



Modelación del calentamiento dieléctrico (microondas y radiofrecuencia) en sistemas alimenticios modelo

N. Soto-Reyes¹, R. Rojas-Laguna² y M.E Sosa-Morales¹

¹ Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla.
Ex hacienda Sta. Catarina Mártir S/N, San Andrés Cholula, Puebla. C.P.72810, México.

² División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca. Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8. Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato. C.P. 36885. México.

Resumen

El calentamiento dieléctrico, que incluye al generado por microondas y por ondas de radiofrecuencia, es ampliamente usado en diferentes áreas, entre ellas, la ciencia y tecnología de alimentos. Aunque presenta numerosas ventajas sobre otras formas de calentamiento, también tiene una desventaja importante: la falta de uniformidad en las temperaturas generadas en el material. Recientemente, la modelación del calentamiento dieléctrico ha sido propuesta como una herramienta para solucionar la falta de uniformidad del calentamiento. Este artículo de revisión presenta conceptos fundamentales para comprender los términos asociados al calentamiento dieléctrico. Además, se recopila información de los trabajos en los que se han estudiado las propiedades dieléctricas, físicas y térmicas de los materiales que se utilizan para elaborar los sistemas alimenticios modelo, en los cuales se ha aplicado la modelación del calentamiento dieléctrico. Al final de este artículo, los autores presentan su opinión sobre la información recopilada y de futuros trabajos en los que se estudie la modelación del calentamiento dieléctrico.

Palabras clave: calentamiento dieléctrico, microondas, radiofrecuencia, modelación.

Abstract

Dielectric heating, which involves microwave and radio frequency heating, is widely used in different areas, including food science and technology. Although, it has many advantages over other forms of heating, also has an important disadvantage: the lack of uniformity in temperatures generated in the material. Recently, modeling of dielectric heating has been proposed as a tool to solve the lack of uniformity of heating. This review presents fundamental concepts to understand the terms associated with dielectric heating. In addition, there is a compilation of information from works that had studied the dielectric, physical and thermal properties of materials that are used to prepare model food systems, in which the modeling of dielectric heating have been applied. At the end of this article, the authors present their opinion on the information gathered and about the future investigations concerning dielectric heating modeling.

Keywords: dielectric heating, microwaves, radiofrequency, modeling.

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Tel.: +52 222 229 2126, fax: +52 222 229 2727
Dirección electrónica: nohemi.sotors@udlap.mx

Introducción

La preocupación por conservar el medio ambiente se ha incrementado en los últimos años, por lo que se están buscando procesos y tecnologías que sean amigables con éste, es decir, tecnologías que no generen humo, compuestos tóxicos ó radiactivos o aquéllos que dañen la capa de ozono. Una de estas tecnologías es el calentamiento dieléctrico, el cual puede reemplazar al calentamiento tradicional. Dentro del calentamiento dieléctrico se encuentra el calentamiento con microondas (MO) y el calentamiento con ondas de radiofrecuencia (RF). En ambos, la energía eléctrica es convertida a radiación electromagnética del tipo no ionizante y el calor es generado por una interacción directa entre la energía electromagnética y el alimento.

Las MO y ondas de RF se han utilizado en varios procesos alimenticios como cocción, horneado, descongelación, secado, pasteurización y recientemente como tratamiento de desinfestación postcosecha, entre otros. En comparación con el calentamiento tradicional, el calentamiento por MO u ondas de RF es más rápido e impacta en menor grado al medio ambiente. Además, al tener tiempos de procesamiento más cortos, el calentamiento por MO u ondas de RF causa menos daño a las propiedades fisicoquímicas y nutricionales del alimento tratado térmicamente.

Para diseñar sistemas de calentamiento dieléctricos, es necesario tomar en consideración los factores que afectan la velocidad del calentamiento en el producto. Los factores principales son las propiedades dieléctricas del material, ya que determinan la distribución de la energía electromagnética durante el calentamiento dieléctrico. Se sabe que estas propiedades dependen de la composición, forma, tamaño, temperatura,

estado físico del agua y densidad del alimento, así como del tiempo de almacenamiento, por lo que estos aspectos deben conocerse para el diseño de sistemas efectivos.

Sin embargo, el calentamiento dieléctrico también presenta desventajas. La principal es que el calentamiento no es uniforme, ya que existen puntos de sobrecalentamiento en el alimento, así como zonas con puntos fríos. Por ello, ha surgido el interés de modelar el calentamiento dieléctrico para hallar soluciones a este problema. La modelación del calentamiento por MO y ondas de RF es una herramienta efectiva para estudiar la influencia de varios parámetros que afectan la uniformidad del calentamiento. Ésta se basa en predecir patrones de temperatura y de distribución de la energía electromagnética en el material tratado térmicamente, utilizando programas computacionales basados en la solución de ecuaciones matemáticas. Es por esto que, el objetivo de esta revisión bibliográfica es compilar información científica sobre la modelación del calentamiento dieléctrico (MO y RF) en sistemas alimenticios modelo, describiendo la composición, propiedades físicas, térmicas y dieléctricas de éstos, así como las bases de la modelación y las soluciones propuestas para mejorar la uniformidad del calentamiento.

Revisión bibliográfica

1. Generalidades del calentamiento dieléctrico

El calentamiento eléctrico puede dividirse en calentamiento eléctrico directo e indirecto. En el primero, la energía eléctrica se aplica directamente al alimento (calentamiento óhmico); mientras que en el calentamiento eléctrico indirecto o calentamiento dieléctrico (calentamiento por microondas o radiofrecuencia) la energía eléctrica primero es

convertida a radiación electromagnética, la cual subsecuentemente genera calor dentro del producto (Marra *et al.*, 2009; Vandivambal y Jayas, 2010). Las microondas (MO) y las ondas de radiofrecuencia (RF) generan calor en materiales dieléctricos induciendo una vibración molecular como resultado de la rotación dipolar y/o por polarización iónica (Ramaswamy y Tang, 2008).

1.1. Diferencias entre el calentamiento por microondas y por ondas de radiofrecuencia

La primera diferencia entre las MO y las ondas de RF es la región del espectro electromagnético en la que se encuentran. Las ondas de RF se ubican en el rango de frecuencia que abarca de 0.003 a 300 MHz, mientras que las microondas están en el rango de 300 a 300,000 MHz (Ramaswamy y Tang, 2008). Con respecto a las ondas de RF, sólo ciertas frecuencias (13.56 ± 0.00678 , 27.12 ± 0.16272 y 40.68 ± 0.02034 MHz) son permitidas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (Marra *et al.*, 2009). Las frecuencias permitidas para MO son 915 MHz y 2450 MHz (Venkatesh y Raghavan, 2004).

Las longitudes de onda de MO y RF también difieren, la longitud de onda de la RF es más larga (ej. 11 m a 27.7 MHz en el aire) que la de MO (ej. 0.12 m a 2450 MHz) (Marra *et al.*, 2009), por lo que la energía de las ondas de RF penetra más que la de las MO (Chow Ting Chan *et al.*, 2004).

Otra diferencia entre MO y RF es la configuración del calentamiento (ver Fig. 1). En el calentamiento por MO, tubos especiales oscilatorios conocidos como magnetrones emiten microondas, las cuales son transferidas por una guía de ondas al interior de una cámara metálica o cavidad, donde se coloca el material a ser calentado. Para mejorar la uniformidad del campo electromagnético que rodea al alimento, se utilizan bandejas giratorias o agitadores. Por otro lado, en el calentamiento por RF, la energía es generada por una válvula triodo y es aplicada a través de dos electrodos, los cuales están situados paralelamente (uno de los electrodos está conectado a tierra). El material a ser calentado se coloca entre los dos electrodos, pero sin estar en contacto directo con éstos (Marra *et al.*, 2009).

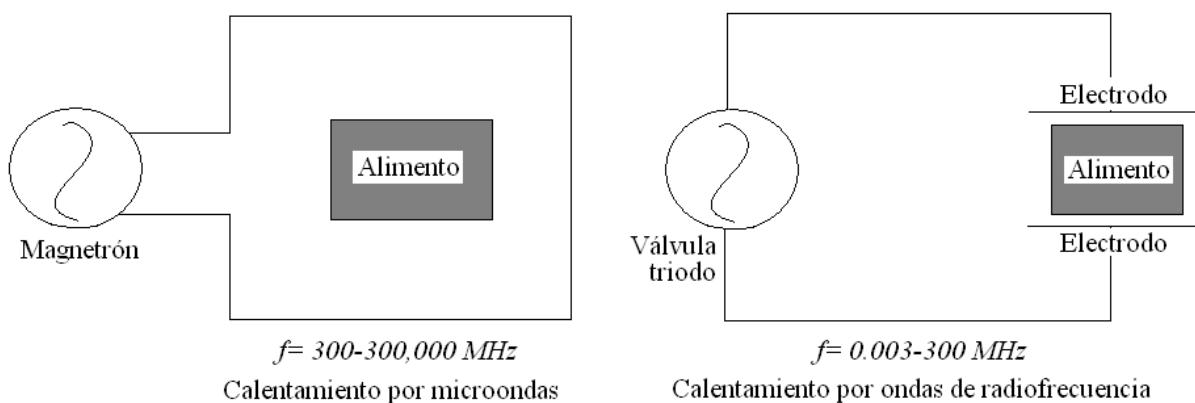


Fig. 1. Arreglo esquemático del calentamiento dieléctrico. Adaptado de Marra *et al.* (2009).

Cuando un alimento es sometido a un campo eléctrico alterante, pueden ocurrir dos fenómenos: la polarización iónica o la rotación dipolar. En la primera, el movimiento de los iones positivos hacia la región negativa del campo eléctrico y viceversa, es el que ocasiona el calentamiento. El cambio continuo de polaridad en el campo eléctrico conduce a la oscilación de los iones hacia adelante y hacia atrás, dentro del alimento, lo que produce fricción entre ellos y por consiguiente, genera calor dentro del producto (Marra *et al.*, 2009). En la rotación dipolar, las moléculas dipolares como el agua, también tratarán de alinearse adecuadamente con el cambio de polaridad de un campo eléctrico. El movimiento de estos dipolos también causa fricción entre las moléculas, lo cual lleva a la generación de calor (Marra *et al.*, 2009; Hossan *et al.*, 2010). Al comparar los mecanismos del calentamiento por MO y por RF, se reconoce que la polarización iónica es la que tiende a dominar en el mecanismo de calentamiento por RF, mientras que en el calentamiento por MO, también se presenta la rotación dipolar (Marra *et al.*, 2009).

1.2. Ventajas y desventajas del calentamiento dieléctrico en alimentos

El calentamiento dieléctrico está ganando aceptación en el área del procesamiento de alimentos. Ha sido utilizado en varios procesos alimenticios como: pasteurización, esterilización, secado, extracción rápida, cocción, horneado, descongelación, secado y en la mejora de la cinética de algunas reacciones (Ramasawamy y Tang, 2008; Campañone *et al.*, 2012; Salazar-González *et al.*, 2012).

Las ventajas que presenta el calentamiento dieléctrico (MO y RF) sobre el calentamiento convencional (convección y conducción) son: 1) menor impacto sobre el medio ambiente, debido a que no genera productos tóxicos; 2) ahorro de energía al compararlo con el método

convencional; 3) uso de energía limpia, si la energía eléctrica inicialmente es obtenida de fuentes renovables, como plantas eólicas; 4) facilidad en la operación de los equipos como limpieza, encendido y apagado instantáneos; y 5) menor tiempo de proceso, por lo que se conserva el contenido de nutrientes y las características sensoriales (Ramasawamy y Tang, 2008; Campañone *et al.*, 2012; Salazar-González *et al.*, 2012).

Como ya se mencionó anteriormente, la desventaja principal del calentamiento dieléctrico es la falta de uniformidad en la distribución de la temperatura, dando lugar a puntos fríos y calientes (Vandivambal y Jayas, 2010, Campañone *et al.*, 2012; Salazar-González *et al.*, 2012). El problema mayor de este fenómeno es que puede sobrevivir algún microorganismo que dañe la salud del consumidor. Otra desventaja es que la transferencia de calor se ve afectada por factores como la geometría, el tamaño y las propiedades dieléctricas del alimento (Vandivambal y Jayas, 2010; Salazar-González *et al.*, 2012).

2. Propiedades dieléctricas

Las propiedades dieléctricas de los alimentos son los parámetros principales que determinan la distribución de la energía electromagnética durante el calentamiento dieléctrico; dependen de la composición, forma, tamaño y densidad del alimento, además del tiempo de almacenamiento, temperatura y frecuencia (Wang *et al.*, 2005; Marra *et al.*, 2009). Estas propiedades junto con las propiedades físicas, térmicas y las características del campo electromagnético, determinan la absorción de la energía de MO y ondas de RF, por lo que es fundamental conocerlas para entender y modelar la respuesta de un material sometido a un campo electromagnético con diferentes frecuencias y temperaturas (Salazar-González *et al.*, 2012).

Las propiedades dieléctricas de los materiales son la permitividad, la constante dieléctrica y el factor de pérdida. A continuación se definirá cada uno de estos términos y otros parámetros dieléctricos importantes.

La permitividad es el término que se utiliza para describir a las propiedades dieléctricas que afectan la reflexión de ondas electromagnéticas en interfaces y la atenuación de la energía de la onda dentro del material (Wang *et al.*, 2005; Sosa-Morales *et al.*, 2010). La permitividad compleja relativa (ϵ^*), relacionada al espacio libre o vacío, se representa por la Ec. 1:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (\text{Ec. 1})$$

donde ϵ' es la constante dieléctrica y ϵ'' el factor de pérdida y representan la parte real e imaginaria, respectivamente, de la permitividad, siendo $j=\sqrt{-1}$.

La constante dieléctrica (ϵ') es la característica que determina la capacidad del material para absorber, transmitir y reflejar energía de una porción del campo eléctrico; es constante para cada material a una frecuencia dada, bajo condiciones constantes. El factor de pérdida (ϵ'') mide la cantidad de energía que se pierde del campo eléctrico, está relacionado con la forma en que la energía del campo es absorbida y convertida a calor en un material cuando pasa a través de éste (Swain *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005; Marra *et al.*, 2009; Sosa-Morales *et al.*, 2010). Un material con bajo ϵ'' absorberá poca energía y por lo tanto, se calentará poco debido a su transparencia a la energía electromagnética (Marra *et al.*, 2009). Los mecanismos que contribuyen al ϵ'' son la conducción iónica y la rotación dipolar (Wang *et al.*, 2005):

$$\epsilon'' = \epsilon''_d + \epsilon''_\sigma = \epsilon''_d + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde los subíndices d y σ indican la contribución debida a la rotación dipolar y a la conducción iónica, respectivamente; σ es la conductividad iónica del material en S/m, f es la frecuencia en Hz, ϵ_0 es la permitividad en el vacío (8.854×10^{-12} F/m) y ω es la frecuencia angular en rad/s.

La conductividad eléctrica o conductividad iónica (σ) es la habilidad que tiene un material para conducir electricidad (Marra *et al.*, 2009). En un sistema dieléctrico alimenticio está relacionada con la polarización iónica y contribuye al valor del ϵ'' . La σ puede ser calculada por la Ec. 3:

$$\sigma = 2\pi f \epsilon'' \quad (\text{Ec. 3})$$

Otro parámetro importante es la profundidad de penetración (d_p), y se refiere a la distancia por debajo de la superficie a la que la potencia de las MO y las ondas de RF disminuye e^{-1} de su valor, es decir, 36.8% de su valor transmitido. La profundidad de penetración puede ser calculada por la Ec. 4 (Sosa-Morales *et al.*, 2010); ésta es inversamente proporcional a la frecuencia, por lo que hay mayor profundidad de penetración a frecuencias bajas en comparación con frecuencias altas.

$$d_p = (\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}) / (2\pi \epsilon'') \quad (\text{Ec. 4})$$

donde λ_0 es la longitud de onda de la microonda en condiciones de vacío (para 2.45 GHz, λ_0 es 12.2 cm). Otra expresión matemática para calcular d_p es:

$$d_p = c / 2\pi f \sqrt{2\epsilon' (\sqrt{1 + (\epsilon''/\epsilon')^2} - 1)} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde c es la velocidad de la luz en condiciones de vacío (3×10^8 m/s), f es la

frecuencia (Hz) y d_p se expresa en metros (Sosa-Morales *et al.*, 2010).

Los materiales dieléctricos alimenticios convierten la energía de las MO y las ondas de RF en calor. El aumento de temperatura en un material debido al calentamiento dieléctrico puede ser calculado aplicando la Ec. 6 (Wang *et al.*, 2005; Sosa-Morales *et al.*, 2010), considerando que es mínima la conducción de calor en el material y la pérdida de calor al medio que lo rodea.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = 55.33 \times 10^{-12} f E^2 \varepsilon'' \quad (\text{Ec. 6})$$

donde C_p es el calor específico del material en $\text{J/kg}^\circ\text{C}$, ρ es la densidad del material en kg/m^3 , E es la intensidad del campo eléctrico en V/m , f es la frecuencia en Hz, dT es el incremento de temperatura en $^\circ\text{C}$ y dt es la duración del tratamiento en s. En la Ec. 6 se nota que el aumento de la temperatura es proporcional al factor de pérdida del material, a la intensidad del campo eléctrico, a la frecuencia y al tiempo del tratamiento (Sosa-Morales *et al.*, 2010).

3. Sistemas alimenticios modelo usados para el análisis del calentamiento dieléctrico

3.1. Criterios de selección

Existe la necesidad de desarrollar modelos que simulen a los alimentos, los cuales deben presentar respuestas de transporte térmico y de masa similares a las del alimento real. Los posibles simuladores de alimentos o sistemas alimenticios modelo pueden ser clasificados en diferentes grupos químicos: polisacáridos, polímeros hidrofílicos, proteínas, suspensiones orgánicas y geles de alcohol (Swain *et al.*, 2004).

De acuerdo a Swain *et al.* (2004), los criterios para utilizar un material como sistema modelo son:

- a. *Resistencia al calentamiento*: el material del sistema modelo debe resistir el calentamiento en el intervalo de temperatura del tratamiento térmico al que será sometido.
- b. *Estabilidad*: debe permanecer estable al menos dos días a temperatura de refrigeración ($5\pm2^\circ\text{C}$).
- c. *Seguridad*: debe ser seguro para el personal, es decir, no debe contener químicos tóxicos, inflamables o peligrosos.
- d. *Costo*: no debe ser costoso, ser reutilizable o lo suficientemente barato para ser desecharo.
- e. *Manufactura*: su preparación debe ser sencilla y rápida, utilizando equipos que estén disponibles en cualquier laboratorio.
- f. *Disponibilidad*: los componentes del sistema modelo deben estar disponibles en cualquier país.
- g. *Propiedades térmicas*: debe presentar el mismo comportamiento térmico que el alimento que representa. El calor específico y la conductividad térmica del sistema modelo deben ser similares a los del alimento.
- h. *Propiedades dieléctricas*: su comportamiento dieléctrico debe ser similar al del alimento respecto a la constante dieléctrica y al factor de pérdida dieléctrico.
- i. *Propiedades de transferencia de masa*: deben ser similares a las del alimento y poder medirse por la pérdida de peso después del calentamiento.

3.2. Propiedades dieléctricas, térmicas y físicas de sistemas alimenticios modelo

Como se mencionó previamente, es de suma importancia conocer las propiedades dieléctricas del material que será sometido al calentamiento dieléctrico. Los valores de las constantes dieléctricas y los factores de pérdida de diferentes materiales (gel de agar, carboximetilcelulosa, gel de gelano, gel de proteína de suero) que se utilizan para elaborar sistemas alimenticios modelo se presentan en las Tablas I y II. Se observa que la constante dieléctrica (ε') del gel de gelano a diferentes

Tabla I. Propiedades dieléctricas de sistemas modelo alimenticios.

Sistema modelo	Temperatura (°C)	Constante dieléctrica ϵ' (adimensional)	Factor de pérdida ϵ'' (adimensional)	Referencia
Gel de agar (2%)	-	73.6	11.5	Barringer <i>et al.</i> , 1995
Gel de agar (2%)+ almidón (30%)	-	56	9	Campañone <i>et al.</i> , 2012
Gel de agar (2%)+NaCl (3%)	-	75	35	Campañone <i>et al.</i> , 2012
Gel de agar (1%)+ azúcar (20.3%)+ sal (0.75%)*	40	58.6	20.3	Sakai <i>et al.</i> , 2005
Carboximetilcelulosa (1%) ^a	20	85.4	88.6	Wang <i>et al.</i> , 2008
	30	83	103.1	
	40	80.8	119.7	
	50	78.5	136.4	
	60	76.1	155.6	
Agua del grifo ^a	20	77.5	20.2	Wang <i>et al.</i> , 2008
	30	73.5	23.4	
	40	68.6	27.2	
	50	64.6	31.1	
	60	61.4	35.9	
	-	-0.48 T+84.74	0.33 T+11.1	Birla <i>et al.</i> , 2008
Gel gelano (1%)+ NaCl (0.17%)	-	- 0.21 T + 86.76	4.36 T+129.4	Birla <i>et al.</i> , 2008

* Propiedades dieléctricas determinadas a 2450 MHz.

^a Propiedades dielectricas determinadas a 27.12 MHz.

T = temperatura en °C

Tabla II. Propiedades dieléctricas de materiales para sistemas modelo alimenticios a frecuencias específicas.

Sistema modelo	Temperatura (°C)	Constante dieléctrica (ϵ')*					Factor de pérdida (ϵ'')*					Referencia
		27	40	100	915	1800	27	40	100	915	1800	
Gel gelano (1%) + NaCl (0.17%)	20	82.50	81.90	79.20	77.80	77.60	220.50	149.20	59.80	7.90	9.80	Wang <i>et al.</i> , 2003a
	30	80.50	79.50	76.70	75.40	75.30	256.80	173.80	69.40	8.20	8.80	
	40	78.10	77.00	73.90	72.60	72.60	301.50	203.80	81.30	8.90	8.30	
	50	76.00	74.50	71.30	70.00	70.10	346.60	234.10	93.40	9.80	8.10	
	60	74.10	72.20	68.80	67.40	67.50	393.60	265.70	105.80	10.80	8.20	
Gel de proteína de suero de leche ^a	20	99.23	88.27	-	59.03	57.17	835.97	569.17	-	34.80	23.30	Wang <i>et al.</i> , 2003b
	30	101.97	89.77	-	57.77	55.87	981.77	668.13	-	39.17	24.73	
	40	104.97	91.23	-	57.00	54.67	1155.57	785.47	-	44.10	26.67	
	50	107.73	92.43	-	56.03	53.43	1337.03	907.60	-	49.50	28.93	
	60	110.50	93.57	-	54.53	51.83	1534.10	1040.33	-	54.63	31.20	
	70	113.30	94.60	-	53.43	50.60	1739.77	1178.67	-	60.93	34.17	
	80	117.23	96.17	-	52.57	49.43	1956.17	1323.93	-	67.50	37.43	
	90	121.33	98.13	-	52.10	48.33	2172.27	1473.57	-	73.97	40.67	
	100	126.07	100.37	-	51.63	47.30	2392.70	1622.67	-	80.57	44.03	
	110	130.40	102.30	-	50.97	46.37	2626.60	1781.23	-	87.80	47.00	
	121.1	137.97	108.90	-	50.33	44.97	2854.87	1935.13	-	95.27	51.77	
	20	88.10	82.20	-	61.65	58.90	885.80	596.85	-	33.55	23.10	
Mezcla líquida de proteína de suero de leche ^b	30	89.30	82.25	-	60.40	57.80	1061.45	715.15	-	38.25	24.65	Wang <i>et al.</i> , 2003b
	40	90.55	82.40	-	59.00	56.45	1255.60	845.25	-	43.60	26.75	
	50	91.65	82.45	-	57.40	54.85	1469.90	988.75	-	49.55	29.35	
	60	93.20	82.70	-	55.70	53.20	1683.35	1131.95	-	55.55	32.00	
	70	96.30	83.95	-	54.20	51.70	1879.15	1263.20	-	61.30	34.75	
	80	109.80	94.05	-	52.95	50.15	2088.95	1405.55	-	68.86	38.40	
	90	118.05	100.00	-	52.05	49.00	2294.60	1549.05	-	75.90	41.90	
	100	123.60	103.50	-	51.60	48.30	2567.55	1733.10	-	84.25	46.10	
	110	127.85	105.55	-	50.70	47.20	2800.25	1890.30	-	91.30	49.70	
	121.1	132.70	107.80	-	49.70	46.15	3084.25	2082.05	-	99.75	53.90	

* Adimensional

^a 20% de concentrado de proteína de suero de leche (Alacen 882), 2% glucosa, 0.59% NaCl y agua destilada^b Mezcla de suero de leche en polvo, glucosa, NaCl y agua destilada

frecuencias (27 a 1800 MHz) disminuye al aumentar la temperatura. En cambio, el factor de pérdida (ϵ'') aumenta al incrementar la temperatura en el rango de frecuencia de 27 a 915 MHz, observándose que a 1800 MHz disminuye al aumentar la temperatura.

Con respecto a las propiedades dieléctricas del gel de proteína de suero, en la Tabla II se observa que la ϵ' depende de la temperatura y frecuencia utilizada. A frecuencias bajas (27 y 40 MHz) la ϵ' aumenta al incrementar la temperatura, sin embargo, a frecuencias altas (915 y 1800 MHz) disminuye al incrementar la temperatura. El ϵ'' incrementa al aumentar la temperatura sin importar la frecuencia a la que se determine esta propiedad dieléctrica.

De acuerdo a Wang *et al.* (2005), a frecuencias bajas el ϵ'' aumenta al incrementar la temperatura debido a la conductancia iónica, mientras que a frecuencias altas disminuye al incrementar la temperatura, debido a la dispersión del agua libre. Sin embargo, en los

datos presentados en las Tablas I y II se observa que este comportamiento cambia dependiendo del material analizado. Es de suma importancia resaltar que a frecuencias altas la ϵ' y el ϵ'' presentan valores pequeños en comparación a los obtenidos a frecuencias bajas. Esto se debe a la longitud de onda, ya que las longitudes de onda de frecuencias altas son menores, por lo que habría una menor penetración en el alimento, en comparación con las longitudes de onda de frecuencias bajas.

En la Fig. 2 se presentan las propiedades dieléctricas del gel de agar con diferentes concentraciones de sacarosa y del gel de agar con diferentes concentraciones de NaCl, determinadas por Sakai *et al.* (2005). Dichos investigadores encontraron que al aumentar la concentración de NaCl disminuye ligeramente la ϵ' , y el ϵ'' incrementa significativamente. Por otro lado, la adición de sacarosa modifica principalmente a la ϵ' . Los investigadores concluyen que la sacarosa, al no ser un

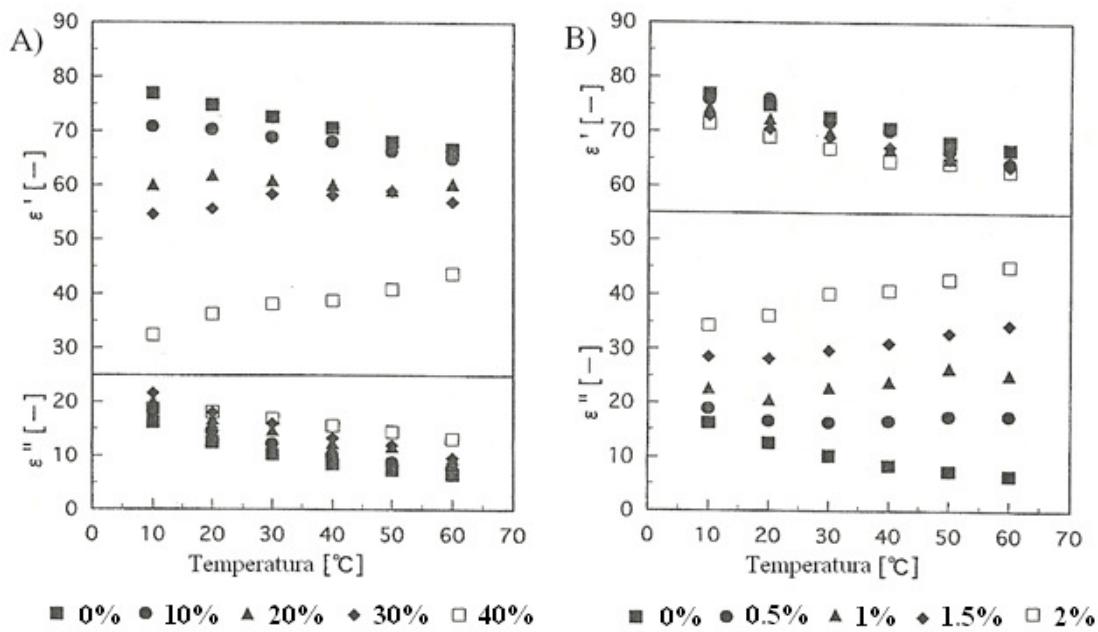


Fig. 2. Propiedades dieléctricas de gel de agar (1%) con sacarosa (A) y con NaCl (B). Adaptado de Sakai *et al.* (2005).

electrolito, no cambia significativamente al ϵ'' , además, debido a que agregaron grandes cantidades de sacarosa (10%, 20%, 30% y 40%), disminuyeron el contenido de humedad y por lo tanto la ϵ' disminuye. Sin embargo, cuando añadieron azúcar y sal al gel de agar, ϵ' y ϵ'' no pudieron ser cambiados independientemente, por lo que desarrollaron ecuaciones y un método para determinar la concentración de sal y azúcar necesaria para obtener propiedades dieléctricas específicas en el gel de agar (1%). Con este método, Sakai *et al.* (2005) lograron obtener propiedades dieléctricas similares a las de una salsa. En

En la Tabla III se muestran las propiedades físicas y térmicas de gel de agar, gel de gelano y agua. Se observa que hay escasa información sobre estas propiedades en sistemas modelo alimenticios, por lo que sería de suma importancia realizar más estudios para determinar propiedades físicas y térmicas en éstos y otros materiales que se utilizan para emular a los alimentos en estudios de modelación del calentamiento dieléctrico.

4. Modelación del calentamiento dieléctrico en sistemas alimenticios modelo

La modelación es una herramienta útil para entender el efecto o la dependencia de diferentes factores durante un proceso en particular (Salazar-González *et al.*, 2012). Los estudios de distribución de temperatura que se han realizado, utilizan diversos materiales alimenticios como alimentos listos para consumirse, diferentes tipos de carne, granos, sistemas modelo (Vandivambal y Jayas, 2010) y frutas (Birla *et al.*, 2004; Sosa-Morales *et al.*, 2009; Villa-Rojas *et al.*, 2011); sin embargo, esta revisión se centrará en los estudios de modelación del calentamiento dieléctrico en sistemas modelo. En general, para modelar el calentamiento dieléctrico se utilizan ecuaciones matemáticas como la ley

particular, este trabajo muestra cómo la composición del material modifica a las propiedades dieléctricas.

En general, los datos encontrados sobre propiedades dieléctricas de sistemas modelo en los últimos nueve años en revistas especializadas en la ingeniería y ciencia de alimentos son pocos, sobre todo del gel de agar, por lo que sería importante realizar más investigaciones para obtener las propiedades dieléctricas de este material, principalmente porque es económico y fácil de adquirir.

de Lambert, las ecuaciones de Maxwell, ecuaciones de onda y balance de energía (ver Anexo). Es de suma importancia resaltar que para resolver estas ecuaciones es necesario conocer datos del campo electromagnético, propiedades dieléctricas, térmicas y físicas de la muestra. Con las ecuaciones se elaboran matrices y se utilizan programas computacionales para resolverlas (MATLAB, Comsol Multiphysics, entre otros). De esta manera, los modelos matemáticos permiten evaluar los efectos que tienen las características particulares de los alimentos (composición, estructura, tamaño) sobre los perfiles de temperatura que se desarrollan en el interior del material que es calentado (Campañone *et al.*, 2012).

Aunque la simulación no puede reemplazar al trabajo experimental, si puede proveer de información valiosa para el diseño de sistemas de calentamiento con MO y ondas de RF (Chow Ting Chang *et al.*, 2004; Marra *et al.*, 2009; Ramaswamy y Tang, 2008). Su mayor desafío es validar los resultados con datos experimentales. Incluso, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2000) ha identificado al estudio de los efectos de la formulación de los alimentos sobre los patrones de calentamiento durante la exposición a microondas como un área de investigación.

95) se elaboraron rebanadas de gel de agar (2%) con dos espesores (0.9 cm y 3 cm), las cuales fueron calentadas en un horno de MO durante 7 min. Estos investigadores midieron la temperatura de las muestras en diferentes puntos para determinar el perfil de temperatura experimental; éste fue comparado con las predicciones de potencia y de perfiles de temperatura obtenidos por las ecuaciones de Maxwell, la Ley de Lambert y una combinación de éstas, encontrando que las ecuaciones de Maxwell dieron predicciones más precisas. Además, constataron que el cambio de espesor en las rebanadas de gel de agar afecta el perfil de temperatura, para rebanadas angostas un cambio pequeño en su espesor causa una gran diferencia en la temperatura final, mientras que un cambio de espesor en rebanadas gruesas afecta en menor grado al perfil de temperatura.

Yang y Gunasekaran (2004) elaboraron cilindros de gel de agar (2%) con diferentes dimensiones (radio: 3.5 y 4 cm; altura: 7cm), los cuales fueron sometidos a calentamiento utilizando energía de MO continua e intermitente. En este trabajo se predijo la distribución de temperatura dentro de la muestra utilizando la ley de Lambert y las ecuaciones de Maxwell, y al igual que Barringer *et al.* (1995), se demostró que las ecuaciones de Maxwell fueron más exactas estadísticamente. Los resultados experimentales y los predichos en los cilindros de gel de agar sometidos a calentamiento intermitente mostraron una mayor uniformidad; sin embargo, el tiempo de proceso fue mayor en comparación al calentamiento continuo. Previamente, Yang y Gunasekaran (2001) determinaron los perfiles de temperatura en sistemas modelo cilíndricos de gel de agar (2%), los cuales fueron tratados térmicamente por MO en ciclos intermitentes; y encontraron mayor uniformidad en el

calentamiento intermitente con períodos de apagado más largos.

Campañone *et al.* (2012) desarrollaron un modelo de simulación para el calentamiento en hornos de MO y su uso para optimizar las estrategias de calentamiento. Para ello utilizaron diferentes programas de cómputo (Comsol Multiphysics 3.2 de elementos finitos, UMFPACK para resolver sistemas lineales y MATLAB 6.5), con los cuales resolvieron matrices de ecuaciones diferenciales basadas en las ecuaciones de Maxwell, que describieron la interacción entre la radiación electromagnética y el alimento. Además, resolvieron ecuaciones de balance de energía y de masa, con las cuales formaron ecuaciones diferenciales parciales no lineales. Estos autores utilizaron los datos reportados en la literatura de sistemas modelo para realizar la modelación, encontrando que en los productos pequeños, la potencia absorbida presenta un comportamiento ondulatorio, el cual se predice con más exactitud con las ecuaciones de Maxwell, mientras que para productos grandes (espesor mayor a 4 cm) el comportamiento es predicho con más exactitud por la ley de Lambert.

4.1. Calentamiento con radiofrecuencia

La simulación del calentamiento con RF utilizando herramientas de cómputo puede realizarse en dos categorías. La primera simula la transferencia de calor dentro del producto que se encuentra entre los electrodos y se enfoca principalmente en la descripción de fenómenos de transporte dentro del alimento. La segunda categoría simula al calentamiento por RF en términos de sus campos magnéticos y eléctricos (Marra *et al.*, 2009). En la simulación del calentamiento con RF se usan principalmente las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial, las cuales incluyen a las ecuaciones de las leyes de Faraday, Ampere y Gauss para campos eléctricos y la

correspondiente a la ley de Gauss para campos magnéticos (Marra *et al.*, 2009). En conjunto con las anteriores también se han utilizado las ecuaciones de Navier-Stokes (Birla *et al.*, 2008) y la de onda (Chow Ting Chang *et al.*, 2004). Entre los programas de cómputo que se han utilizado para modelar el calentamiento por ondas de RF, de sistemas modelo, se encuentran: HFSS®, FEMLAB®, ANSYS® y CST Microwave Studio (Chow Ting Chang *et al.*, 2004; Birla *et al.*, 2008).

La medición de la temperatura, en los trabajos que han modelado el calentamiento con ondas de RF, se ha realizado con fibras ópticas, termopares y con cámara térmica infrarroja (Chow Ting Chang *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2008; Birla *et al.*, 2008). Con las temperaturas obtenidas experimentalmente se realizan patrones de calentamiento; éstos pueden ser comparados con los perfiles de temperatura simulados (Chow Ting Chang *et al.*, 2004), o sirven para evaluar la uniformidad del calentamiento en el objeto analizado (Wang *et al.*, 2008; Birla *et al.*, 2008).

Chow Ting Chang *et al.* (2004) realizaron la modelación de un sistema de calentamiento con RF a nivel industrial, calentando soluciones de carboximetilcelulosa (CMC) al 1%, colocadas en contenedores de plástico en diferentes posiciones dentro del equipo; aunque este modelo de simulación no predijo exactamente las temperaturas, sí predijo los patrones de calentamiento en las soluciones de CMC.

Birla *et al.* (2008) modelaron el calentamiento con RF de frutas modelo (esféricas) sumergidas en agua, elaboradas con gel de gelano (1%). Encontraron que las frutas modelo sumergidas tuvieron un patrón de calentamiento más uniforme al compararlas con frutas modelo rodeadas de aire sometidas a calentamiento con RF; sin embargo, se presentaron puntos más calientes en posiciones horizontales. Por lo que este estudio sugiere

que el movimiento y la rotación de los objetos esféricos podría ser una solución para mejorar la uniformidad del calentamiento por RF.

Wang *et al.* (2008) evaluaron la uniformidad del calentamiento por RF en agua y en soluciones de carboximetilcelulosa (CMC) al 1%, las cuales fueron colocadas en dos tipos de charolas, una con contenedores pequeños y una lisa. Estos investigadores encontraron que el área más caliente fue la que estaba más cerca del centro del electrodo. Además, el gradiente de temperatura para las soluciones de CMC fue mayor que para el agua, por lo que estos autores concluyen que los materiales con un ϵ'' bajo se calientan más uniformemente que los materiales con un ϵ'' alto.

La geometría de los sistemas modelo alimenticios también ha sido abordada. Marra *et al.* (2007); Birla *et al.* (2008) y Romano y Marra (2008) han reportado que durante el calentamiento con RF hay una gran influencia de la geometría: los cubos mostraron calentamiento más uniforme, mientras que los cilindros deben ser colocados en posición vertical respecto a los electrodos para mejorar la uniformidad. Chow Ting Chang *et al.* (2004) mencionan que la geometría, el tamaño y la posición de las muestras afectan los patrones de calentamiento, obteniéndose una mejor uniformidad al colocarlas verticalmente en el centro de los electrodos.

La distribución de temperaturas es compleja y se requieren más estudios que identifiquen el efecto de la geometría, el tamaño y la composición sobre la misma, al someter un producto a MO u ondas de RF.

Conclusiones y comentarios finales

Es de suma importancia conocer las propiedades dieléctricas, físicas y térmicas de

los diferentes sistemas modelo para que la modelación del calentamiento dieléctrico sea más precisa. Entre los materiales que se han utilizado para la modelación del calentamiento dieléctrico están agar, gelano, carboximetilcelulosa y proteína de suero; sin embargo hay poca información sobre sus propiedades dieléctricas, térmicas y físicas.

La modelación matemática ayuda a entender el calentamiento con MO y ondas de RF en alimentos y es necesario continuar desarrollándola. Además, la modelación del calentamiento dieléctrico en sistemas modelo alimenticios ha propuesto diferentes soluciones para mejorar la uniformidad de la temperatura dentro del material tratado con MO u ondas de RF. Con los avances tecnológicos de los últimos años, además de la computadora, también se pueden incluir en los estudios de modelación instrumentos como la cámara infrarroja para obtener los perfiles de temperatura por el análisis de imágenes.

Respecto a la modelación del calentamiento por MO, ésta se ha centrado en describir perfiles de temperatura y la falta de uniformidad de este tipo de calentamiento. Involucra la absorción de la energía de MO y la distribución de la temperatura dentro del producto. Depende de los ciclos de operación, y de la geometría, tamaño y propiedades del material. Además, la modelación del calentamiento por MO ha sido más investigada en sistemas modelo sólidos que en líquidos.

Se sugiere que en futuras investigaciones sobre la modelación del calentamiento dieléctrico en sistemas modelo no sólo se evalúen los perfiles de temperatura, sino también se analice la presencia de factores como microorganismos patógenos o deteriorativos, insectos, nutrientes, entre otros, con el fin de saber cuál es el efecto del calentamiento dieléctrico en ellos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) y a la UDLAP (Universidad de las Américas Puebla) por las becas otorgadas a N. Soto Reyes para realizar sus estudios de Doctorado en Ciencias, así como al CONACYT por el proyecto 168990.

Referencias

Barringer, S.A., Davis, E.A., Gordon, J., Ayappa, K.G. y Davis, H.T. 1995. Microwave-heating temperature profiles for thin slabs compared to Maxwell y Lambert law predictions. *Journal of Food Science*. 60 (5): 1137-1142.

Birla, S.L., Wang, S., Tang, J. y Hallman, G. 2004. Improving heat uniformity of fresh fruit in radio frequency treatments for pest control. *Postharvest Biology and Technology*. 33: 205-217.

Birla, S.L., Wang, S. y Tang, J. 2008. Computer simulation of radio frequency heating of model fruit immersed in water. *Journal of Food Engineering*. 84: 270-280.

Campañone, L.A., Paola, C.A. y Mascheroni, R.H. 2012. Modeling and simulation of microwave heating of foods under different process schedules. *Food and Bioprocess Technology*. 5: 738-749.

Chow Ting Chang, T.V., Tang, J. y Younce, F. 2004. 3-Dimensional numerical modeling of an industrial radio frequency heating system using finite elements. *Journal of Microwave Power & Electromagnetic energy*. 39(2): 87-105.

Hossan, M.R., Byun, D.Y. y Dutta, P. 2010. Analysis of microwave heating for cylindrical shaped objects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53: 5129-5138.

Marra, F., Lyng, J., Romano, V. y McKenna, B. 2007. Radiofrequency heating of foodstuff: Solution and validation of a mathematical model. *Journal of Food Engineering*. 79(3): 998–1006.

Marra, F., Zhang, L. y Lyng, J. 2009. Radio frequency treatment of foods: Review of recent advances. *Journal of Food Engineering*. 91: 497-508.

Romano, V. y Marra, F. 2008. A numerical analysis of radio frequency heating of regular shaped foodstuff. *Journal of Food Engineering*. 84: 449–457.

Ramaswamy, H. y Tang, J. 2008. Microwave and radio frequency heating. *Food Science and Technology International*. 14 (5): 423-427.

Sakai, N., Mao, W., Koshima, Y. y Watanabe, M. 2005. A method for developing model food system in

microwave heating studies. *Journal of Food Engineering*. 66: 525-531.

Salazar-González, C., San Martín-González, M.F., López-Malo, A. y Sosa-Morales, M.E. 2012. Recent studies related to microwave processing of fluid foods. *Food and Bioprocess Tehcnology*. 5: 31-46.

Sosa-Morales, M.E., Tiwari, G., Wang, S., Tang, J., García, H.S. y López-Malo, A. 2009. Dielectric heating as potential post-harvest treatment of disinfesting mangoes, part II: development of RF-based protocols and quality evaluation of treated fruits. *Biosystems Engineering*. 103: 287-296.

Sosa-Morales, M.E., Valerio-Junco, L., López-Malo, A. y García, H.S. 2010. Review: Dielectric properties of foods: reported data in the 21st century and their potential applications. *Food Science and Technology*. 43: 1169-1179.

Swain, M.V.L., Russell, S.L., Clarke, R.N. y Swain, M.J. 2004. The development of food simulants for microwave oven testing. *International Journal of Food Science and Technology*. 39: 623-630.

USDA. United States Food and Drug Administration. 2000. Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies. Microwave and radio frequency processing. Disponible en: <http://vm.cfsan.fda.gov/~comm/ift-micr.html>. Consultado el 07 de Noviembre de 2011.

Vandivambal, R. y Jayas, D.S. 2010. Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials- A review. *Food and Bioprocess Technology*. 3: 161-171.

Venkatesh, M.S. y Raghavan, G.S.V. 2004. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering*. 88 (1): 1-18.

Villa-Rojas, R., López-Malo, A. y Sosa-Morales, M.E. 2011. Hot water bath treatments assisted by microwave energy to delay postharvest ripening and decay in strawberries (*Fragaria x ananassa*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 91: 2265-2270.

Wang, S., Tang, J. y Cavalieri R.P. 2001. Modelling fruit heating rates for hot air and hot water treatments. *Postharvest Biology and Technology*. 22: 257-270.

Wang, S., Tang, J., Cavalieri, R.P. y Davis, D.C. 2003a. Differential heating of insects in dried nuts and fruit associated with radio frequency and microwave treatments. *Transaction of the ASAE*. 46(4): 1175-1182.

Wang, Y., Wig, T.D., Tang, J. y Hallberg, L.M. 2003 b. Dielectric properties of foods relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization. *Journal of Food Engineering*. 57: 257-268.

Wang, S., Monzon, M., Gazit, Y., Tang, J., Mitcham, E.J. y Amstrong, J.W. 2005. Temperature-dependent dielectric properties of selected subtropical and tropical fruits and associated insects pests. *Transaction of the ASAE*. 48(5): 1-9.

Wang, S., Luechapattanaporn, K. y Tang, J. 2008. Experimental methods for evaluating heating uniformity in radio frequency systems. *Biosystems Engineering*. 100: 58-65.

Yang, H.W. y Gunasekaran, S. 2001. Temperature profiles in cylindrical model food during pulsed microwave heating. *Journal of Food Science*. 66 (7): 998-1004.

Yang, H.W. y Gunasekaran, S. 2004. Comparison of temperature distribution in model food cylinders based on Maxwell's equations and Lambert's law during pulsed microwave heating. *Journal of Food Engineering*. 64: 445-453.