionadas de agua, edulcorantes nutritivos y aditivos alimentarios permitidos; envasado en recipientes herméticamente cerrados y sometido a un proceso térmico que asegure su conservación.

Para su formulación se requiere un contenido mínimo de 25 % de fruta, un contenido máximo de 20 % de sólidos solubles (Codex Alimentarius, 1985), un pH de 3.5-4 y una acidez titulable de 0.45 g de ácido cítrico/100 mL (NXM-F-078-S-1980, 1980). Podrán añadirse uno o más edulcorantes (sacarosa, dextrosa, jarabe de glucosa, jarabe de maíz) o miel, siempre y cuando se emplee como único ingrediente edulcorante añadido. Puede añadirse zumo de limón o de lima como agente acidificante, o los aditivos ácido cítrico, ácido málico y ácido fumárico. Algunos procesadores creen que la adición de pequeñas cantidades de ácido cítrico mejora el sabor natural de la guayaba (Luh, 1980). Se puede añadir ácido ascórbico como antioxidante en un máximo de 150 g/kg (Codex Alimentarius, 1985; NXM-F-078-S-1980, 1980).

El proceso de elaboración de néctar de guayaba consiste en extraer a las frutas la pulpa en la máquina despulpadora, empleando una malla con apertura de 0.5 mm. Posteriormente se pesa la cantidad de pulpa obtenida, se le determina el pH, °Bx y el porcentaje de acidez expresado en ácido cítrico. Después se formula en néctar cumpliendo con las características de la norma mencionadas anteriormente. Se mezclan perfectamente los ingredientes y se refina la mezcla, pasándola nuevamente por la

máquina despulpadora con la malla de 0.5 mm. El néctar se somete al tratamiento térmico y se procede a la etapa de envasado (Esquivel y Guerrero, 2004). La siguiente figura muestra las etapas que comprende la elaboración de néctar de guayaba:



Fig. 5 Diagrama de bloques para la elaboración de néctar de guayaba (Esquivel y Guerrero, 2004)

Algunos de los defectos más comunes en la elaboración de los néctares son:

Fermentación. Es el defecto más frecuente. Puede darse por frutas en mal estado, un pH inadecuado (control de pH= 3.5-4.0), por una pasteurización insuficiente o un cerrado deficiente del envase.

Separación de Fases. Se puede dar a causa de un pulpeado y/o refinado deficiente, por esta razón es importante controlar el tamaño del tamiz. Así también se puede dar por una adición excesiva de agua, inadecuada homogenización o falta de estabilizante.

Cambio de color. Las principales causas del cambio de color se deben a la adición excesiva de agua, exceso en el tiempo y/o temperatura de pasteurización o por una fermentación del néctar.

Cambio de sabor. El cambio de sabor se puede dar por una adición excesiva de ácidos orgánicos para controlar el pH. Así mismo se puede dar por la fermentación del néctar (Coronado-Trinidad e Hilario-Rosales, 2001).

El principal propósito de la pasteurización para productos hortofrutícolas, es alargar su vida útil reduciendo la carga microbiana e inhibiendo la actividad de las enzimas naturales. La enzima pectinmetilesterasa en la guayaba, es más resistente al calor que la enzima peroxidasa, la cual es un indicador enzimático en la pasteurización de productos hortofrutícolas; por lo tanto, la enzima pectinmetilesterasa es la que se debe tomar en cuenta como objetivo. Los valores D y z para la pectinmetilesterasa varían para distintas variedades. Por ejemplo los valores $D_{96\text{ }^\circ\text{C}}$ y z para la variedad de pulpa-rosa cultivada en India, son de 0.592 min y 16.6 °C, respectivamente; mientras que los valores $D_{90\text{ }^\circ\text{C}}$ y z para la variedad de pulpa blanca son de 0.054 min y 8.9 °C, respectivamente.

En Taiwán un proceso de pasteurización popular para néctar de guayaba, es calentar en un intercambiador de calor de placas a 93 °C y mantener por 36 s; enfriar hasta temperatura ambiente y llenar los envases. En refrigeración, se mantiene una excelente calidad durante dos semanas.

Otra forma de envasar el néctar de guayaba es llevar a cabo la esterilización comercial calentando hasta 93 °C, mantener por 45 s y llenar en latas de diferentes tamaños a una temperatura no menor a 86 °C. Después sellar las latas, invertir, dejar por tres minutos y enfriar a 40 °C con agua, y después enfriar con aire a temperatura ambiente. La vida útil mínima para néctar de guayaba enlatado en condiciones comunes de almacenamiento es de seis meses.

Durante el almacenamiento a temperatura ambiente de néctar de guayaba de pulpa blanca, el oscurecimiento no enzimático juega un papel importante en la deterioración de la calidad. El ácido ascórbico y los taninos están involucrados en la decoloración. La reducción del pH o la adición de L-cysteina en la formulación, puede reducir efectivamente la velocidad de oscurecimiento (Somogyi *et al.*, 1996).

4.4.7.1 Pectinmetilesterasa (PME) y parámetros cinéticos (D y z) como indicadores de efectividad del tratamiento térmico

La pectinmetilesterasa (PME, E.C.1.1.11), también conocida como pectinesterasa, pectasa y pectin-metiloxidasa es una enzima péctica que se encuentra en los tejidos de todas las plantas y muchos microorganismos como bacterias y mohos (Labib y El-Ashwah., 1995). Estas enzimas son muy específicas y catalizan la hidrólisis del grupo metoxilo de la pectina, formando ácido péctico con menor grado de esterificación como producto de la catálisis enzimática (Silva *et al.*, 2006; Terefe *et al.*, 2009). Este ácido péctico puede reaccionar con los iones de calcio presentes en el medio para formar complejos insolubles de pectato de calcio los cuales inducen a la pérdida de turbidez y provocan la clarificación de jugos de cítricos (De Assis *et al.*, 2001). Se ha encontrado que la resistencia térmica de la PME es mucho mayor que la de bacterias comunes y levaduras en jugos de cítricos, es por esto que su actividad de se ha utilizado como indicador para determinar la efectividad del proceso de pasteurización (Nath y Ranganna, 1977). De aquí la importancia de tener parámetros cinéticos de inactivación térmica exactos para el diseño del tratamiento térmico (Collet *et al.*, 2005).

En la mayoría de los estudios de cinética de inactivación térmica, se ha encontrado que la PME sigue una cinética de primer orden. Matemáticamente se expresa como:

$$\log_e \left(\frac{C}{C_0} \right) = -kt \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde C representa la actividad enzimática residual (U.E.A/mL), C_0 representa la actividad enzimática inicial, t y k representan el tiempo (s) y la constante cinética de reacción (s^{-1}) a una temperatura dada, respectivamente.

El tiempo de reducción decimal (valor D) se define con el tiempo de calentamiento requerido para lograr un 90 % de inactivación de la actividad inicial de la PME a una temperatura deseada. Este valor se relaciona con la constante cinética, y se define como:

$$D = \frac{2.303}{k} \quad (\text{Ec. 2})$$

El valor z representa la diferencia de temperaturas requerida para causar una reducción de un ciclo logarítmico en el valor D . Se define mediante la siguiente expresión:

$$z = \frac{T_2 - T_1}{\log D_1 - \log D_2} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde T_2 y T_1 son las temperaturas correspondientes a los valores de D_2 y D_1 (Tajchakavit y Ramaswamy, 1997).

La energía de activación E_a , describe la dependencia de la temperatura de la constante de velocidad de reacción; ésta se puede estimar por medio de la ecuación de Arrhenius:

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde k es la constante de velocidad de reacción a la temperatura T (en grados Kelvin); A es un factor pre-exponencial (número de choques por segundo); E_a es la energía de activación; R es la constante universal de los gases ($8.3145 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$) y $e^{-E_a/RT}$ es la fracción de moléculas del sistema a una temperatura particular T que tiene la energía de activación E_a medida (factor de Boltzman) (Silva *et al.*, 2006).

4.5 Buenas prácticas de manufactura durante el procesamiento

La aplicación de las prácticas adecuadas de higiene y sanidad en el procesamiento de alimentos reduce de manera importante el riesgo de intoxicaciones a la población consumidora, protege al producto obtenido contra contaminaciones ayudando a formar una imagen de calidad. Así mismo, evita al empresario sanciones legales por parte de la autoridad sanitaria.

La Norma Oficial Mexicana NOM-120-SSA1-1994 (1994) incluye los requisitos necesarios para ser aplicados en las empresas dedicadas a la obtención, elaboración, envasado, almacenamiento, distribución, manipulación y transporte de alimentos y bebidas, así como de sus materias primas y aditivos, a fin de reducir los riesgos para la salud del consumidor. Los puntos principales de esta norma se describen a continuación.

4.5.1 Higiene personal, control de enfermedades y hábitos personales

El personal o empleados que entren en contacto con materias primas, ingredientes, material de empaque, producto en proceso y terminado, equipos y utensilios, deben seguir las siguientes indicaciones:

- Presentarse aseados a trabajar
- Usar ropa limpia (incluyendo el calzado)
- Lavarse las manos y desinfectarlas antes de iniciar el trabajo, después de cada ausencia del mismo y en cualquier momento cuando las manos puedan estar sucias o contaminadas.
- Utilizar cubrebocas.
- Mantener las uñas cortas, limpias y libres de barniz de uñas.
- Usar protección que cubra totalmente el cabello, la barba y el bigote. Las redes, cofias, cubrebocas y otros aditamentos deben ser simples y sin adornos.
- Prescindir de plumas, lapiceros, termómetros, sujetadores u otros objetos desprendibles en los bolsillos superiores de la vestimenta en las áreas de producción y manejo de productos.
- Evitar que personas con enfermedades contagiosas, laboren en contacto directo con los productos.
- Evitar estornudar y toser sobre el producto.

En caso de usar mandiles y guantes se deben lavar y desinfectar, entre una y otra manipulación de producto. Se prohíbe fumar, mascar, comer, beber o escupir en las áreas de procesamiento y manejo de productos. No se deben usar joyas ni adornos (pinzas, aretes, anillos, pulseras, relojes, collares, etc.) que puedan contaminar el

producto. Solamente se permite el uso de broches pequeños y pasadores para sujetar el cabello cuando se usen debajo de una protección. Las cortadas y heridas deben cubrirse apropiadamente con un material impermeable, evitando entrar al área de proceso cuando éstas se encuentren en partes del cuerpo que estén en contacto directo con el producto y que puedan propiciar contaminación del mismo. Los visitantes, internos y externos deben cubrir su cabello, barba y bigote, además de usar ropa adecuada antes de entrar a las áreas de proceso que así lo requieran (NOM-120-SSA1-1994, 1994).

4.5.2 Instalaciones físicas y sanitarias

Debe evitarse que en los patios del establecimiento existan condiciones que puedan ocasionar contaminación del producto y proliferación de plagas, tales como equipo mal almacenado, basura, desperdicios, chatarra y formación de maleza o hierbas. Los drenajes deben tener cubierta apropiada para evitar entrada de plagas provenientes del alcantarillado o áreas externas.

El interior de los edificios debe ser construido con materiales, diseño y acabados que faciliten el mantenimiento, las operaciones de limpieza y la operación sanitaria de los procesos. Los pisos deben ser impermeables, homogéneos y con pendiente hacia el drenaje, suficiente para evitar encharcamiento y de características que permitan su fácil limpieza y desinfección. Si las paredes están pintadas, la pintura debe ser lavable e impermeable; no se permiten las paredes de madera. Las uniones del piso y la pared deben ser de fácil limpieza. En los techos se debe impedir la acumulación de suciedad y evitar al máximo la condensación, ya que ésta facilita la formación de mohos y bacterias. Las ventanas, ventilas y puertas deben estar provistas de protecciones en buen estado de conservación para reducir la entrada de polvo, lluvia y fauna nociva.

Los sanitarios deben estar provistos de retretes, papel higiénico, lavamanos, jabón, jabonera, secador de manos (toallas desechables) y recipiente para la basura. Se recomienda que los grifos no requieran accionamiento manual; éstos deben conservarse limpios, secos y desinfectados. Deben colocarse rótulos en los que se indique al personal que debe lavarse las manos después de usar los sanitarios.

Deben proveerse instalaciones convenientemente situadas para lavarse y secarse las manos siempre que así lo exija la naturaleza de las operaciones. Debe disponerse también de instalaciones para la desinfección de las manos, con jabón, agua y solución desinfectante o jabón con desinfectante (NOM-120-SSA1-1994, 1994).

4.5.3 Equipo y prácticas operativas

El equipo y utensilios deben mantenerse limpios en todas sus partes y, en caso necesario, desinfectarse con detergentes y desinfectantes efectivos. Deben limpiarse por lo menos una vez al final y desinfectarse al principio de la operación diaria. Todo el equipo y los utensilios empleados en las áreas de manipulación de productos y que puedan entrar en contacto con ellos, deben ser de un material inerte que no transmita sustancias tóxicas, olores ni sabores, que sea resistente a la corrosión y capaz de resistir repetidas operaciones de limpieza y desinfección. Las materias primas deben inspeccionarse y clasificarse antes de llevarlas a la línea de producción y en caso necesario, deben efectuarse pruebas de laboratorio. Todas las operaciones del proceso de producción, incluso el envasado, se deben realizar en condiciones sanitarias que eliminen toda posibilidad de contaminación; se debe cuidar que la limpieza realizada no genere polvo ni salpicaduras de agua que puedan contaminar los productos. Se deben tomar medidas para evitar la contaminación del producto por contacto directo o indirecto con material que se encuentre en otra etapa de proceso (NOM-120-SSA1-1994, 1994).

4.6 Calentamiento por microondas

El calentamiento por microondas es una tecnología emergente en el procesamiento de alimentos que se lleva a cabo debido al efecto de polarización de la radiación electromagnética para generar calor dentro de un material. Esta tecnología ha encontrado muchas aplicaciones en la industria de alimentos, presentando ventajas

importantes sobre los métodos convencionales como la reducción de tiempos de proceso, alta eficiencia energética y mejora de la calidad del alimento.

Desde el punto de vista físico, el calentamiento por microondas en alimentos es un proceso complicado que depende de la propagación de microondas, gobernada por las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas, de las interacciones entre microondas y alimentos, determinadas por las propiedades dieléctricas, y de la disipación de calor gobernada por las teorías básicas de transferencia de calor y masa (Tang *et al.*, 2002). La característica más importante del calentamiento por microondas es la capacidad única de crear calor dentro de un material la cual no es alcanzable por ningún otro medio de calentamiento convencional (Fu, 2004).

4.6.1 Propiedades de las microondas

Las microondas son energía electromagnética; esto significa que tienen un componente eléctrico y uno magnético (Parker, 2003); difieren de las otras radiaciones electromagnéticas por su longitud y frecuencia. Las microondas se encuentran entre las ondas de radio y las radiaciones infrarrojas con longitudes de onda entre 2.5 y 75 cm (Fig. 6). Las longitudes de onda de la energía electromagnética están relacionadas en forma inversa con la frecuencia, que es el número de oscilaciones por unidad de tiempo. Las longitudes de onda de las microondas corresponden a frecuencias entre 300 MHz y 300 GHz. La corriente eléctrica alterna normal, tiene una frecuencia de sólo 60 Hz (Potter, 1986; Ahmed & Ramaswamy, 2007). La radiación por microondas a menudo es llamada radiación no-ionizante para distinguirla de otras formas de radiación como los rayos-X y rayos Gamma, los cuales son llamados radiación ionizante debido a que rompen átomos o moléculas en dos grupos cargados eléctricamente (Parker, 2003).

Dado que las frecuencias de las microondas están muy cerca de las de las ondas de radio, y se enciman a las de la escala del radar, pueden obstaculizar los procesos de comunicación, de manera que el uso de determinadas frecuencias está sujeto a los lineamientos de agencias gubernamentales. En Estados Unidos, están reguladas por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC). Para su aplicación en alimentos, las

frecuencias aprobadas y comúnmente utilizadas son las de 2450 ± 50 y 915 ± 15 MHz. Frecuencias similares son reguladas en todo el mundo a través de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (Potter & Hotchkiss, 1998; Coronel *et al.*, 2008; Singh y Heldman, 2009). Los microondas domésticos operan a 2450 MHz, y los sistemas de procesamiento industrial usan 2459 MHz o 915 MHz (896 MHz en el Reino Unido) (Fu, 2004).

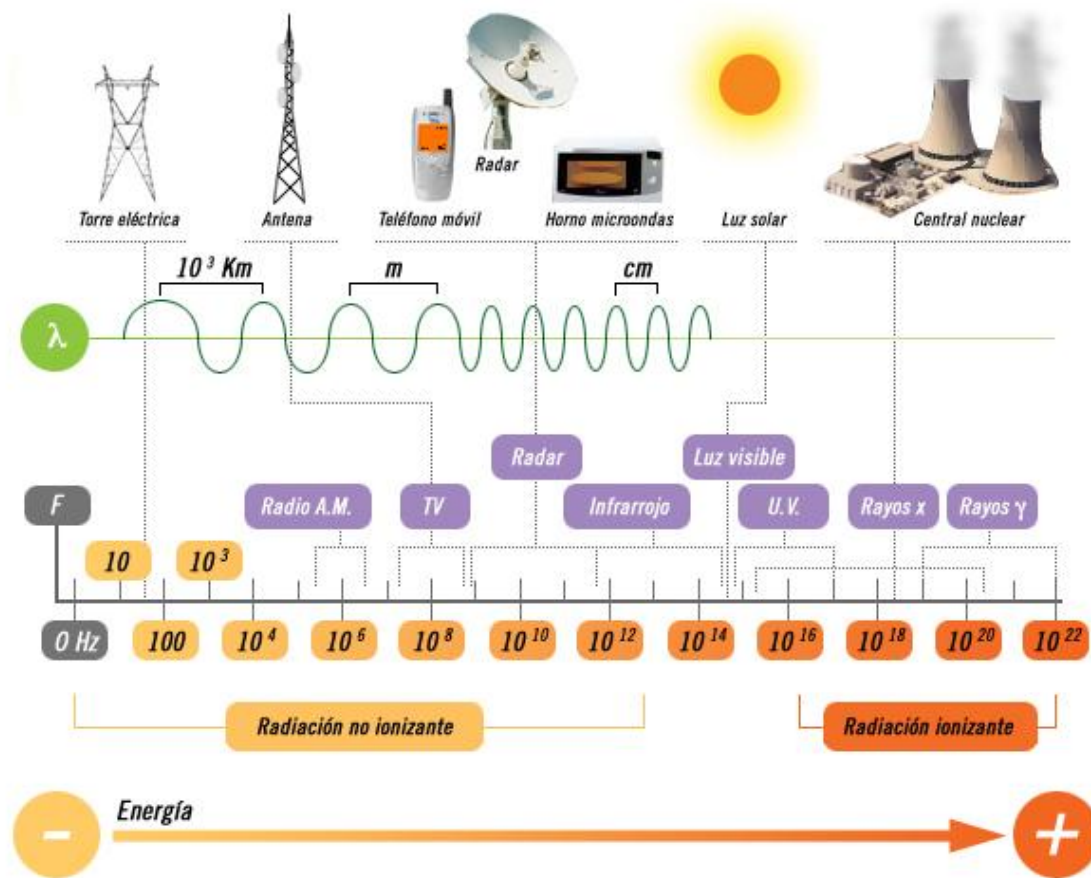


Fig. 6 Espectro electromagnético (Menendez-Barzanallana, 2009)

Las microondas, como la luz, viajan en línea recta; éstas son reflejadas, transmitidas y absorbidas. Son reflejadas por los metales, atraviesan el aire y muchos tipos de vidrio, papel y materiales plásticos, y son absorbidas por varios componentes de alimentos, entre ellos el agua (Decareau, 1992; Parker, 2003; Potter y Hotchkiss, 1998). Cuando son reflejadas no transmiten calor a la superficie reflectora; cuando son

absorbidas, su energía se convierte en calor; cuando viajan de un material a otro, las éstas pueden cambiar su dirección (Singh y Heldman, 2009).

4.7 Mecanismos involucrados en el calentamiento por microondas

Las microondas se generan en un tubo magnetrón que convierte la energía eléctrica de 60 ciclos por segundo en un campo electromagnético con cargas positivas y negativas que cambian su dirección 915 o 2450 millones de veces por segundo (Decareau, 1992; Buffler, 1993; Potter y Hotchkiss, 1998; Parker, 2003).

Cuando las microondas entran a los alimentos, ocurre una interacción dipolar; las moléculas de agua y otras moléculas polares tienden a alinearse con el campo eléctrico generando fricción molecular y provocando rápidamente el calentamiento del alimento (Fig. 7). El calor generado se transfiere entre los componentes del alimento tratando de igualar su temperatura. En alimentos líquidos, el calor también se transfiere por convección.

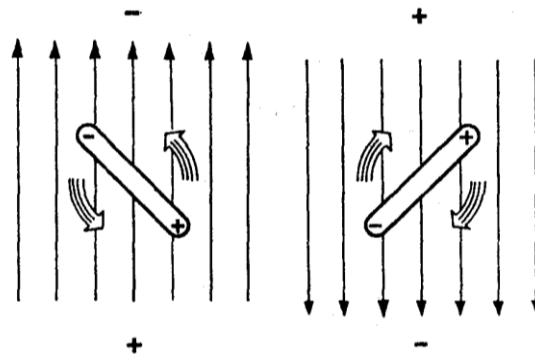


Fig. 7 Alineación de moléculas polares con el campo eléctrico durante el calentamiento por microondas (Decareau, 1992)

Otro mecanismo del calentamiento por microondas es la conducción iónica. Cuando las soluciones iónicas se encuentran en un campo electromagnético, los iones están obligados a fluir de un lado a otro siguiendo la dirección oscilante del campo. Las colisiones resultantes entre los iones y otras moléculas, causa la conversión de energía cinética en energía térmica. Una solución con alta concentración de iones tendría una mayor frecuencia de colisiones entre iones y por lo tanto exhibiría un mayor aumento de

la temperatura que una solución de baja concentración de iones (Suárez *et al.*, 2000; Singh y Heldman, 2009).

4.8 Diferencias entre el calentamiento convencional y el calentamiento por microondas

En el calentamiento convencional (por flama directa, aire caliente, elementos infrarrojos, contacto directo con una placa caliente, etc.) la fuente de calor hace que las moléculas del alimento reaccionen desde la superficie hacia adentro, de manera que las capas sucesivas de moléculas se calienten cada una a su vez. Esto produce un desnivel de temperatura en que el exterior de un alimento puede quemarse mucho antes de que la temperatura en su interior haya subido sensiblemente. En cambio, las microondas penetran uniformemente al alimento hasta una profundidad de varios centímetros, provocando el movimiento de todas las moléculas de agua y las otras moléculas polares a la vez. El calor no se transmite por conducción desde la superficie hacia adentro, sino que se genera rápidamente y uniformemente a través de la masa (Fig. 8). El resultado es una ebullición interna que elimina la humedad. El vapor también calienta los alimentos adyacentes sólidos por medio de conducción (Potter, 1986).

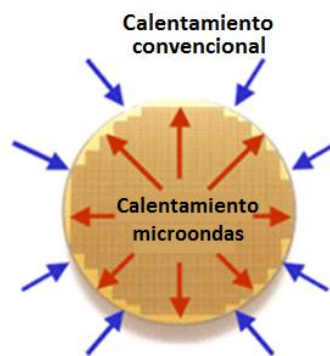


Fig. 8 Calentamiento convencional y calentamiento por microondas

Es importante considerar que mientras se esté convirtiendo agua libre en vapor, la temperatura del alimento sube muy poco arriba del punto de ebullición del agua,

salvo si el vapor dentro del alimento está bajo algo de presión mientras trata de escaparse. Como resultado son prácticamente nulos el dorado y la formación de costra en la superficie debido al calor excesivo del exterior. Este mismo hecho limita al uso de las microondas en operaciones como el horneado del pan, el cocimiento de carnes, y otras en que se desea obtener superficies doradas o con costra. En tales casos, si se emplea el calentamiento por microondas, tiene que ser precedido o seguido por un calentamiento por medios convencionales a fin de producir este tipo de superficie dorada o con costra (Potter y Hotchkiss, 1998).

4.9 Ventajas del calentamiento por microondas

La tecnología de microondas ha ganado aceptación en la industria de alimentos para diferentes tipos de procesos como calentamiento, descongelación, secado entre otros. Se reconocen las siguientes ventajas:

- a) Tratamientos rápidos. El tiempo de calentamiento es la cuarta parte del tiempo usado en los métodos convencionales; por lo tanto, la degradación térmica de nutrientes se reduce substancialmente y se incrementa la retención de factores de calidad (Suárez *et al.*, 2000). Las altas frecuencias usadas en el calentamiento por microondas permiten la rápida transferencia de energía, y por lo tanto, altas velocidades de calentamiento (Dorantes-Alvarez *et al.*, 2000); de esta manera se preserva el contenido de nutrientes y vitaminas así como el sabor, color, y las características sensoriales del alimento (Ahmed y Ramaswamy 2007).
- b) Calentamiento uniforme. La uniformidad del calentamiento se alcanza de manera general debido al calor interno generado. El sobrecalentamiento en la superficie se puede evitar y el sobre procesamiento se puede disminuir, mejorado así la calidad del producto (Suárez *et al.*, 2000).
- c) Tiempos de subida cortos. En el calentamiento por microondas el tiempo de subida es corto, por lo que se retienen mejor las características sensoriales a medida que el tiempo total de calentamiento se reduce.

- d) Factible para fluidos multi-fase, sensibles al calor y de alta viscosidad, debido a que el calor se produce en el interior del alimento.
- e) Fácil mantenimiento. Los sistemas de calentamiento se pueden apagar instantáneamente (Datta, 2003), su geometría permite su limpieza en sitio CIP (*Cleaning-in-place*) sin necesidad de mover el equipo. Hay un mínimo ensuciamiento y los costos de mantenimiento son bajos (Ahmed y Ramaswamy, 2007).
- f) Ahorro de energía. El calentamiento por microondas es más eficiente que los métodos convencionales ya que el calor es generado en el alimento y no en el aire, contenedor u horno (Suárez *et al.*, 2000). La eficiencia global de los sistemas de microondas es alta debido a la extraordinaria eficiencia de los magnetrones de alta potencia (85 % a 900 MHz y 80 % a 2450 MHz) (Meredith, 1998).
- g) Procesamiento amigable con el medio ambiente. El calentamiento por microondas no genera gases ni desechos tóxicos (Fu, 2004; Ahmed y Ramaswamy, 2007).

La mayor desventaja reconocida en el calentamiento con microondas, es la distribución no uniforme de temperaturas, lo cual da como resultados puntos fríos y calientes en los productos calentados con microondas (Vadivambal y Jayas, 2010). La distribución de temperatura no uniforme durante la aplicación de microondas se ha asociado principalmente con alimentos sólidos como granos, frituras de puerco (Jeong *et al.*, 2007) o alimentos listos para comer con carne de avestruz y vegetales (Sosa-Morales *et al.*, 2010a). Sin embargo, el calentamiento por microondas es factible para alimentos fluidos. Los sistemas de calentamiento por microondas recientes son capaces de concentrar la energía en un espacio cilíndrico minimizando el calentamiento no uniforme de alimentos fluidos (Coronel *et al.*, 2005; Kumar *et al.*, 2007a; Kumar *et al.*, 2008b).

4.10 Aplicaciones de las microondas en alimentos

Se han encontrado diversas aplicaciones industriales del calentamiento por microondas en el procesamiento de alimentos entre las cuales destacan las siguientes:

Concentración. Las microondas hacen posible la concentración de soluciones y mezclas semi-líquidas (*slurries*) sensibles al calor, a temperaturas relativamente bajas en un tiempo relativamente corto (Ahmed y Ramaswamy, 2007).

Inactivación de enzimas (escaldado). El calentamiento uniforme y rápido hasta alcanzar la temperatura de inactivación, puede controlar y poner fin a las reacciones enzimáticas. Las microondas se adaptan especialmente al escaldado de frutas y hortalizas sin las pérdidas por lixiviación de causan el agua caliente o el vapor.

Secado. Cuando la mayor parte del agua de un producto ha sido eliminada por los métodos convencionales de calentamiento, las microondas eliminan rápidamente los últimos rastros de humedad en su interior, sin calentar excesivamente ya el material deshidratado. Las microondas también pueden utilizarse para el secado total del alimento.

Horneado. Incluye al horneado de pan, galletas y productos de confitería.

Cocimiento. Las microondas cuecen piezas relativamente grandes sin desniveles de temperatura entre la superficie y el interior. Están bien adaptadas para el cocimiento continuo de alimentos en operaciones institucionales de gran volumen.

Calentamiento. Las microondas son usadas en el calentamiento de comida rápida, alimentos pre-cocidos y cereales (Sumnu y Sahin, 2005).

Inflación y formación de espuma. El calentamiento interno rápido por medio de microondas causa la inflación o formación de espuma cuando la velocidad de la transmisión de calor se hace mayor que la velocidad de transferencia de vapor desde el interior del producto. Puede utilizarse para dar volumen a botanas y otros materiales (Ahmed y Ramaswamy, 2007).

Esterilización y pasteurización. Las microondas calientan el producto rápida y uniformemente sin llegar al calentamiento excesivo asociado generalmente con los métodos de calentamiento por convección a altas. La mayor ventaja del proceso de microondas es que el producto puede ser pasteurizado después de que ha sido sellado

en su empaque. Por lo tanto la vida útil se puede extender desde días hasta más de un mes sin el uso de conservadores (Buffler, 1993).

Algunas de las aplicaciones industriales incluyen el horneado del pan (Keskin *et al.*, 2004), pasteles (Megahey *et al.*, 2005; Sumnu *et al.*, 2005), bisquets (Ahmad *et al.*, 2001) and tostado de nueces (Zook *et al.*, 1995;), avellana (Uysal *et al.*, 2009; Basaran y Akhan, 2010) y granos de café (Nebesny y Brudyn, 2003); calentamiento de comidas rápidas y comidas (Burfoot *et al.*, 1996), arroz cocido (Zhao *et al.*, 2007); precocimiento de tocino (James *et al.*, 2006); concentración de soluciones sensibles al calor y *slurries* (Yuan y Pal, 1995); secado de pistaches (Kouchakzadeh y Shafeei, 2010), macadamias (Silva *et al.*, 2006), espagueti (Pilli *et al.*, 2009), plátano en rebanadas (Drouzas y Shubert, 1996), rebanadas de naranja (Ruiz-Díaz *et al.*, 2003), fresas y manzanas (Erle y Shubert, 2001), uvas (Kassem *et al.*, 2011), rebanadas de calabaza (Alibas, 2007), longan pelado (Varith *et al.*, 2007), zanahorias en rebanadas (Cui *et al.*, 2004; Sumnu *et al.*, 2005b), granos de soya (Gowen *et al.*, 2008), papa en cubos (Bondaruk *et al.*, 2007), miel (Cui *et al.*, 2008), hierbas (Therdthai y Zhou, 2009; Sarimeseli, 2011), champiñones (Lombraña *et al.*, 2010), dientes de ajo (Sharma y Prasad, 2006; Figiel, 2009), filetes de pescado Tilapia (Duan *et al.*, 2011) y espinacas (Alibas Ozkan *et al.*, 2007); liofilizado de sopa de vegetales (Wang *et al.*, 2010a), pepino de mar (Duan *et al.*, 2010), papa en rebanadas (Wang *et al.*, 2010b) y leche descremada (Wang y Chen, 2005); inactivación enzimática de té verde (Huang *et al.*, 2007) templado de puré de papa congelado (Seyhun *et al.*, 2009), descongelado de carne congelada (Tahed y Farid, 2001), procesamiento mínimo de puré de manzana (Picouet *et al.*, 2009), pasteurización y esterilización de carne rebanada con salsa (Tang *et al.*, 2008), y alimentos bombeables.

4.11 Generadores y equipos de microondas

El generador de microondas que se emplea comúnmente es un aparato electrónico llamado magnetrón. En la Fig.9 se observan los componentes de un magnetrón. Este es

una especie de tubo electrónico dentro de un campo magnético que propaga energía radiante de alta frecuencia.

La fuerza producida por los magnetrones de diferentes tamaños se mide en kilowatts. Un magnetrón grande, o varios más pequeños que trabajan juntos, calentarán una cantidad determinada de alimento a una temperatura dada en un tiempo más breve del que requeriría un magnetrón de menor tamaño a fin de obtener el mismo resultado.

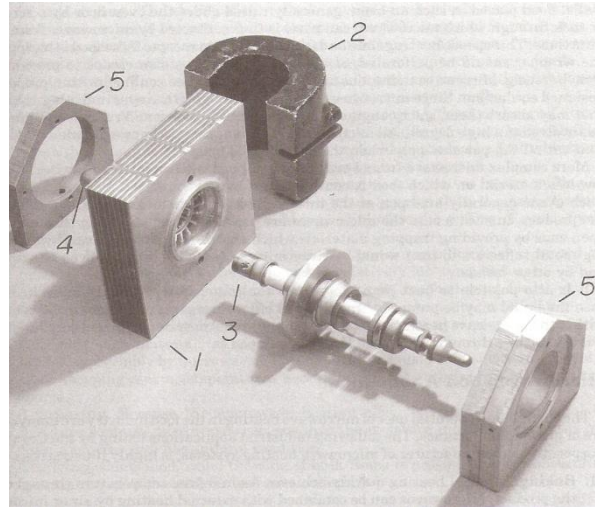


Fig. 9 Componentes de un magnetrón. 1) Ánodo enfriador de aire, arreglo multicavidad. 2) Imán permanente. 3) Ensamble de cátodo. 4) Antena que irradia elementos. 5) Bloques crecientes (Potter y Hotchkiss, 1998)

Además, debido a que la energía de microondas calienta sólo los objetos que la absorben, existe una relación entre la carga de alimento y el tiempo de calentamiento a una temperatura dada. Por ejemplo, dos kilogramos de agua tardarán en hervir el doble del tiempo que tardará un kilogramo de agua.

4.11.1 Horno de microondas

Un tipo sencillo de horno de microondas consiste en un mueble metálico en que se ha instalado un magnetrón (Fig.10). A menudo el sistema está equipado con un ventilador metálico que distribuye las microondas a través de su interior a medida que son reflejadas y rebotan de las alas metálicas del ventilador. Las microondas también son reflejadas y rebotan entre las paredes metálicas del mueble.

El alimento colocado en uno de estos hornos (sostenido arriba del fondo del horno por medio de una parrilla por las que las microondas pueden pasar) está de este modo expuesto al contacto de las microondas en todos los sentidos. Esto acelera el calentamiento y facilita el escape del vapor. Si el alimento está envuelto, la envoltura debe de estar perforada, o bien debe permitir de alguna otra manera el escape del vapor, a fin de que no reviente.

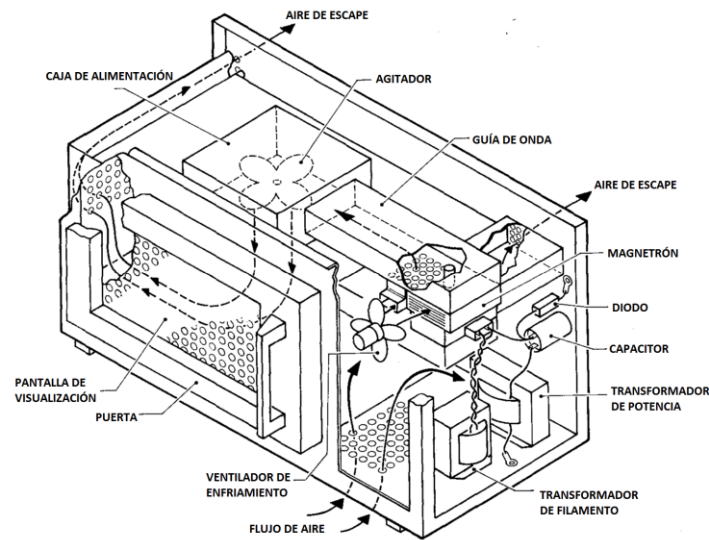


Fig. 10 El horno de microondas (Buffler, 1993)

Las radiaciones de microondas no son peligrosas cuando están encerradas dentro de un equipo correctamente diseñado. Ya que las microondas pueden causar daños a los ojos y otros tejidos que las absorbieran. La ingeniería dedicada a perfeccionar la seguridad de los hornos de microondas ha alcanzado un alto nivel de desarrollo. Actualmente, todos los hornos de microondas tienen mecanismos de seguridad que interrumpen el suministro de energía cuando se abra la puerta del horno (Potter y Hotchkiss, 1998).

4.11.2 Sistema de microondas de flujo continuo

También se pueden calentar alimentos de forma continua por medio de microondas. En la actualidad, existen dos tipos de sistemas de calentamiento continuo: los cilíndricos y los planos.

4.11.2.1 Sistemas de calentamiento cilíndricos

Los sistemas de calentamiento cilíndricos permiten que alimentos homogéneos, no-homogéneos y bebidas sean uniformemente calentados mientras son bombeados a través de una tubería. La mayoría de estos equipos se componen por las siguientes partes (Fig. 11):

Tubería. Hecha de teflón, plástico especial o cerámica, es invisible a las microondas, por lo que no se calienta mientras el material bombeado viaja a través del equipo absorbiendo la energía de microondas.

Generador de microondas. Genera la energía de microondas de una frecuencia dada y a una máxima potencia es lanzada en el aplicador. El generador y sus componentes auxiliares incluyen un magnetrón, electroimán, fuente de energía, circuladores, carga de agua y anexos para todo el componente.

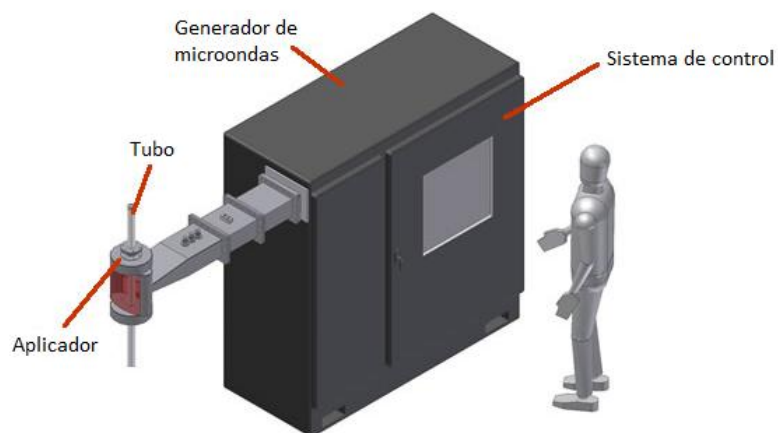


Fig. 11 Sistema de calentamiento cilíndrico por microondas de flujo continuo (IMS, 2010)

Aplicador. Contiene y distribuye la energía de microondas para que el material objetivo que pasa por el aplicador absorba de manera uniforme y eficiente la energía disponible para lograr los resultados deseados.

Sistema de control. Monitorea y controla el desempeño del sistema y facilita la programación y automatización así como el ajuste de las variables de proceso durante el calentamiento como la potencia de salida y cambio en temperatura. El sistema de control está conformado de computadoras, dispositivos para la adquisición de datos, monitoreo de potencia, temperatura y anexos para todo el sistema de control.

Seguridad. Monitorea todo el sistema para fugas de energía y se comunica con el sistema de control para que haya un apagado automático en caso de que se detecte una fuga. Cada sistema de calentamiento cilíndrico incorpora un mecanismo de “asfixia” a la entrada y salida del aplicador que reduce la fuga de microondas por debajo de niveles detectables. El sistema de seguridad se compone de detectores de fuga permanentemente instalados en el sistema de control y del mecanismo de “asfixia” (IMS, 2010).

Muchos de los estudios recientes acerca del procesamiento de alimentos líquidos usando microondas, se han llevado a cabo en sistemas continuos como el que se muestra en la Fig. 12. Esta unidad de 60 kW, opera a 915 MHz y se encuentra en la Universidad de Carolina del Norte en Estados Unidos de América.

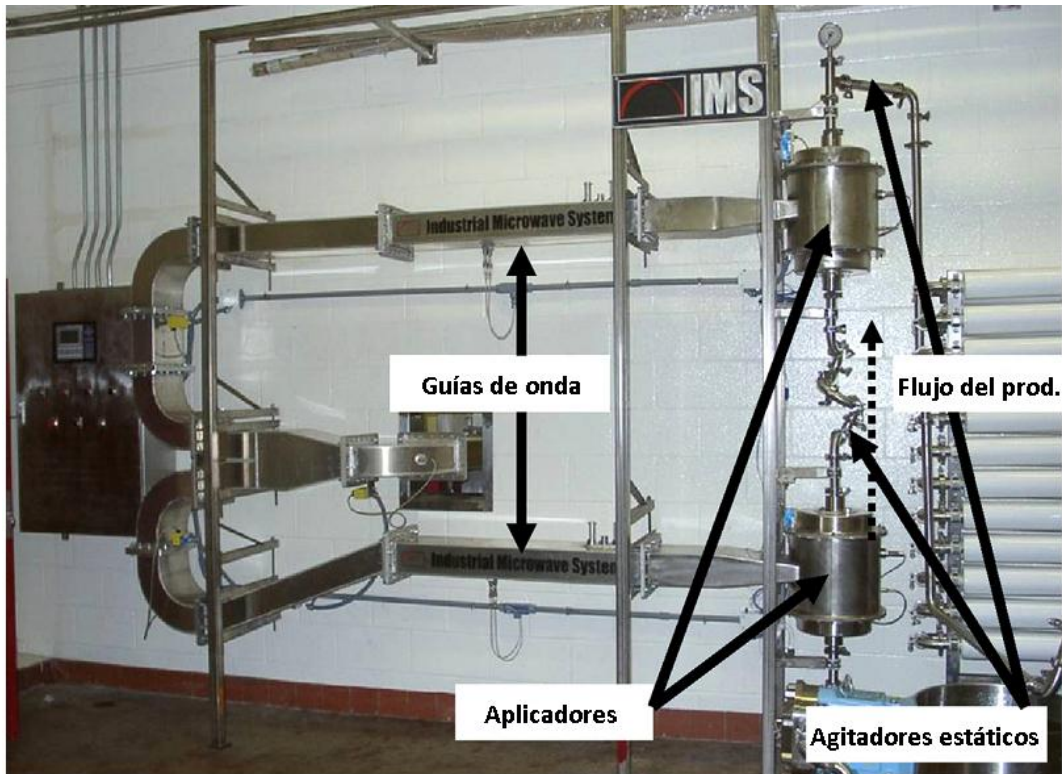


Fig. 12 Sistema de microondas de flujo continuo de 60 kW (Kumar *et al.*, 2008b)

4.11.2.2 Sistemas planos

Los hornos de microondas más complejos que tienen forma de túnel están equipados con bandas transportadoras sin fin, hechas de material que reducen considerablemente pérdidas del alimento, sobre las cuales este se conduce continuamente, pasando cerca de unos magnetrones. Generalmente estos hornos están abiertos en sus extremos de entrada y salida a fin de recibir y descargar el producto (Fig. 13).

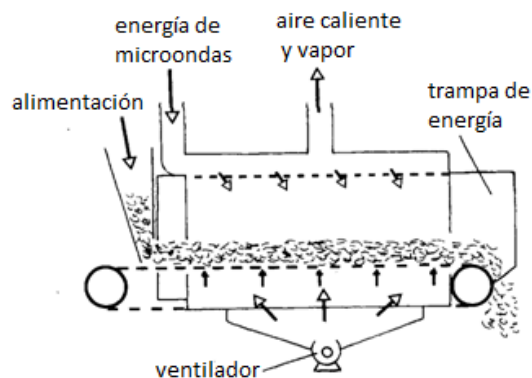


Fig. 13 Equipo de microondas continuo (Fellows, 2000)

En ese tipo de instalación, se previene el escape de las microondas por los extremos abiertos mediante materiales que absorben las microondas desviadas, reflectores metálicos que las devuelven al horno, y por otros medios (Potter y Hotchkiss, 1998).

Los sistemas planos son utilizados en el secado de sólidos que requieren un bajo contenido de humedad final. Existen equipos específicos para cumplir las funciones de pre-secado, post-secado y secado total, disponibles en orientación vertical u horizontal. Este tipo de sistemas está conformado por las mismas partes que constituyen un equipo de calentamiento cilíndrico incluyendo lo siguiente (Fig. 14):

Transportador. Se encarga de conducir el material que va a ser secado, o calentado. El transportador se conforma de marcos de metal, cinturonas invisibles de microondas, motores y otros componentes.

Evacuación. Dispone de los subproductos que puedan resultar del proceso como el calor, la humedad, gases, partículas, etc. El sistema de evacuación se compone por ventiladores de escape, conductos, campanas y estructuras de apoyo (IMS, 2010).

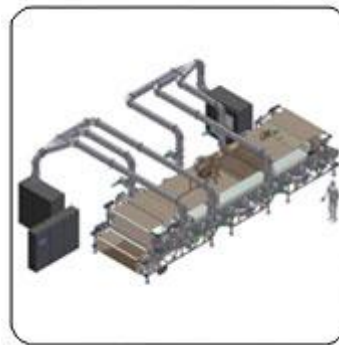


Fig. 14 Equipo de secado con microondas plano (IMS, 2010)

4.12 Procesamiento con microondas de alimentos fluidos

Se han realizado diversos estudios acerca del procesamiento con microondas de alimentos líquidos. La tabla III resume estudios enfocados a pasteurización y esterilización de diferentes alimentos así como sus principales contribuciones:

Tabla III. Estudios recientes acerca del procesamiento con microondas (MW) de alimentos líquidos

Alimento	Condiciones de procesamiento	Resultados	Referencias
Agua de coco	Calentamiento con Mw en sistema por lotes 52.5-92.9 °C, 0.30-33.25 s	Inactivación más rápida de polifenol oxidasa (PPO) y peroxidase (PO) que en procesos convencionales	Matsui <i>et al.</i> , 2008
Bebida de cacahuete	Procesamiento en sistema de MW continuo 130 °C, 1-2L/min, 5 kW	Distribución uniforme de temperatura en el producto	Sabliov <i>et al.</i> , 2008
Crema de espárragos	Procesamiento en sistema de MW por lotes 540-900 W, 3-7 min	Reducción de 2 ciclos logarítmicos en esporas de <i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> . Fracción de lípidos ligeramente afectada a baja potencia	Giuliani <i>et al.</i> , 2010
Jugo de manzana	Calentamiento con MW en sistema continuo 52.5-65 °C, 230-174 mL/ min, 700 W	Mayor velocidad de destrucción de <i>S. cerevisiae</i> y <i>L. plantarum</i> que tratamientos convencionales	Tajchakavit <i>et al.</i> , 1998
	Calentamiento MW en sistema por lotes 76.2 °C, 60 s, 720 W 70.3 °C, 90 s, 900 W	Reducción de 2-4 ciclos logarítmicos de <i>E. coli</i> .	Cañumir <i>et al.</i> , 2002
Jugo de manzana no clarificado	Pasteurización con MW en sistema continuo 73 °C, 130 s, 0.231 L/min, 900 W 73 °C, 216 s, 0.381 L/min, 2000 W	Reducción de 5 ciclos logarítmicos de <i>E. coli</i> .	Gentry y Roberts, 2005
Jugo de naranja	Pasteurización con MW por lotes 50-65 °C, 18-24 s, 700 W	Inactivación más rápida de PME que en tratamiento convencional	Tajchakavit y Ramaswamy, 1997
	Calentamiento por MW en sistema por lotes 60-85 °C, 0.25-5 min, 3 kW	Inactivación de PME, decremento del 13 % de los carotenoides, ligero decremento en la Vitamina C,	Cinquanta <i>et al.</i> , 2010
Jugo de Toronja	Pasteurización con MW por lotes 30 s, 900 W	Mejor preservación de ácido ascórbico, fenoles totales y actividad antioxidante que tratamiento convencional	Igual <i>et al.</i> , 2010
Leche	Tratamiento MW flujo continuo 80 y 92 °C, 15 s, 523 W	Preservación del olor y sabor de las muestras tratadas con microondas	Valero <i>et al.</i> , 2000
Leche descremada	Procesamiento con MW en sistema continuo 137.8 °C, 10 s, 60 kW	Mejores características sensoriales que leches UHT	Clare <i>et al.</i> , 2005
Puré de aguacate	Calentamiento con MW en sistema por lotes 30 s, 633 W	La combinación del tratamiento con MW, pH y adición de hojas de aguacate, redujo las pérdidas de sabor	Guzmán-Gerónimo <i>et al.</i> , 2008

Puré de camote	Calentamiento MW flujo continuo 135 °C, 30 s, 4 L/min	No hubo cambios en color ni viscosidad. Vida útil del producto estable	Coronel <i>et al.</i> , 2005
Puré de manzana	Calentamiento con MW por lotes (procesamiento poco severo) 35 s, 652 w	Reducción de la carga de microorganismos. Conservación de nutrientes.	Picouet <i>et al.</i> , 2009
Puré de zanahoria y chícharos	Calentamiento con MW en sistema continuo 130 °C, 3.78 L/min, 30-40 kW	Diferencia de temperaturas reducida por la instalación de agitadores estáticos	Kumar <i>et al.</i> , 2008b
Salsa con queso	Procesamiento con MW flujo continuo 130 °C, 21.3 s, 3 kW	Menor distribución de temperatura entre el centro y la pared del tubo	Kumar <i>et al.</i> , 2007a

El procesamiento de alimentos líquidos usando microondas se discute ampliamente en el manuscrito “*Recent studies related to microwave processing of fluid foods*” (Salazar-González *et al.*, 2011).

4.13 Propiedades dieléctricas

Las propiedades dieléctricas, son parámetros importantes que proporcionan información acerca de cómo los materiales interactúan con la energía electromagnética durante el calentamiento dieléctrico. Estas propiedades, junto con las propiedades térmicas, propiedades físicas y las características del campo electromagnético, determinan la absorción de energía y el comportamiento de los materiales alimenticios en tratamientos con microondas (Nelson y Datta, 2001). Éstas varían con la composición del alimento, cambiando con variaciones en el contenido de agua, carbohidratos, grasa proteínas y minerales (Fu, 2004), y además son funciones de la frecuencia, la temperatura, la densidad, el contenido de sal y el estado físico (Decareau, 1985; Sumnu y Sahin, 2005; Yam y Lai, 2006).

El conocimiento de las propiedades dieléctricas de los alimentos es fundamental para comprender y modelar la respuesta de un material hacia el campo electromagnético a temperaturas y frecuencias deseadas (Ikediala *et al.*, 2000).

4.13.1 Permitividad, constante dieléctrica y factor de pérdida

Las propiedades dieléctricas de los materiales se pueden definir en términos de su permitividad relativa. La permitividad es una cantidad compleja que se representa de la siguiente manera:

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde ε'_r es la constante dieléctrica, ε''_r es el factor de pérdida y $j = \sqrt{-1}$ es la constante compleja. En la parte real de la ecuación, la constante dieléctrica describe la capacidad de un material para almacenar energía electromagnética en respuesta de un campo eléctrico aplicado. En la parte imaginaria, el factor de pérdida, es una medida de la capacidad de un material para convertir energía electromagnética en calor (Coronel *et al.*, 2008; Sosa-Morales *et al.*, 2009; Wang y Wang, 2009). La constante dieléctrica y el factor de pérdida son términos adimensionales (Datta *et al.*, 2005).

El factor de pérdida también es una medida del grado de penetración de las microondas a los materiales. Dado que las microondas pierden energía en forma de calor a medida que penetran en los materiales, en cuanto mayor sea el factor de pérdida y en cuanto mayor sea la cantidad de calor que se produce, más corta será la distancia por la que podrán penetrar las microondas antes de que se consuma toda su energía. En donde se desea una penetración profunda en un material dado, se puede escoger la frecuencia de microondas que tenga el factor de pérdida más bajo. Por ejemplo, es posible demostrar que, en condiciones similares, las microondas de 915 MHz penetran a una profundidad de 7.5 cm en el agua, mientras que las de 2450 MHz penetran sólo 1.25 cm.

En un alimento, los componentes con diferentes factores de pérdida no se calientan uniformemente. Sin embargo, a medida que se genera el calor, se conduce entre los componentes del alimento, lo cual tiende a equilibrar su temperatura. No obstante, estos efectos secundarios no deben confundirse con el mecanismo principal de la fricción molecular que ocurre dentro del alimento simultáneamente en los sitios de miles de millones de moléculas (Potter y Hotchkiss, 1998).

El factor de pérdida ε'' y la constante dieléctrica ε' , también están relacionados por la tangente de pérdida, la cual se asocia con la susceptibilidad del material a ser

penetrado por un campo eléctrico y disipar energía eléctrica como calor (Ahmed y Ramaswamy, 2007):

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde δ es el ángulo de pérdida; ϵ'' y ϵ' la constante dieléctrica y el factor de pérdida, respectivamente.

Las propiedades dieléctricas proporcionan información acerca de la capacidad aislante de un material. Los alimentos, en la mayoría de los casos no son buenos aislantes, por lo tanto, generalmente absorben una fracción grande de energía cuando se colocan en un campo de microondas, dando como resultado un rápido calentamiento (Mudgett, 1986).

4.13.2 Profundidad de penetración de potencia

La velocidad del calentamiento por microondas se debe a la profundidad de penetración de potencia. Las microondas llegan a los materiales alimenticios con un nivel de potencia inicial y a medida que penetran el alimento, su potencia se reduce ya que parte de la energía es absorbida por el alimento.

El término profundidad de penetración de potencia se define como la distancia a la cual la potencia cae e^{-1} de su valor, o bien, 36.8 % de su valor transmitido (Decareau, 1992; Yam y Lai, 2006). Una vez obtenidas las propiedades dieléctricas, la profundidad de penetración de energía en ciertos materiales se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]}} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde d_p es la profundidad de penetración de potencia (cm); c es la velocidad de la luz en el vacío, 2.988×10^8 m/s y f es la frecuencia de la fuente de energía (Hz). La

profundidad de penetración de potencia se utiliza para calcular el diámetro del tubo para un sistema de calentamiento por microondas de flujo continuo. Ésta es inversamente proporcional a la frecuencia (Coronel *et al.*, 2008), por lo tanto, a menores frecuencias se obtiene una mayor profundidad de penetración mientras que el uso de altas frecuencias puede resultar en un mayor calentamiento de la superficie (Wang y Wang, 2009). El conocimiento de la profundidad de penetración sirve como pauta de la efectividad de calentamiento de un alimento, y por consiguiente es un parámetro importante que se debe conocer por los procesadores de alimentos (Buffler, 1993). La profundidad de penetración también se utiliza para calcular el diámetro de un sistema de microondas continuo para el tratamiento de fluidos (Coronel *et al.* 2008).

La composición del alimento influye tanto en el factor de pérdida, como en la profundidad de penetración. Por ejemplo, cuando se añade sal al agua, las características de calentamiento cambian en dos direcciones diferentes: por una parte aumenta el factor de pérdida del agua y por el otro lado disminuye la profundidad de penetración de las microondas en la solución, reduciendo la velocidad de calentamiento (Parker, 2003).

4.13.3 Factores que afectan las propiedades dieléctricas

Como se mencionó anteriormente, las propiedades dieléctricas de los materiales alimenticios son afectadas por diferentes factores incluyendo la frecuencia del campo eléctrico aplicado, la temperatura del alimento, el contenido de humedad, la estructura del alimento y otros constituyentes como se menciona a continuación:

Frecuencia. Con excepción de materiales que no absorben energía de campos electromagnéticos, las propiedades dieléctricas de la mayoría de los materiales varían considerablemente con la frecuencia del campo eléctrico aplicado. Un fenómeno importante que contribuye a la dependencia de la frecuencia es la polarización; este proceso se puede describir por la fórmula matemática desarrollada por Debye (Nelson y Datta, 2001).

Contenido de humedad. Debido a la naturaleza dipolar de las moléculas de agua, el contenido de humedad es uno de los principales factores determinantes de las

propiedades dieléctricas. En general, cuanto mayor es el contenido de agua, mayor es la constante dieléctrica y el factor de pérdida del material (Tang *et al.*, 2002). El agua puede existir en los materiales alimenticios en forma libre o ligada; el agua libre se encuentra en los capilares y el agua ligada es físicamente absorbida en la superficie del material seco (Datta *et al.*, 2005). Los componentes del agua libre tienen propiedades dieléctricas similares a la del agua líquida, mientras que el agua ligada exhibe propiedades dieléctricas como las del hielo. Las propiedades dieléctricas de los alimentos, en general, disminuyen rápidamente con la reducción del contenido de agua a un nivel crítico de humedad; por debajo de este nivel de humedad, la reducción el factor de pérdida es menos significativo debido al agua ligada (Tang *et al.*, 2002).

Temperatura. En sistemas alimenticios, el cambio en las propiedades dieléctricas con respecto a la temperatura depende de la frecuencia, la proporción de agua ligada:agua libre, la conductividad iónica y la composición del material (Tang *et al.*, 2002). En general, el factor de pérdida aumenta con el incremento en la temperatura a bajas frecuencias debido a la conducción iónica, y disminuye con el aumento en la temperatura a altas frecuencias debido a la dispersión de agua libre (Guan *et al.*, 2004).

Otros constituyentes. La sal reduce el agua libre y disminuye la constante dieléctrica. Las moléculas de azúcar son relativamente grandes y no polares, por lo tanto un incremento en el contenido de azúcar reduce la constante dieléctrica (Tang *et al.*, 2002). Las proteínas tienen un efecto pequeño en el comportamiento dieléctrico a las frecuencias de las microondas. Las propiedades dieléctricas de las proteínas dependen del parte de su estructura, que puede ser polar o no-polar. Los aminoácidos libres son dieléctricamente reactivos y junto con los polipéptidos, contribuyen al incremento en el factor de pérdida. La desnaturalización de proteínas resulta de momento dipolar y de polarización grande, los cuales afectan las propiedades dieléctricas. Además, puesto que el agua libre en el sistema cambia durante la desnaturalización, las propiedades dieléctricas del alimento son afectadas. Los lípidos son hidrofóbicos (excepto por los grupos carboxilos de los ácidos grasos) y no interactúan mucho con las microondas. Por esa razón, las propiedades dieléctricas de las grasas y aceites son muy bajas. La

contribución de los lípidos en las propiedades dieléctricas de los alimentos se debe a su efecto de dilución en el sistema. El incremento en el contenido de grasa reduce el contenido de agua libre en el alimento, disminuyendo la magnitud de las propiedades dieléctricas (Datta *et al.*, 2005).

4.13.4 Métodos para la determinación de las propiedades dieléctricas

La medición de las propiedades dieléctricas es importante para la aplicación exitosa del calentamiento por microondas (Wang y Wang 2009). Existen varias técnicas para medir las propiedades dieléctricas de los alimentos y materiales. Los métodos más comunes son: sonda coaxial abierta, línea de transmisión y cavidad resonante.

4.13.4.1 Método de la sonda coaxial abierta

El método de la sonda coaxial abierta es el preferido para medir las propiedades dieléctricas de todo tipo de materiales, especialmente alimentos líquidos y semi-líquidos. Consta de una sonda coaxial con un extremo abierto que se encuentra en contacto con la muestra (Fig. 15). Durante la medición, se manda una señal por el analizador de impedancia, la cual es reflejada por la muestra. La magnitud y el cambio de fase de la onda reflejada se utilizan para calcular las propiedades dieléctricas de la muestra. Este método tiene la ventaja de poseer un amplio rango de frecuencias para las mediciones (10-20 GHz) (Coronel *et al.*, 2008; Wang y Wang, 2009); es de fácil uso, no requiere de preparación de muestra ni de algún contenedor especial y la medición se puede completar en pocos minutos. El espesor de la muestra tiene que ser mayor a 1cm para alimentos y los sólidos deben tener una superficie plana para permitir un buen contacto entre el material y la superficie de la sonda (Tang *et al.*, 2002).

La técnica tiene algunas restricciones; está sujeta a error si hay variaciones significativas en la densidad del material, inestabilidad del cable o si hay burbujas de aire no detectadas entre la sonda y la muestra. Además la técnica no es apropiada para determinar permitividades de materiales de baja pérdida (Nelson y Datta, 2001).

A pesar de las limitaciones del método, es uno de los más comúnmente usados en la investigación de alimentos; la precisión de las propiedades dieléctricas medidas es adecuada para la investigación del calentamiento dieléctrico (Tang *et al.*, 2002; Wang y Wang, 2009).

4.13.4.2 Método de la línea de transmisión

En el método de línea de transmisión se requiere que la muestra se coloque en la sección transversal de una línea de transmisión. La línea de transmisión debe ser rectangular o coaxial; por lo tanto se necesitan preparar muestras rectangulares o anulares (Buffler, 1993).



Fig. 15 Sistema de sonda coaxial para la medición de las propiedades dieléctricas de los materiales (Buffler, 1993)

Durante la medición, se utiliza un analizador de vector de red para detectar el cambio en la impedancia y las características de propagación debido al llenado con la muestra; con los resultados de las mediciones, se calculan las propiedades dieléctricas por medio de un software (Wang y Wang, 2009). Tanto la precisión como la sensibilidad de este método, son mayores que las del método de la sonda coaxial abierta. Sin embargo, el rango de medición es más estrecho que el del método anterior. Además, las muestras tienen que ser cuidadosamente preparadas para ajustarse en la sección transversal de la línea de transmisión. Los alimentos líquidos y semilíquidos son más difíciles de medir con este método; además proporciona una resolución limitada cuando

se miden alimentos de baja pérdida como los aceites (Tang *et al.*, 2002; Wang y Wang, 2009).

4.13.4.3 Método de cavidad resonante

El método de cavidad resonante se basa en el hecho de que las cavidades son estructuras de resonancia de alta calidad. Una pequeña muestra de material introducido en el interior de la cavidad desplaza el centro de la frecuencia de resonancia (f_c) y altera el factor de calidad (Q) en la cavidad (Tang *et al.*, 2002). Dos cambios de los parámetros se miden por el analizador de redes y se utiliza un software especial para determinar las propiedades dieléctricas del material (Wang y Wang, 2009).

El método de resonancia puede ser muy sensible y preciso para determinar los parámetros de muestras de baja pérdida (Buffler, 1993) con una precisión global de $\pm 2-3$ %. Sin embargo, el método proporciona las propiedades dieléctricas de sólo una frecuencia para una cavidad específica, y las cavidades son difíciles de usar y diseñar (Wang y Wang, 2009). Además requiere una forma precisa de muestra y el análisis puede ser complejo (Tang *et al.*, 2002).

4.13.5 Propiedades dieléctricas de frutas tropicales y subtropicales

Las propiedades dieléctricas de las frutas proporcionan una orientación general para la selección de frecuencias óptimas, para la determinación de intensidades apropiadas del campo eléctrico para alcanzar las velocidades de calentamiento deseadas y para determinar el espesor óptimo para asegurar un tratamiento de microondas uniforme.

La tabla IV muestra las propiedades dieléctricas de algunas frutas tropicales y subtropicales a diferentes temperaturas y frecuencias:

Tabla IV. Propiedades dieléctricas de seis frutas tropicales a diferentes temperaturas y frecuencias (Wang *et al.*, 2005)

Material	Temp. (°C)	Constante a Frecuencia (MHz)				Factor de pérdida a Frecuencia (MHz)			
		27.12	40	915	1800	27.12	40	915	1800
Aguacate	20	115.7 ±15.8	92.7 ±8.1	59.9 ±0.6	58.2 ±0.6	699.6 ±10.3	477.2 ±8.5	27.4 ±0.6	19.0 ±0.2
	30	123.7 ±20.8	96.3 ±10.5	58.9 ±0.7	57.3 ±0.6	814.3 ±12.5	555.3 ±10.7	30.5 ±0.7	20.0 ±0.3
	40	131.6 ±25.1	100.0 ±12.6	57.8 ±0.9	56.4 ±0.9	951.6 ±13.4	648.6 ±11.7	34.3 ±0.8	21.3 ±0.4
	50	137.9 ±29.1	103.7 ±14.6	57.9 ±0.3	56.7 ±0.0	1136.2 ±0.2	774.0 ±3.3	39.8 ±0.2	23.8 ±0.1
	60	140.5 ±31.6	105.4 ±15.5	59.8 ±1.8	58.7 ±1.9	1422.0 ±87.0	965.1 ±53.8	47.8 ±2.1	27.7 ±1.2
Chirimoya	20	71.5 ±6.5	68.6 ±6.4	50.9 ±11.6	59.0 ±4.6	238.5 ±29.8	163.4 ±19.5	25.4 ±2.7	18.3 ±1.4
	30	72.1 ±5.1	68.9 ±4.7	50.5 ±7.7	58.5 ±3.7	283.1 ±31.7	193.0 ±21.3	27.2 ±1.4	17.1 ±0.9
	40	68.4 ±8.4	64.5 ±8.3	48.7 ±13.3	56.9 ±4.1	339.1 ±37.7	231.0 ±24.9	26.0 ±5.2	17.0 ±2.5
	50	72.0 ±4.2	68.0 ±3.8	62.0 ±6.8	57.5 ±2.4	406.4 ±47.1	275.4 ±31.8	29.1 ±4.3	17.6 ±2.1
	60	70.0 ±5.0	65.4 ±4.6	56.0 ±10.2	55.7 ±3.5	480.6 ±57.7	325.6 ±38.7	31.5 ±2.3	17.8 ±2.3
Longan	20	75.2 ±3.0	73.8 ±2.6	68.2 ±1.9	66.3 ±1.8	230.1 ±8.7	156.5 ±5.9	13.3 ±0.5	14.1 ±0.4
	30	73.5 ±2.9	71.8 ±2.4	66.0 ±1.6	64.6 ±1.6	276.1 ±9.2	187.8 ±6.3	13.5 ±0.5	12.8 ±0.4
	40	71.6 ±3.2	69.5 ±2.6	63.4 ±1.5	62.3 ±1.5	326.4 ±10.6	221.9 ±7.4	14.1 ±0.5	12.1 ±0.5
	50	69.7 ±3.7	67.3 ±2.9	60.8 ±1.7	59.9 ±1.7	377.7 ±13.1	256.7 ±9.1	15.0 ±0.6	11.7 ±0.4
	60	67.5 ±4.4	65.0 ±3.1	58.3 ±1.9	57.6 ±1.9	431.4 ±16.6	293.3 ±11.4	16.0 ±0.7	11.7 ±0.6
Carambola	20	82.7 ±0.7	73.5 ±1.5	59.7 ±2.6	57.8 ±2.6	264.1 ±8.6	179.7 ±5.6	15.0 ±1.3	14.0 ±1.4
	30	84.9 ±0.5	73.9 ±0.7	58.6 ±2.4	56.7 ±2.2	310.7 ±6.0	211.3 ±3.8	14.6 ±0.5	12.8 ±0.7
	40	88.1 ±2.0	74.7 ±0.6	57.2 ±1.7	55.6 ±1.5	373.6 ±1.0	254.1 ±0.4	16.2 ±0.1	12.9 ±0.5
	50	91.6 ±3.1	75.7 ±1.4	55.5 ±1.1	54.1 ±0.9	441.2 ±1.3	300.1 ±1.3	17.6 ±0.2	13.0 ±0.3
	60	96.6 ±4.5	77.7 ±2.4	54.2 ±0.9	52.9 ±0.7	523.9 ±4.2	356.3 ±3.5	19.6 ±0.2	13.5 ±0.2
Kaki	20	79.8 ±0.4	77.6 ±0.3	68.4 ±6.7	70.3 ±1.9	207.5 ±14.5	141.1 ±10.1	21.1 ±6.0	15.3 ±1.7
	30	79.1 ±0.1	76.4 ±0.3	73.2 ±1.1	70.3 ±0.8	247.9 ±17.4	168.0 ±11.8	16.3 ±0.1	13.3 ±0.3
	40	77.6 ±0.2	74.5 ±0.3	70.8 ±0.8	68.3 ±0.6	295.6 ±20.6	200.0 ±13.9	15.9 ±0.0	12.1 ±0.4
	50	76.6 ±0.2	72.8 ±0.3	68.5 ±0.6	66.3 ±0.5	346.4 ±23.7	234.5 ±15.9	16.1 ±0.2	11.5 ±0.4
	60	75.4 ±0.3	71.0 ±0.3	66.0 ±0.5	64.1 ±0.4	401.3 ±28.2	271.5 ±19.0	16.9 ±0.0	11.2 ±0.4
Zapote blanco	20	76.0 ±0.3	73.6 ±0.4	62.6 ±2.2	64.0 ±1.5	258.6 ±12.4	176.0 ±8.6	24.0 ±0.5	16.8 ±0.2
	30	75.4 ±0.4	72.6 ±0.5	55.5 ±4.9	62.7 ±0.3	307.1 ±12.7	208.8 ±8.5	24.2 ±0.4	16.1 ±0.3
	40	75.5 ±0.5	72.2 ±0.4	58.1 ±2.3	62.0 ±0.5	369.9 ±17.6	251.3 ±12.0	26.2 ±0.4	15.7 ±0.4
	50	74.5 ±0.7	70.6 ±0.6	60.3 ±0.9	60.9 ±0.1	433.1 ±17.5	293.9 ±11.8	24.9 ±1.0	15.3 ±0.4
	60	69.1 ±1.9	64.9 ±1.9	52.8 ±0.5	55.5 ±1.9	470.8 ±9.4	319.4 ±6.5	25.3 ±3.2	14.5 ±0.8

Se observa que el factor de pérdida de las frutas disminuye con el incremento de la frecuencia a una temperatura constante. Así mismo, se incrementa casi linealmente con el incremento en la temperatura a 27.12 MHz (región de radiofrecuencias), pero permanece en un rango pequeño a 915 MHz (región de microondas).

La tabla V muestra la profundidad de penetración de algunas frutas a diferentes frecuencias

Tabla V. Profundidad de penetración (cm) de frutas tropicales calculada a partir de propiedades dieléctricas a 20 °C (Wang *et al.*, 2005)

Fruta	27.12 MHz	915 MHz	1800 MHz
Aguacate	5.1	1.5	1.1
Chirimoya	9.4	1.5	1.1
Longan	9.7	3.3	1.5
Carambola	9.0	2.7	1.5
Kaki	10.5	2.1	1.5
Zapote blanco	9.0	1.8	1.3

La profundidad de penetración disminuye con el incremento en la frecuencia. Entre las seis frutas el aguacate tiene la profundidad de penetración más baja a 27.12 MHz una magnitud similar de penetración a 1800 MHz. Las profundidades de penetración para chirimoya, longan, carambola, kaki y zapote blanco fueron similares a 27.12 MHz. La profundidad de penetración limitada conduce a un calentamiento no uniforme en frutas grandes, especialmente en la región de frecuencia de las microondas (Wang *et al.*, 2005).

4.13.6 Propiedades dieléctricas de alimentos fluidos

La determinación de propiedades dieléctricas de alimentos ha sido objeto de estudio en los últimos años. Se han realizado diversos trabajos acerca de la determinación de las permitividades de fluidos alimenticios para su procesamiento con microondas. La mayoría de estas propiedades han sido determinadas por el método de sonda coaxial abierta. Estas investigaciones se resumen en la tabla VI:

Tabla VI. Estudios realizados en la determinación propiedades dieléctricas de alimentos fluidos

Alimento	Temperaturas de estudio (°C)	Frecuencias de estudio (MHz)	Referencia
Aceites comestibles	20-40	0.1-1	Lizhi <i>et al.</i> , 2008
Ácido acético (1-10 % ácido acético) y vinagre	20-22	1000-20000	Bohigas y Tejada, 2009
Bebida de cacahuete	18-90	915	Sabliov <i>et al.</i> , 2008
Jugo de Uva y vino	20	200-3000	García <i>et al.</i> , 2004
Leche descremada (bajo condiciones estáticas y continuas)	20-130	915	Kumar <i>et al.</i> , 2007b
Leche UHT (entera, descremada, baja en grasa)	17-20	1000-20000	Nunes <i>et al.</i> , 2006
Miel (18-42.6 % agua)	25	10-4500	Guo <i>et al.</i> , 2010b
Proteína líquida de suero de leche y gel de proteína de suero de leche	20-121	27,40,915 y 2450	Wang <i>et al.</i> , 2003
Puré de camote	15-145	915	Brinley <i>et al.</i> , 2008
Puré de papa	20-75°C	500-2500	Ahmed <i>et al.</i> , 2009
Puré de zanahoria y puré de chícharos (bajo condiciones continuas)	20-130	300-3000	Kumar <i>et al.</i> , 2008b
Salsa con queso e ingredientes (tomate, jalapeños, cebolla)	20-130	915	Kumar <i>et al.</i> , 2008a

Salsa de soya	5-70	300-3000	Tanaka <i>et al.</i> , 2005
Sistema modelo de salsa blanca (basado en almidón, gomas y sal)	20 y 40	2500	Guardaño <i>et al.</i> , 2010
Soluciones de agua-leche (70-100 % leche)	25	10-4500	Guo <i>et al.</i> , 2010a
Soluciones de sal, azúcar y carboximetilcelulosa	20-90	300-3000	Coronel <i>et al.</i> , 2008

Como se mencionó anteriormente, el conocimiento de las propiedades dieléctricas es importante para el establecimiento de las condiciones de proceso cuando se aplica el calentamiento por microondas. En muchos de los trabajos mencionados, se han desarrollado correlaciones que ayudan a la predicción de las propiedades dieléctricas en función de la temperatura, la frecuencia y otros constituyentes del alimento como humedad, contenido de sal, contenido de azúcar, entre otros.