

# Aplicaciones de las ondas electromagnéticas en productos alimenticios

**RESUMEN:** Las altas frecuencias tienen un gran potencial dentro de la tecnología de alimentos, tanto en el ámbito doméstico como en el industrial. En el ámbito doméstico, el horno microondas es un equipo conocido que hoy en día se ha convertido en un elemento importante en las cocinas del mundo desarrollado. En el caso de la industria alimentaria, el uso de las microondas y radiofrecuencias es todavía escaso debido a la necesidad de equipos y personal especializado.

La falta de aplicación de esta tecnología viene relacionada con la falta de conocimiento de lo que es un calentamiento por altas frecuencias y el desconocimiento de los factores críticos que determinarán la calidad de este calentamiento (constantes dieléctricas, geometría del producto, distribución en el envase, etc.). Con este artículo se busca aclarar las bases de esta tecnología, además de describir algunas aplicaciones.

**PALABRAS CLAVE:** Ondas electromagnéticas, tecnología alimentaria, microondas, radiofrecuencias.

**SUMMARY:** High frequency waves have a great potential in Food technology, both at house-cooking or industrial use. At home, microwave oven is a widely used equipment at kitchens of developed world. By contrast, in the Food Industry, the use of microwave and radio-frequency techniques is relatively small as a consequence of the need of equipment and specialised staff.

The low application of such technology is related to the poor knowledge of the heating process through high frequencies as well as their critical factors that determine the quality of the heating process (dielectric constants, product geometry, distribution in the packaging, etc.). This article intends to clarify the basis of this technology besides describing some applications.

## INTRODUCCIÓN

La luz, las microondas, los rayos X, las ondas de radio, etc., son ondas electromagnéticas que se distinguen entre sí por su longitud de onda.

Se entiende por altas frecuencias las ondas electromagnéticas que van

desde 30 kHz a 30 GHz. Dentro de ellas se pueden encontrar: las radiofrecuencias, que corresponden a ondas entre 30 kHz a 300 MHz y las microondas, que corresponden a ondas entre 300 MHz y 30 GHz.

Las altas frecuencias en el mundo de la tecnología de alimentos son bien conocidas debido al uso del

horno microondas doméstico, que hoy en día se ha convertido en un elemento importante en las cocinas del mundo desarrollado. En el ámbito industrial, la aplicación de las altas frecuencias se puede encontrar en una variedad de procesos (Rowley, 2001; Regier y Schubert, 2001), como: la vulcanización y fusión de plásticos, el secado de madera, tejidos y papel, el estudio de la estructura de la madera, etc. (Bucur, 2003), y dentro de la industria alimentaria, a más pequeña escala, para la descongelación, el secado, la pasteurización y la esterilización de productos frescos y elaborados (informe de la FDA, 2000).

En el ámbito doméstico, el horno microondas es utilizado para descongelar alimentos, calentar líquidos y recalentar productos ya cocinados (Brody, 2001), pero en pocas ocasiones para cocinar alimentos, por lo que no ha conseguido reemplazar al horno tradicional. En la industria alimentaria, el coste del equipo y la necesidad de tener personal cualificado para el mantenimiento y la utilización de los equipos hace que pocas empresas quieran invertir en estas tecnologías (Regier y Schubert, 2001).

Según Shukia (1998), la razón principal de la poca o mala utilización

de las altas frecuencias en el ámbito doméstico, específicamente las microondas, es que aún no se ha llegado a comprender completamente la acción de las microondas y la necesidad de que el producto en sí esté diseñado para su uso con esta tecnología. Es decir, las constantes dieléctricas del producto, la geometría (la disposición de los alimentos en un plato o envase, la forma del alimento, etc.), su composición y su distribución son parámetros importantes que han de ser controlados y estudiados de cara a un óptimo rendimiento de las microondas (Ryynänen y Ohlsson, 1996; Brody, 2001; Ryynänen, 2002).

Como puede observarse, la aplicación de ondas electromagnéticas sobre productos alimenticios no es de conocimiento general. En este artículo se pretende describir la tecnología y enumerar algunas de las posibles aplicaciones, muchas de las cuales se están llevando a cabo en la actualidad.

### PRINCIPIO DEL CALENTAMIENTO POR ALTAS FRECUENCIAS

#### Microondas y radiofrecuencias

El calentamiento por ondas electromagnéticas de baja energía, ya sea por microondas o radiofrecuencias,

se basa en la agitación de las moléculas polares, como la molécula de agua, presentes en los alimentos. Ambos calentamientos se diferencian entre sí por la frecuencia y la forma de generar el calor.

Como se ha mencionado, las microondas (MO) cubren frecuencias entre 300 MHz y casi 30 GHz y son generadas por un magnetrón (figura 1). El magnetrón es un tubo que consiste en un filamento caliente cargado con una corriente directa, construido dentro de una cavidad resonante, y sometido a un campo magnético. Al ponerse en marcha el magnetrón los electrones creados por el filamento se agitan en la cavidad a una frecuencia resonante, emitiendo así una onda electromagnética. El paso siguiente es transferir esta onda al producto, mediante una guía de onda.

#### Microondas (MO)

En el caso de las microondas, según el tipo de cavidad y la guía de ondas que se utilice (figura 3), esta transferencia puede ser: *a) directa*, es decir que no hay reflexión de la microonda sino que la onda va *directa* al producto (en este caso se habla de un horno microondas monomodo), o *b) indirecta*, lo que indica que antes de llegar al producto la micro-

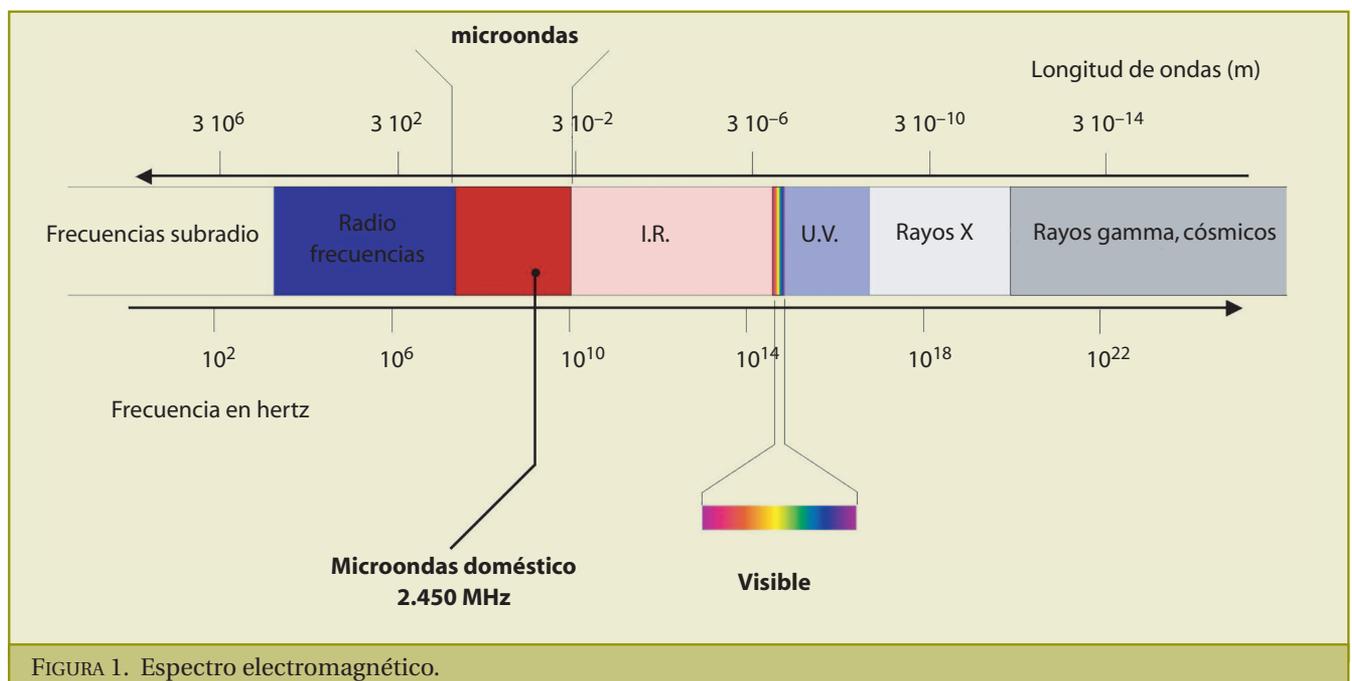


FIGURA 1. Espectro electromagnético.

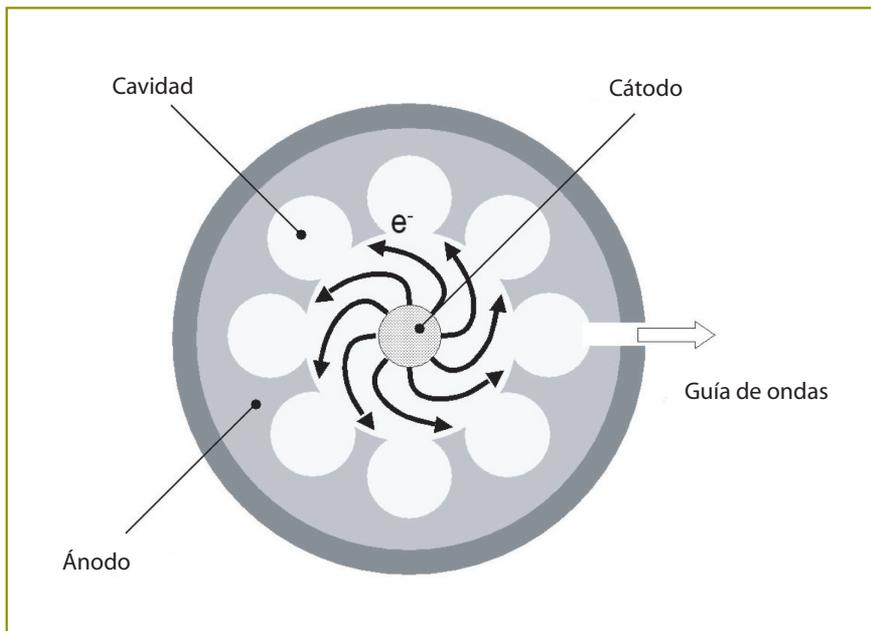


FIGURA 2. Esquema simplificado de un magnetrón. Las flechas en negro indican el movimiento de los electrones que se agitarán en las cavidades a una frecuencia determinada.

Respecto a la ventana de frecuencias en las que se puede trabajar con las altas frecuencias, 30 kHz-30 GHz, el espectro electromagnético se utiliza, en su mayor parte, para el intercambio de informaciones (radio, televisión, telefonía móvil, tecnología *bluetooth*, etc.). Las bandas utilizables para aplicaciones industriales y científico-médicas, dentro de éstas las del ámbito alimentario, han sido definidas por la International Telecommunication Union. Estas bandas son llamadas también bandas *Industrial, Science and Medical* (I. S. M.) (tabla 1).

### La generación de calor en un alimento

El calentamiento por MO o RF actúa sobre moléculas polares, o sea que presentan una zona negativa y una zona positiva; un ejemplo típico es la molécula del agua. Es así como estas moléculas, al estar sometidas a un campo eléctrico, se comportan como un dipolo y siguen la dirección de dicho campo. Este efecto provoca un movimiento desordenado, una agitación de la molécula polar, lo que finalmente se traduce en calor.

Se define el flujo de calor generado por unidad de volumen ( $Q$ ) como:

$$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2$$

Donde  $f$  es la frecuencia de la onda electromagnética en hertz;  $\epsilon_0$ , la permitividad del vacío cuyo valor es  $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ J}^{-1} \cdot \text{C}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\epsilon''$ , el factor de pérdidas que depende del alimento o material, y  $E$ , la amplitud del campo eléctrico en el interior del producto.

Otro factor importante a tener en cuenta al referirse a calentamiento por altas frecuencias es la denominada constante dieléctrica,  $\epsilon'$ . La que a su vez nos permite definir la tangente de pérdidas ( $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$ ).

Otro parámetro a definir es la distancia de penetración de la onda  $D_p$  (Buffler, 1993), representada por la siguiente ecuación:

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{2\epsilon'}} \times \left( \sqrt{1 + (\epsilon''/\epsilon')^2} - 1 \right)^{0,5}$$

onda habrá rebotado varias veces (puede llegar a más de mil veces en un horno doméstico) generando cada vez un *modo* de reflexión (en este caso se habla de un horno microondas multimodos).

La ventaja principal del equipo monomodo es que cada vez que se genera un *modo* (o sea, cada vez que rebote la onda), se pierde energía, lo que hace que la transferencia de la potencia eléctrica sea mejor que en un horno multimodos (ej.: horno doméstico). Por el contrario, la desventaja principal de este sistema es que la cavidad y la guía de ondas tienen que ser diseñadas y adaptadas al producto que se quiera calentar.

### Radiofrecuencias (RF)

Las RF son generadas mediante un sistema de electrodos (*aplicador*) acoplados a un generador alternativo cuya frecuencia es controlada por un sintonizador (figura 4). En el caso de las RF, existen dos tecnologías para llevar la potencia eléctrica al *aplicador*. La primera tecnología es la llamada tecnología *convencional*, donde el generador y el sintonizador se sitúan a menos de un metro del *aplicador*. La segunda tecnología, llamada *50 ohm*, presenta el generador a varios metros del *aplicador*, y utiliza un sintonizador más complejo que, además, es más caro que el que se usa en la tecnología convencional.

TABLA 1. Bandas I. S. M. autorizadas

Microondas	Longitud de onda ( $\lambda$ )	Homogeneidad de la onda <sup>1</sup>
5.725-5.850 MHz	22,14-22,11 n	3,69 m
2.400-2.483,5 MHz	11,13-11,00 m	1,84 m
908-928 MHz	7,38-7,37 m	1,23 m
433,05-434,79 MHz	0,693-0,690 m	0,115 m
<b>Radiofrecuencias</b>		
40,66-40,70 MHz	0,330-0,323 m	5,4 cm
26,96-27,28 MHz	0,125-0,121 m	2,0 cm
13,55-13,57 MHz	0,052-0,051 m	0,9 cm

1. Distancia por la cual la onda electromagnética se consideraba homogénea.

Todos estos parámetros son muy importantes ya que condicionan directamente la eficacia del calentamiento por microondas y/o radiofrecuencias. Algunos de estos parámetros, como  $\epsilon''$  y  $\epsilon'$ , están relacionados con las características fisicoquímicas del alimento y del envase. Otros, como la frecuencia y la amplitud del campo eléctrico ( $f$  y  $E$ ), hacen referencia a la generación de la onda electromagnética y el espacio geométrico donde se produce la irradiación (denominado *cavidad* en el caso de las microondas, y *zona de aplicación* en el caso de las radiofrecuencias).

El parámetro  $D_p$  es importante porque condiciona en qué zona del alimento las altas frecuencias generarán calor. En la figura 5 se muestra una secuencia en dos dimensiones que corresponde a un calentamiento por altas frecuencias. Según el tamaño y/o espesor de la muestra, las ondas electromagnéticas calentarán la parte externa del producto y a partir de aquí es la transferencia térmica la que facilitará el calentamiento del corazón y la homogeneización de la temperatura.

### Los parámetros dieléctricos $\epsilon''$ y $\epsilon'$

Las propiedades dieléctricas describen como los materiales poco conductivos interactúan con el campo eléctrico de la radiación electromagnética. Estos parámetros, a pesar de llamarse constantes, son variables con distintos factores, como: la frecuencia del campo electromagnético, la temperatura del material, la actividad del agua, las concentraciones de sales, el contenido en grasa, etc. En la figura 6 se muestran las constantes dieléctricas  $\epsilon''$  y  $\epsilon'$  a 25 °C para una frecuencia de 2.450 MHz.

Estos datos son válidos a temperatura ambiente ya que al aumentar de temperatura las constantes dieléctricas cambian, especialmente la constante  $\epsilon''$ , que tiene tendencia a bajar, lo que se traduce en que el calentamiento por microondas sea menos eficaz.

En la figura 7 se muestran los datos presentados por Zhang *et al.* (2004) sobre el efecto de la frecuen-

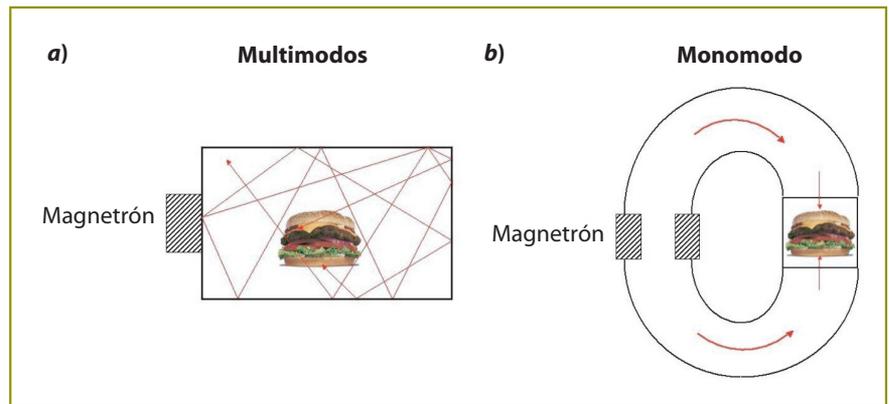


FIGURA 3. Horno microondas con dos sistemas de cavidad y de guías de ondas: a) sistema multimodos (horno doméstico) y b) sistema monomodo (donde la microonda llega directamente al producto).

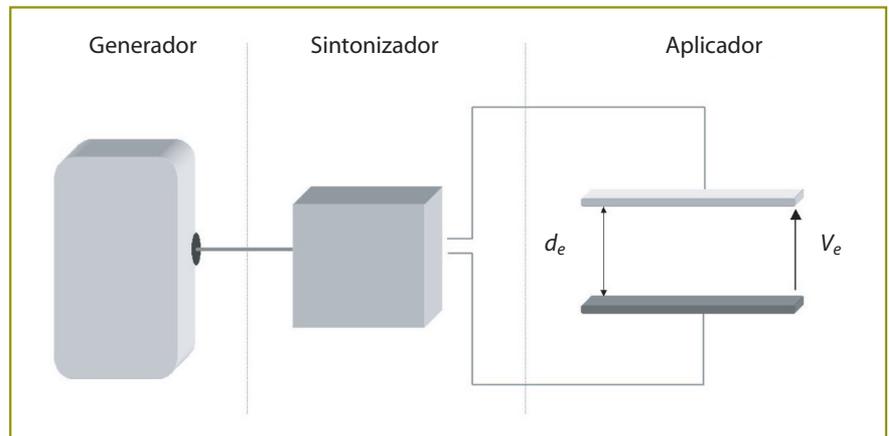


FIGURA 4. Esquema simplificado de un sistema generador de radiofrecuencias. El aplicador corresponde a dos electrodos alimentados por un generador y cuya frecuencia es controlada por el sintonizador.  $V_e$  es la tensión aplicada entre los electrodos y  $d_e$  la distancia.

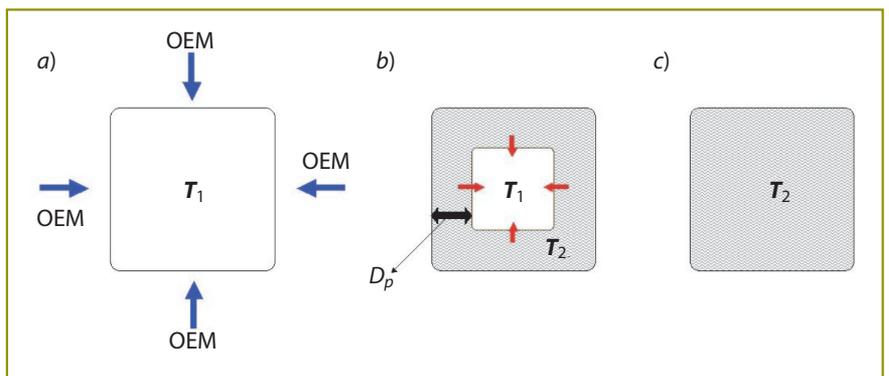


FIGURA 5. Proceso de calentamiento por altas frecuencias: a) la onda electromagnética (OEM) llega al producto (temperatura  $T_1$ ) por todas las direcciones; b) la generación de calor por OEM se realiza en la zona definida por la  $D_p$ ,  $T_2 > T_1$ , comienza la difusión del calor por el producto, y c) la parte central del producto se calienta y se homogeneiza la temperatura por transferencia térmica.

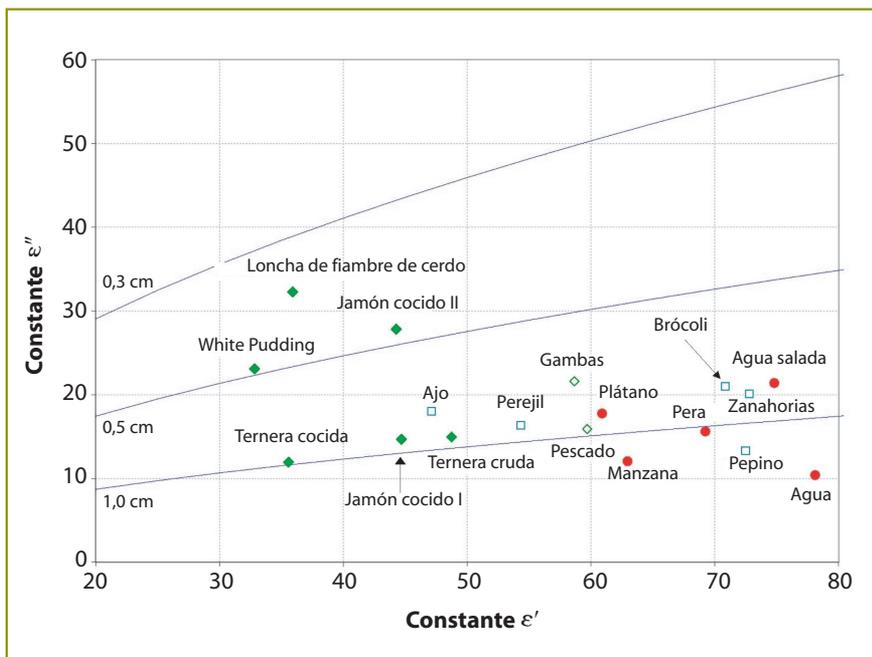


FIGURA 6. Constantes dieléctricas  $\epsilon'$  versus  $\epsilon''$  a 2.450 MHz y 25 °C, para diferentes productos. El agua salada contiene un mol de NaCl. Los datos han sido extractados o calculados con modelos publicados por: Calay *et al.* (1995), Zheng *et al.* (1998), Sipahioglu *et al.* (2003), Sipahioglu y Barriguer (2003), Regier y Schuber (2004), y Zhang *et al.* (2004).

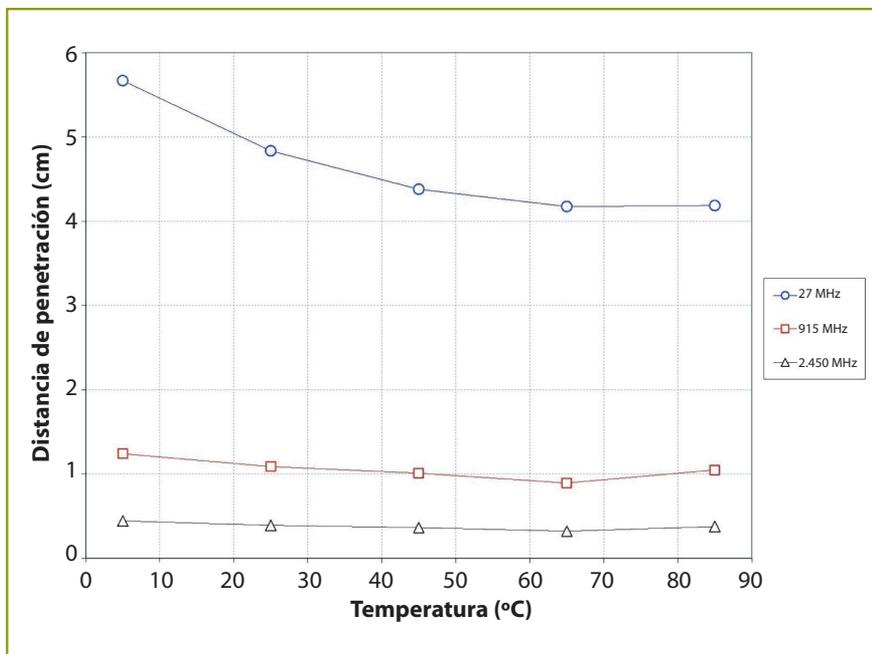


FIGURA 7. Evolución de la distancia de penetración ( $D_p$ ) respecto a la temperatura de un producto cárnico (*Pork Luncheon Roll*) utilizando varias frecuencias (datos de Zhang *et al.*, 2004).

cia y de la temperatura sobre la distancia de penetración de un producto elaborado de cerdo (*Pork Luncheon Roll*). En esta figura se observa el cambio de  $D_p$  a temperatura cons-

tante según la frecuencia utilizada. A 45 °C  $D_p$  presenta un valor de 4,4 cm a una frecuencia de 27 MHz y de sólo 0,4 cm para 2.450 MHz. Sin embargo, también se puede obser-

var un cambio en  $D_p$  a medida que aumenta la temperatura del producto; mientras mayor sea la temperatura menor será la  $D_p$ , especialmente en el caso de las RF.

## APLICACIONES DE LAS ALTAS FRECUENCIAS

### Calentamiento

La aplicación primera de las altas frecuencias es el calentamiento. Por lo general, en los procesos de calentamiento en el ámbito doméstico o de empresas dedicadas a la restauración se busca calentar un producto a una temperatura homogénea superior a 65 °C (RD 3484/2000).

Los microondas domésticos utilizan una frecuencia de 2.450 MHz, un sistema multimodos y una potencia eléctrica máxima de 900W. Uno de los inconvenientes de estos equipos es la heterogeneidad del calentamiento, lo que puede llegar a ser un problema que puede tener solución (Ryynänen *et al.*, 2004). Al no poder cambiar el modo de llevar la microonda, las modificaciones se han de enfocar sobre la geometría del producto, la disposición en el envase, la composición, el tipo de envase, etc., ya que según Ryynänen *et al.* (2004), algunos de éstos son los factores que más influencia tienen sobre la aparición de puntos de calor (*hot spots*). La figura 8 muestra el calentamiento de salchichas de cerdo en un envase, no adaptado especialmente al producto, donde se puede observar que las extremidades se calientan más rápidamente que el corazón. En sólo treinta segundos de tratamiento se puede observar una diferencia de temperatura de 22 °C entre los bordes y el corazón del producto.

### Pasteurización

Otra aplicación de las altas frecuencias es la pasteurización de productos. El hecho de que con las altas frecuencias se puedan alcanzar temperaturas elevadas en un tiempo reducido hace que esta tecnología sea una alternativa interesante para estas aplicaciones.

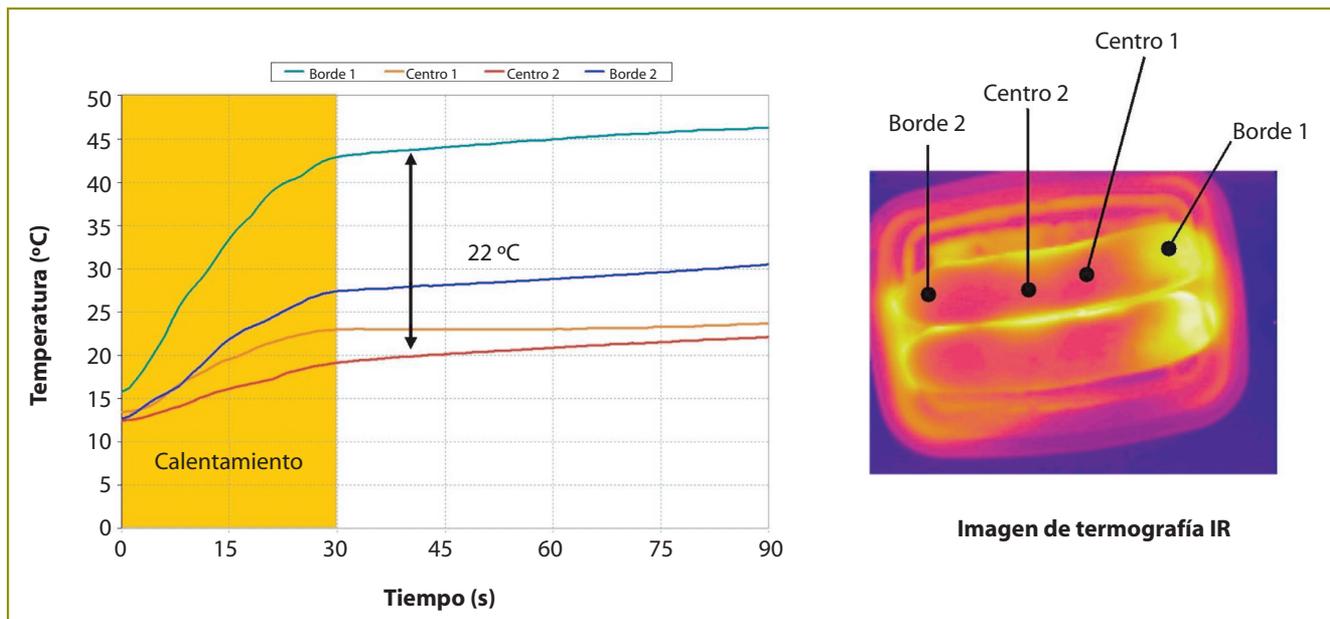


FIGURA 8. Perfil de temperatura e imagen de termografía infrarrojo, mostrando el calentamiento de una salchicha de cerdo durante treinta segundos en un horno doméstico a 900 W.

En la figura 9 se presenta el perfil de temperaturas registrado en el corazón del producto y el valor de pasteurización  $F_0$  de una loncha de jamón cocido envasada sometida a un calentamiento de dos minutos. Los datos muestran que el valor  $F_0$  alcanza valores de 805 al cabo de los dos minutos de calentamiento. Además, al dejar el producto dentro de su envase se puede llegar a valores de pasteurización de 1.000. En un plato precocido, un valor de  $F_0$  supe-

rior a 100 es considerado como adecuado para tener una vida útil de veintiún días (Beaufort y Rosset, 1989).

Estos datos indican que con un envase adecuado se podrían alcanzar temperaturas que permitirían la pasteurización del producto. Recientemente, Apostolou *et al.* (2005) publicaron la eficacia bactericida de un calentamiento por microondas con hornos domésticos (frecuencia 2.450 MHz con una

potencia de 650-800 W) en pechuga de pollo inoculada con *E. coli* O157:H7. Estos investigadores demostraron que con un tratamiento de treinta y cinco segundos alcanzaron una reducción de 6,18 ( $\text{ufc/g} \times 10^6$ ).

### Descongelación

La descongelación es otro proceso donde pueden aplicarse las altas frecuencias. La descongelación consiste en llevar un producto desde  $-30\text{ }^\circ\text{C}/-20\text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $-5\text{ }^\circ\text{C}/-2\text{ }^\circ\text{C}$ ,

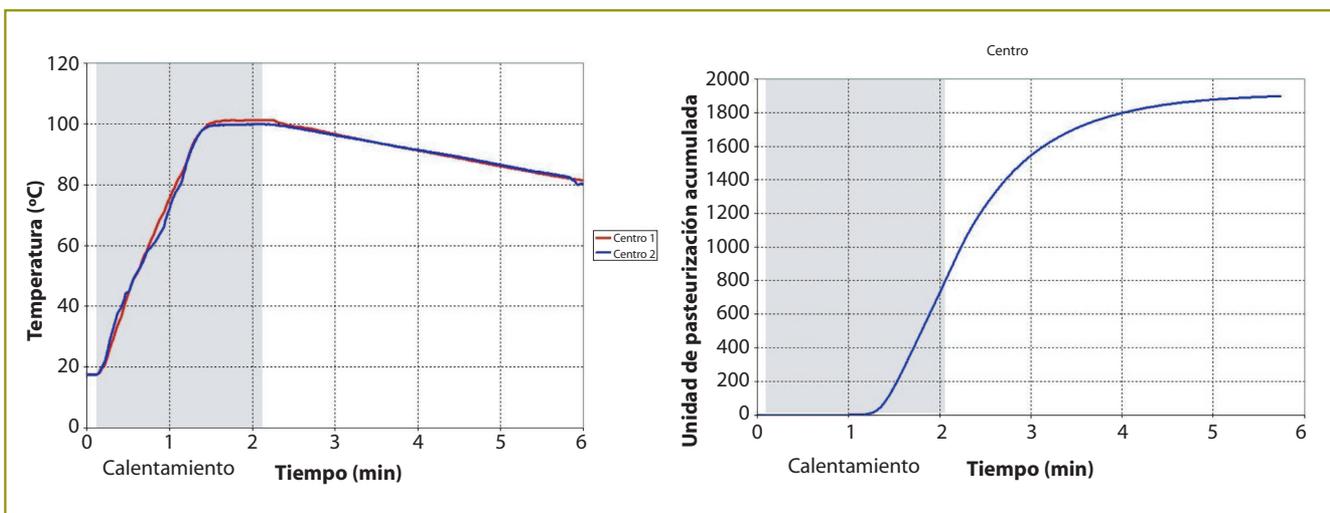


FIGURA 9. Calentamiento/pasteurización de una loncha de jamón cocido envasada. El proceso de calentamiento fue con un microondas a 900 W de potencia durante dos minutos. La figura de la izquierda presenta el perfil de temperaturas y la figura de la derecha, el valor de pasteurización acumulado,  $F_0$ .

temperatura a la cual dicho producto puede ser procesado. En los tratamientos convencionales el tiempo de descongelación es bastante largo, alrededor de veinticuatro horas para un bloque de carne de cerdo de 12 cm de espesor (datos Stalam Ltd). Mediante las altas frecuencias, particularmente las RF, este tiempo puede reducirse. En el caso del mismo bloque de carne de cerdo, con un equipo de radiofrecuencia (27,12 MHz), el tiempo de descongelación puede ser menor a ocho minutos. En el caso de las microondas (2.450 MHz), el tratamiento con un sistema monomodo es particularmente eficaz, pudiéndose calentar una hamburguesa de 135 g desde  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  en menos de veinticinco segundos.

En resumen, según Rowley (2001), mediante la descongelación por altas frecuencias puede obtenerse un proceso de una duración inferior a dos horas, con un exudado

alrededor del 1 %, lo que a su vez permite una disminución del crecimiento microbiológico, una reducción de la manipulación del producto y un aumento de la vida útil del producto.

### Secado

Las altas frecuencias también se pueden aplicar en los procesos de secado, muy utilizados en la industria textil, maderera y papelera (Rowley, 2001; Regier y Schubert, 2001). En el sector agroalimentario, las altas frecuencias se han utilizado en procesos de post-horneado para la producción de galletas, donuts, bollos, etc., y para el secado de hierbas, especias y vegetales (Rowley, 2001).

En los procesos de post-horneado los túneles eléctricos suelen tener una dimensión de más de sesenta metros. El localizar un equipo de radiofrecuencias al final del horno eléctrico (figura 10) permite reducir el tamaño del horno y

el consumo eléctrico de la línea y, además, mejorar la calidad de los productos eliminando el porcentaje de agua necesaria (Rowley, 2001).

### CONCLUSIONES

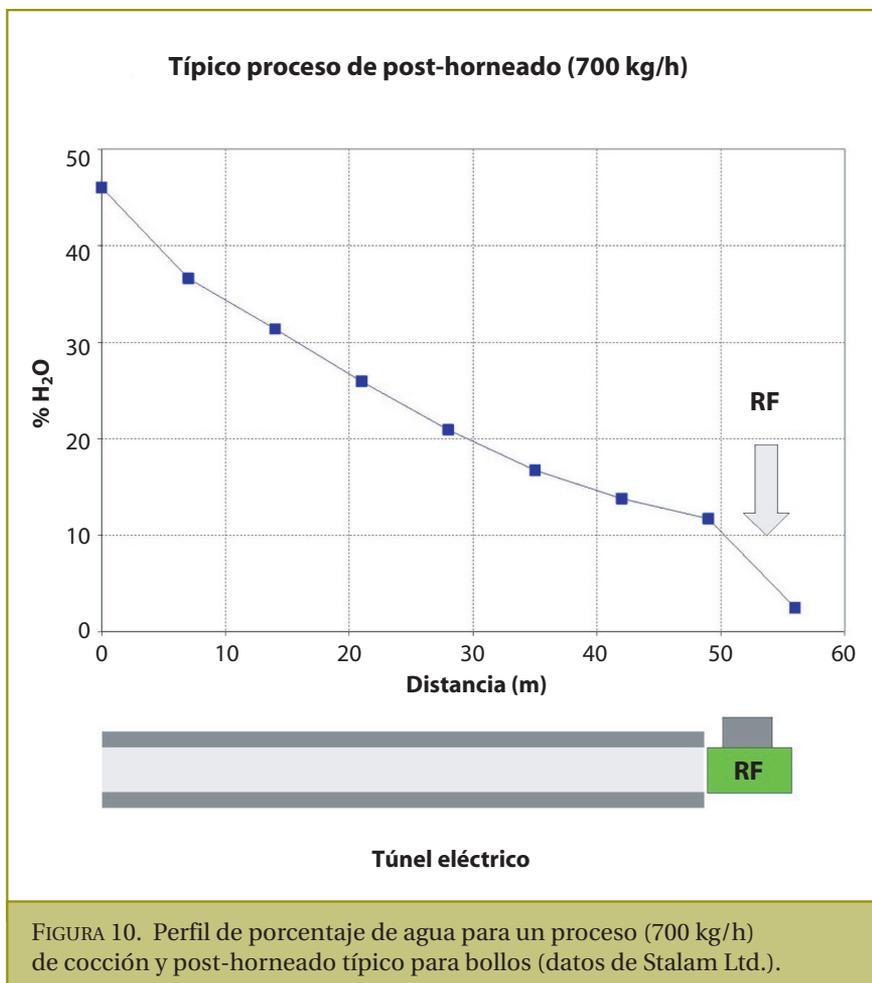
La tecnología de alimentos ha focalizado sus estudios para alargar la vida útil de los productos. En el pasado, estas tecnologías de conservación se basaban en tratamientos térmicos severos (calentamiento o congelación), disminución de la actividad de agua (secado, deshidratación, etc.), etc. En los últimos años, la demanda de productos frescos, con la mínima cantidad de aditivos posible, seguros desde el punto de vista higiénico, etc., ha hecho que la tecnología de alimentos se vea en la necesidad de estudiar nuevas formas de ofrecer al consumidor productos con las características que se demandan actualmente. Los tratamientos con altas frecuencias ofrecen una alternativa a los tratamientos térmicos convencionales con menos pérdidas organolépticas y una excelente calidad higiénica.

Es importante recordar que los procesos de calentamiento ocurren, en la gran mayoría de los casos, en los alimentos ya envasados. El envase será sometido a las mismas condiciones del producto, por lo que es muy importante que el envase sea capaz de resistir el tratamiento y mantener las condiciones de envasado hasta que el producto sea preparado y consumido.

Como puede observarse, a la hora de diseñar un producto que será calentado por altas frecuencias, es muy importante tener un conocimiento amplio de todos los factores críticos enumerados a continuación:

#### — *Alimento*

Se debe conocer la composición, el comportamiento de los parámetros dieléctricos respecto a la temperatura, la forma y el tamaño del alimento, si el alimento es simple o con componentes múltiples, si es líquido o sólido, etc.



### — Envase

Se debe tener en cuenta la forma del envase, si el envase es hermético o abierto, si hay presencia de un material absorbente, si hay presencia de susceptores u otros objetos metálicos que tienen por objetivo focalizar el efecto de las altas frecuencias, si el material es compatible con las altas frecuencias, etc.

### — Proceso

Tiempo, temperatura y potencia de tratamiento, si existe la posibilidad de combinar el tratamiento por altas frecuencias con un tratamiento térmico por vapor saturado, por aire caliente o frío, etc.

### — Equipo

Tamaño del equipo, frecuencia utilizada, adecuación de la cavidad al producto para un tratamiento monomodo, etc.

La respuesta a todas estas preguntas permite definir y optimizar un tratamiento por las altas frecuencias y disponer al final del tratamiento, como lo indica Bertrand (2005), de un producto que se procesa rápidamente y que tendrá una calidad nutricional, sensorial e higiénica excelente.

## BIBLIOGRAFÍA

APOSTOLOU, I.; PAPADOPOULOU, C.; LEVIDIOTOU, S.; IOANNIDES, K. (2005). «The effect of short-time microwave exposures on

Escheridia Coli O157:H7 inoculated chicken meat portion and whole chicken». *International Journal of Food Microbiology*, 101, p. 105-110.

BEAUFORT, A.; ROSSET, R. (1989). «Durée de vie des plats cuisinés sous-vide réfrigérés: Adaptation de la réglementation française». *Actualité des Industries Alimentaire et Agro-Industrielles, IAA*.

BERTRAND, K. (2005). «Microwables foods satisfy needs for speed and palatability». *Food Technology*, 59 (1), p. 30-34.

BRODY, A. (2001). «The return of microwaveable foods». *Food Technology*, 55 (3), p. 69-70.

BUCUR, V. (2003). «Techniques for high resolution imaging of wood structure: a review». *Meas. Sci. Technol.*, 14, R91-R98.

BUFFLER, C. H. (1993). «Dielectric properties of foods and microwave material». A: *Microwave Cooking and Processing*. Nova York: Van Nostrand Reinhold, p. 46-69.

CALAY, R. K.; NEWBOROUGH, M.; PROBERT, D.; CALAY, P. (1995). «Predictive equation for the dielectric properties of foods». *International Journal of Food Science and Technology*, 29, p. 699-713.

REGIER, M.; SCHUBERT, H. (2001). «Chap. 10. Microwave processing». A: *Thermal technologies in food processing*. Ed. P. Richardson, Woodhead Publishing Limited, p. 178-204.

ROWLEY, A. T. (2001). «Chap 9. Radio frequency heating». A: *Thermal technologies in food processing*. Ed. P. Richardson, Woodhead Publishing Limited, p. 163-177.

RYYNÄMEN, S. (2002). *Microwave heating uniformity of multicomponent prepared foods. PhD Dissertation*. Helsinki Yliopisto, 2002.

RYYNÄMEN, S.; OHLSSON, T. (1996). «Microwave heating uniformity of ready

meals as affected by placement, composition and geometry». *Journal of Food Science*, 63 (3), p. 620-624.

RYYNÄMEN, S.; RISMANN, P. O.; OHLSSON, T. (2004). «Hamburger composition and microwave uniformity». *Journal of Food Science*, 69 (7), M187-M196.

SIPAHIÖGLU, O.; BARRINGER, S. A. (2003). «Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of the temperature, ash and moisture content». *Journal of Food Science*, 68 (1), p. 234-239.

SIPAHIÖGLU, O.; BARRINGER, S. A.; TAUB, I.; PRAKASH, A. (2003). «Modeling the dielectric properties of ham as a function of temperature and composition». *Journal of Food Science*, 68 (3), p. 904-909.

SIPAHIÖGLU, O.; BARRINGER, S. A.; TAUB, I.; YANG, A. P. P. (2003). «Characterization and modelling of dielectric properties of turkey meat». *Journal of Food Science*, 68 (2), p. 521-527.

SHUKLA, T. P. (1998). «Microwaveable food ingredients». *Food Technology*, 43 (10), p. 770-772.

U. S. FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. CENTER FOR FOOD SAFETY AND APPLIED NUTRITION (2000). «Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies». *Journal of Food Science*, supl., p. 1-108.

ZHANG, L.; LYNG, J. G.; BRUNTON, N.; MORGAN, D.; MC KENNA, B. (2004). «Dielectric and thermophysical properties of meat batters over a temperature range of 5-85 °C». *Meat Science*, 68, p. 173-184.

ZHENG, M.; HUANG, Y. H.; NELSON, S. O.; BARTLEY, P. G.; GATES, K. W. (1998). «Dielectric properties and thermal conductivity of marinated shrimp and channel catfish». *Journal of Food Science*, 63 (4), p. 668-672.