



Aplicación de los susceptores en el procesamiento de alimentos mediante microondas

Flor Elizabeth de León-Serna* y Nelly Ramírez-Corona

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos

Correos electrónicos: flor.deleonsa@udlap.mx • nelly.ramirez@udlap.mx

De León Serna, F. E. y Ramírez Corona, N. (2024). Aplicación de los susceptores en el procesamiento de alimentos mediante microondas. *TSIA*, 18.

RESUMEN

La tecnología del microondas ha crecido exponencialmente en el procesamiento de alimentos debido a las grandes ventajas que ofrece frente a otras tecnologías, como la reducción de tiempo de cocción y del consumo de energía. Sin embargo, existen ciertos defectos de calidad relacionados con la aplicación de esta tecnología, principalmente la falta de oscurecimiento y crocancia. Los susceptores son materiales que absorben la energía del microondas y la transfieren en forma de calor al alimento, lo que permite obtener productos con características deseables para el consumidor. Por lo tanto, el objetivo del presente artículo de revisión es brindar un panorama general de los materiales y la aplicación de los susceptores en el procesamiento de los alimentos, así como presentar una revisión de los mecanismos de transferencia de calor involucrados y el uso de algunos modelos matemáticos para describir el calentamiento con microondas de alimentos mediante susceptores.

Palabras claves: microondas, susceptor, oscurecimiento, crocancia.

ABSTRACT

Microwave technology has grown exponentially in food processing due to the great advantages it offers compared to other conventional technologies, such as reduced cooking time and energy consumption. However, there are certain quality defects related to the application of this technology, some of which are the lack of browning and crisping. Susceptors are materials that absorb microwave energy and transfer it to the food in the form of heat. The application of susceptors in microwave heating of food has been successful to obtain products with desirable characteristics for the consumer. The objective of this review article is to provide an overview of the materials and application of susceptors for food processing, as well as to present a review of the heat transfer mechanisms involved and the use of some mathematical models to describe microwave heating of food using susceptors.

Keywords: microwave, susceptor, browning, crisping.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los consumidores se han vuelto más conscientes de los temas relacionados con la salud a través de la ingesta de alimentos. Debido a ello, ha surgido una creciente demanda de alimentos que aporten beneficios a la salud y que, a su vez, sean fáciles de preparar. Una de las estrategias utilizadas por la industria de los alimentos para hacer frente a este reto es el uso de tecnologías térmicas distintas al calentamiento convencional, con el objetivo de mejorar la calidad de los productos disponibles en el mercado o de desarrollar otros nuevos. El procesamiento con microondas ha sido una tecnología exitosa con diversas aplicaciones en la industria alimentaria (Contreras *et al.*, 2017).

Las microondas son ondas electromagnéticas con una banda de frecuencia de 300 MHz a 300 GHz. En el espectro electromagnético, se ubican entre el rango de radiofrecuencia más bajo y el rango de infrarrojo y luz visible con frecuencias más altas. De igual forma, las microondas pertenecen al espectro no ionizante (Regier *et al.*, 2017).

La tecnología del microondas se ha implementado en diversas operaciones unitarias a nivel industrial como descongelación, secado, cocción, esterilización y pasteurización, gracias a las ventajas que ofrece frente a los métodos convencionales: reducción del tiempo de procesamiento, consumo de energía, mayor control del proceso, ahorro de espacio, manejo seguro y facilidad de operación. Por otro lado, el incremento de la urbanización en países en desarrollo ha favorecido el incremento del uso de hornos de microondas en los hogares, donde comúnmente se emplean para el calentamiento, la cocción y la descongelación rápida de alimentos (Orsat *et al.*, 2017).

Sin embargo, algunos defectos de calidad en los alimentos se han asociado al procesamiento con microondas, como falta de cocción y textura y sabor indeseable (Verma *et al.*, 2020). Para minimizar estos defectos, la industria ha desarrollado empaques que permiten una cocción adecuada y uniforme, con los que el alimento alcanza los atributos de calidad deseados por el consumidor. Los susceptores son un ejemplo de este tipo de empaques, ya que tienen la capacidad de absorber la energía de las

microondas y transferirla al alimento para lograr una cocción adecuada (Zuckerman y Miltz, 1998).

La superficie del susceptor puede alcanzar entre 200 y 300 °C en un horno de microondas doméstico de 2.45 GHz. Sin el uso de este material, la temperatura de la superficie de contacto con el alimento no llegaría a los 100 °C durante el calentamiento con microondas (Chen *et al.*, 2017). Debido a esta característica, el uso de susceptores ha crecido exponencialmente en la industria alimentaria, lo que permite que diversos alimentos sean cocinados en el microondas de manera fácil y rápida por el consumidor.

El objetivo de este artículo es brindar un panorama general de las diferentes aplicaciones de los susceptores en la industria alimentaria y del uso de los modelos matemáticos que se han empleado para describir el calentamiento mediante microondas del alimento con susceptores. El primer apartado abarcará las características, propiedades y materiales de los susceptores. Posteriormente, se presentarán las diferentes aplicaciones de estos susceptores en matrices alimentarias, específicamente en productos obtenidos a partir de cereales y cárnicos. Finalmente, se describirán los diferentes modelos matemáticos aplicados al calentamiento con microondas de alimentos mediante susceptores, junto con los mecanismos de calor entre el susceptor y el alimento.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Generalidades y materiales utilizados en el desarrollo de susceptores

El calentamiento con microondas es resultado de la interacción entre las propiedades dieléctricas de un material y las ondas electromagnéticas (Meda *et al.*, 2017). Por lo tanto, este calentamiento se basa en la respuesta de un material a los campos eléctricos y magnéticos generados por el microondas. Esta respuesta se mide mediante dos propiedades importantes: la constante dieléctrica, también llamada permitividad, que mide la capacidad de un material para almacenar energía eléctrica; mientras que el factor de disipación o de pérdida dieléctrica determina

la capacidad del material para convertir la energía eléctrica en calor (Bhattacharya y Basak, 2016).

Cuando las ondas del microondas inciden sobre un material dieléctrico, una parte de esta energía es transmitida, otra es absorbida por el material y el resto se disipa en forma de calor. La absorción de energía se produce por la polarización de las cargas, mientras que la conversión de energía eléctrica en calor surge de la relajación de estas moléculas polarizadas y del transporte de electrones libres. Por otro lado, el incremento en el calentamiento es consecuencia del aumento en la energía cinética molecular, resultado del mayor movimiento de los dipolos presentes en el material al intentar reorientarse con el campo eléctrico de la onda incidente. Este incremento en el movimiento de los dipolos genera, a su vez, una mayor fricción molecular (Bhattacharya y Basak, 2016; Meda *et al.*, 2017).

Otro parámetro de gran importancia en el calentamiento con microondas es el factor de penetración, el cual determina la distancia a la que la intensidad del campo electromagnético disminuye a $1/e$ ($=0.368$) de la amplitud inicial. Con base en la interacción con las microondas y tomando en cuenta la magnitud de este factor junto con la composición, los materiales pueden clasificarse en tres grandes grupos. El primero corresponde a

los materiales reflectantes, que comprenden todos aquellos con un factor de penetración muy bajo (en el orden de nm), como los metales; esta magnitud evita la penetración de las ondas microondas y provoca que sean reflejadas totalmente desde la superficie del material. El segundo grupo corresponde a los materiales transparentes, con un factor de penetración muy grande (en el orden de m), que favorece que las ondas atraviesen el material sin ninguna absorción ni atenuación de la energía; algunos ejemplos de estos materiales son el teflón, el vidrio y el cuarzo. El tercer grupo comprende los materiales disipadores (con un factor de penetración en el orden de cm), que se caracterizan por absorber rápidamente la energía del microondas y convertirla en calor; el carbón y el agua son ejemplos de este tercer grupo (Bhattacharya y Basak, 2016; Das y Banik, 2021).

Los susceptores pertenecen al grupo de materiales disipadores con la característica principal de convertir la energía del microondas en calor sensible, el cual es conducido e irradiado a la superficie del alimento (Bohrer y Brown, 2001). Además, en lo que respecta a empaques para uso en microondas, los susceptores son considerados empaques activos porque interactúan con las microondas para crear o ejercer condiciones específicas en el alimento, como se muestra en la tabla I (Schiffmann, 2017).

Tabla I. Diseño de susceptores en alimentos

Diseño de susceptor	Características	Aplicaciones
Susceptor tipo almohadilla	Calentamiento en la cara inferior del alimento.	Alimentos precocidos o prehechos
Susceptor de funda	Tiene la capacidad de proporcionar calentamiento a múltiples caras en el alimento.	Pizzas, sándwiches y baguetes
Bandeja de susceptor elevada	El calentamiento se da en la cara inferior del alimento. La elevación del susceptor permite reducir las pérdidas de calor.	Pizzas prehechas de gran tamaño
Susceptor de calentamiento estampado	La película metalizada de aluminio puede o no estar estampada. Este estampado permite una distribución de temperatura deseada.	Alimentos con múltiples ingredientes

Fuente: elaboración propia, adaptada de Bohrer y Brown (2001).

El objetivo principal de estos empaques es proveer de atributos y características a los alimentos similares a los obtenidos con métodos de calentamiento convencionales. Los primeros susceptores estuvieron disponibles comercialmente en 1970 y eran comúnmente llamados platos de oscurecimiento (*browning dishes*) o parrillas para dorar en microondas (Perry y Lentz, 2020). Estos utensilios estaban fabricados con una delgada capa de metal, comúnmente de óxido de estaño, unida a una pieza de cerámica. Para lograr un calentamiento adecuado, era necesario realizar un precalentamiento del plato vacío a altas potencias en el horno de microondas durante varios minutos. Una vez precalentado, la comida se colocaba en el plato y nuevamente se calentaba en el microondas. Sin embargo, este tipo de susceptores no se consideraban eficientes debido a diversos inconvenientes, como el aumento del tiempo de preparación del alimento y el manejo especial por parte del consumidor, como resultado de las altas temperaturas que alcanzaba el plato (Bohrer y Brown, 2001).

Actualmente, los susceptores más utilizados y comercializados están fabricados a partir de una película delgada de PET unida una capa metálica, comúnmente de aluminio. Esta capa

se encuentra del lado opuesto al alimento y, a su vez, laminada a un sustrato de papel o cartón (figura 1) (Perry y Lentz, 2020). La función principal de esta capa metálica es interactuar con el componente eléctrico del campo energético del microondas, proporcionando calor sensible al alimento para un calentamiento adecuado (Bohrer y Brown, 2001).

El comportamiento de este tipo de susceptores se caracteriza por la propiedad de impedancia superficial. Esta se compone de dos parámetros: la resistencia y la reactancia superficial. La resistencia superficial está determinada por el tipo y la cantidad de metal utilizado en el susceptor. Por su lado, la reactancia es una medida de la continuidad de la capa metálica sobre la superficie cubierta. Estos parámetros son relevantes porque definen las propiedades y el comportamiento del susceptor al ser expuesto en el microondas (Perry y Lentz, 2020). Cuando el susceptor es colocado en el microondas con el alimento, el flujo de corriente de energía circulará a través de la película metálica y, si el parámetro de resistencia superficial es adecuado, el calentamiento ocurrirá de manera rápida debido a la conversión de la energía del microondas en calor sensible (Schiffmann, 2011).

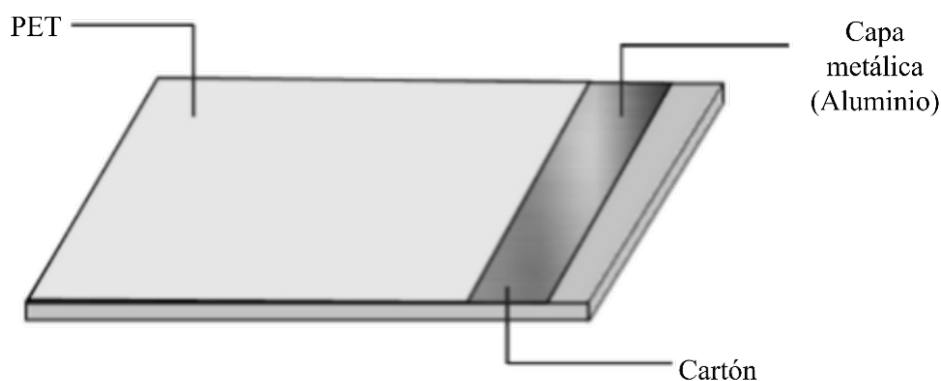


Figura 1.

Estructura de un susceptor.

Debido a que la película de metal puede favorecer la migración de compuestos al alimento, es necesario el uso de otro material que la soporte y evite el contacto directo del alimento con el metal. Las películas de polímeros son comúnmente utilizadas como soporte para las capas metálicas, específicamente el PET. Este polímero tiene características que resultan de importancia para su uso en microondas, como una amplia variedad de grosores y resistencia a altas temperaturas. Además, está aprobado por la FDA como material seguro para su uso en contacto con alimentos (Bohrer y Brown, 2001; Regier, 2014).

Los susceptores se forman mediante un proceso denominado metalización al vacío. Durante este proceso, se hace pasar una película delgada de PET sobre metal fundido en una cámara de vacío. Las moléculas de metal comienzan a evaporarse debido a las altas temperaturas, lo que provoca que choquen y se congelen en la superficie de la película de PET. Una ventaja importante de este proceso es la capacidad que tienen las máquinas de metalización para depositar capas de metal con la uniformidad y el grosor requeridos para un susceptor. Otros materiales, como el acero inoxidable y algunas aleaciones de níquel, han sido probados para su aplicación en capas metálicas. Sin embargo, el aluminio provee la mejor relación de costo y rendimiento (Bohrer y Brown, 2001). Además de estas dos capas, es necesario agregar otro soporte con buena resistencia para brindar fuerza y resistencia mecánica al susceptor. Generalmente, esta tercera capa se compone de papel o cartón unido a la capa metálica con polivinilacetato como adhesivo (Regier, 2014).

La superficie del susceptor es capaz de alcanzar temperaturas elevadas (aproximadamente 204 °C) en un tiempo aproximado de un minuto o menos. Debido a esto, es necesario un mecanismo que limite el aumento de la temperatura y reduzca la absorción de energía en el susceptor. Una de las técnicas empleadas para este mecanismo es debilitar el enlace entre la película metálica y el polímero. A medida que este enlace se debilita, la estructura del metal cambia debido a la aparición

de distorsiones o grietas, lo que provoca variaciones en la conductividad. Cuando esto sucede, la capa del polímero se divide y la película metálica detiene su calentamiento. Una vez que la temperatura en el metal deja de incrementarse, el susceptor continúa calentando el alimento a una tasa de velocidad reducida. Este mecanismo limitante es de suma importancia en el diseño de un susceptor, ya que evita incidentes asociados con el incremento de la temperatura. Por ejemplo, el proceso de combustión espontánea del papel y el cartón ocurre alrededor de los 234 °C, lo que podría ocasionar alteraciones importantes en la estructura del empaque y daños al horno de microondas. Asimismo, un incremento acelerado de la temperatura ocasionaría que los alimentos se quemen o presenten atributos de calidad indeseables para el consumidor. Sin embargo, para asegurar que el calentamiento sea adecuado, es necesario que el susceptor se encuentre en contacto directo con la superficie del alimento (Bohrer y Brown, 2001; Schiffmann, 2011).

2. Aplicación de susceptores para el procesamiento de alimentos

2.1. Productos de panadería

La tecnología del microondas ha sido aplicada en diversas áreas de la industria de alimentos con buenos resultados (Zuckerman y Miltz, 1998; Clarke y Farrell, 2000; Ozmutlu *et al.*, 2001; Sahin *et al.*, 2002; Megahey *et al.*, 2005; Ozkoc *et al.*, 2009). Sin embargo, en lo que respecta a productos de panadería, su aplicación se ha visto limitada como consecuencia de la falta de ciertos atributos de calidad importantes en el producto final, como oscurecimiento en la superficie y formación de la corteza (J. Wang *et al.*, 2008).

Existen dos fenómenos de gran importancia que definen las características finales del pan: el oscurecimiento y la crocancia. El oscurecimiento de la superficie es consecuencia de la reacción de Maillard. Esta reacción depende de la presencia

de los reactantes (un aminoácido y un azúcar reductor), una actividad de agua de aproximadamente 0.8, un pH neutro o alcalino (alrededor de 7) y una temperatura en la superficie del pan de 100 °C o más. Si bien el microondas ofrece un incremento rápido de la temperatura, el aire que se encuentra en el horno se encuentra a temperatura ambiente, lo que dificulta que se alcance la temperatura adecuada en la superficie (Schiffmann, 2017).

La crocancia es otra característica de calidad deseada en los productos de panadería. Esta característica surge como consecuencia de las altas temperaturas, alrededor de 190 °C o más. Las altas temperaturas ocasionan que la superficie se deshidrate y alcance una actividad de agua ideal para obtener la textura adecuada. Por otro lado, el incremento de la presión de vapor interna del alimento, como consecuencia de las microondas, ocasiona la expulsión de agua del interior a la superficie del alimento. Al llegar a la superficie, el agua se condensa y satura debido a la diferencia de temperaturas entre el alimento y el microondas, lo que impide que el pan logre una crocancia adecuada (Schiffmann, 2017).

Los susceptores han sido aplicados exitosamente en distintos productos de panadería con el objetivo de favorecer el oscurecimiento en la superficie y la crocancia del pan. Aguilar *et al.* (2015) evaluaron el efecto del horneado con horno convencional, horno de microondas y horno de microondas con la presencia de susceptores sobre las características de un pan sin gluten congelado y previamente horneado. Dichos autores observaron que el pan horneado de manera convencional y en microondas con susceptores presentaban mayor oscurecimiento en la superficie, a diferencia del pan horneado en microondas sin susceptor, que no presentaba ningún cambio de color. Por otro lado, el pan horneado en microondas sin susceptor presentó una mayor dureza que las demás muestras, como consecuencia de la pérdida de agua durante el horneado por el incremento de la presión de vapor interna en el alimento. Como se mencionó anteriormente, el uso del susceptor favorece el incremento en la temperatura de la superficie del

pan, lo que permite obtener una crocancia adecuada (Bohrer y Brown, 2001). Los resultados del análisis de compuestos volátiles demostraron que el pan obtenido mediante horneado convencional y aquel procesado con susceptores presentaban el mismo perfil de compuestos volátiles. Finalmente, en este estudio se concluyó que el horneado en microondas con susceptor podría ser una alternativa al horneado convencional, con ventajas importantes como la reducción del tiempo y del consumo de energía (Aguilar *et al.*, 2015).

Algunos autores denominan susceptores comestibles a los ingredientes que son capaces de interactuar con el campo eléctrico del microondas (Kamper y McGauley, 1994; Albert *et al.*, 2012). En el estudio realizado por Sahin *et al.* (2002) se evaluó el efecto de los susceptores comestibles, susceptores comerciales y el horneado convencional como tratamientos para el oscurecimiento del color y la dureza de la corteza de pan horneado en microondas. El pan horneado con susceptores comerciales presentó una menor humedad y mayor dureza, a diferencia de las muestras obtenidas mediante los otros tratamientos de oscurecimiento. Por otro lado, en todas las muestras se evaluaron los perfiles de temperatura durante el horneado. Los autores observaron que las temperaturas en las muestras con susceptores eran más altas, lo que podría estar relacionado con el incremento en la dureza y la disminución de humedad en el pan. En cuanto al susceptor comercial, este tratamiento no afectó significativamente ($p > 0.05$) la temperatura durante el horneado en microondas. Una desventaja importante de este tipo de susceptores es la temperatura, ya que su capacidad de calentamiento está limitada a un rango de temperatura específico (Bohrer y Brown, 2001).

Además, Sahin *et al.* (2002) observaron diferencias entre los perfiles de temperatura de las muestras con susceptores comerciales, debido a que las muestras fueron horneadas con dos tipos de susceptores: uno estándar, compuesto por una capa metálica continua, y otro con un mecanismo limitante de temperatura, constituido por una capa metálica discontinua. Los autores señalaron que esta diferencia en la capacidad

de calentamiento se debe al diseño y la estructura de los susceptores. El susceptor estándar no tiene un mecanismo limitante de temperatura definido, a diferencia del otro tipo de susceptor. Este otro se encuentra limitado por el diseño, en el cual las uniones entre las capas del susceptor se debilitan como consecuencia del calentamiento en el microondas, lo que favore la disminución de la temperatura. Sin embargo, es importante resaltar que en el estudio no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) en la dureza de las muestras horneadas con diferentes tipos de susceptores a una potencia del 20 % en el microondas. En cuanto al color, se observó que los susceptores no lograron un oscurecimiento adecuado de la superficie del pan, debido a que no fueron colocados en la superficie. De acuerdo con Schiffman (2017), para que el susceptor tenga un uso efectivo debe estar en contacto directo con la superficie del alimento. Sin embargo, los autores mencionaron que la aplicación de susceptores resultó exitosa para desarrollar el color adecuado en la superficie inferior del pan. En este estudio se concluyó que la aplicación de susceptores permite mejorar el color y la crocancia en la superficie inferior del pan, además de contribuir a prevenir la acumulación de agua en los productos de panadería.

De igual manera, Icoz *et al.* (2004) compararon el efecto del horneado de pan en horno convencional, en microondas y en microondas con la asistencia del susceptor en los atributos de color (L^* , a^* y b^*) y dureza. En este estudio también se observó que el susceptor resultaba efectivo para obtener el oscurecimiento adecuado en el pan. Cuando no había presencia del susceptor, los autores observaron que los valores de a^* y b^* no cambiaron significativamente ($p > 0.05$) durante el horneado en microondas. Por el contrario, se observó un incremento significativo ($p > 0.05$) en el valor a^* en la superficie inferior del pan durante los primeros tres minutos y medio, lo que indica un incremento rápido de la temperatura en el susceptor. Además, es importante mencionar que, debido a que el susceptor se colocó únicamente en la cara inferior del pan, no se observaron cambios en los parámetros del color. En cuanto a la textura, se

observó que la dureza del pan en la cara inferior incrementaba con el tiempo, a diferencia de la superficie. De acuerdo con los autores, este fenómeno es resultado de la posición del susceptor en la muestra. Además, este mismo parámetro de dureza incrementaba con la potencia del horno de microondas.

La mayoría de los estudios sobre horneado de pan en microondas demuestran que el uso de susceptores es indispensable para lograr el oscurecimiento y la crocancia característicos del producto. Sin embargo, en el estudio realizado por Wang *et al.* (2008) se comparó el uso de un susceptor tradicional con dos tipos de empaques elaborados a base de láminas de politetrafluoroetileno expandido, evaluando la apariencia y textura de galletas de soya horneadas en microondas. En este estudio se observó que el producto horneado con susceptor presentó valores significativamente menores ($p > 0.05$) en los atributos de textura y color, en comparación con los procesados en empaques a base de politetrafluoroetileno. No obstante, es importante destacar que la formulación es un factor determinante en el diseño de productos destinados al horneado en microondas. Además, los parámetros de tiempo y potencia de horneado también influyen en la efectividad del susceptor. En el estudio de Wang *et al.* (2008), todas las galletas se hornearon bajo las mismas condiciones: 50 % de potencia durante 75 segundos.

2.2. Productos cárnicos

Otra de las áreas de aplicación de los susceptores para el procesamiento de alimentos es la industria cárnica. La mayoría de los alimentos listos para comer hechos a base de carne están disponibles en los supermercados para cocinarse o recalentarse mediante ambos mecanismos de calentamiento (horno convencional y microondas) (Walsh y Kerry, 2012).

A diferencia de la industria panadera, en esta se ha empleado el uso de susceptores comestibles, los cuales han sido principalmente utilizados en productos cárnicos rebozados. En el estudio realizado por Albert *et al.* (2012), se evaluó la efectividad de una película a base de alginato de sodio como un susceptor comestible, con el objetivo de mejorar la calidad

de *nuggets* de pollo cocinados en microondas. Según con lo reportado por Shukla y Anantheswaran (2001), las sales pueden funcionar como un ingrediente clave para lograr el oscurecimiento y la crocancia de la superficie de alimentos como los *nuggets*, ya que interactúan con las microondas elevando el punto de ebullición del agua. Además, estos ingredientes tienen la capacidad de modificar el comportamiento dieléctrico del alimento, lo que resulta en un incremento en el factor de pérdida. Como se mencionó anteriormente, este factor es indispensable para convertir la energía del microondas en calor. Las muestras de *nuggets* fueron sometidas a una fritura previa en una freidora doméstica y posteriormente a cocción en microondas durante diferentes tiempos de calentamiento (de 15 a 60 segundos). Los autores observaron que, cuando las muestras de *nuggets* fueron cocinadas durante 15 segundos, el producto presentaba puntos fríos por debajo de 0 °C. Sin embargo, con el incremento del tiempo de calentamiento, incrementaban los puntos calientes o áreas de alta temperatura. Por ejemplo, cuando el *nugget* fue cocinado por 55 segundos, las zonas centrales del producto presentaban cierto grado de resequeidad. A pesar de que el microondas ofrece un incremento rápido de la temperatura en los alimentos, presenta la desventaja de carecer de uniformidad en el calentamiento, especialmente cuando no existe otro medio capaz de disminuir esta falta de uniformidad, como los susceptores metálicos. A pesar de que el microondas favoreció la aparición de estos puntos calientes y fríos, se demostró que la película de alginato de sodio resultaba efectiva como susceptor comestible, ya que facilitaba el incremento de la temperatura. Además, la presencia de este alginato disminuyó la proporción de puntos fríos, efecto que incrementaba con la cantidad de sal presente en la película. Bohrer y Brown (2001) mencionaron que cualquier mezcla de sal utilizada como susceptor debe ser lo suficientemente gruesa para poder absorber y convertir efectivamente la energía del microondas.

En otro estudio realizado por Albert *et al.* (2009) se evaluó la adición de dos diferentes dextrinas (alta y media solubilidad)

a la formulación de la masa y el uso de un susceptor metálico como estrategias para mejorar la crocancia de *nuggets* a base de pescado. Sobre el atributo de color, se observó que el uso del susceptor, por sí solo, no era suficiente para mejorar el color de las muestras. Los autores utilizaron dos métodos para evaluar la crocancia en los *nuggets*: perfiles de textura y de sonido. De acuerdo con Limited y Burch (2007), la emisión de sonido es un aspecto importante en la percepción de alimentos crujientes y crocantes. En este estudio, la combinación de dextrina y susceptor permitió obtener muestras de *nuggets* con un color adecuado. Asimismo, el uso del susceptor devino en la obtención de muestras con una mayor crocancia, a diferencia de las muestras sin susceptor. Finalmente, los autores demostraron que la combinación de dextrinas con el uso de susceptores funciona adecuadamente para el calentamiento con microondas, lo que permite explorar nuevas estrategias para lograr productos rebozados crujientes mediante esta tecnología.

Por su parte, Wang *et al.* (2020) evaluaron la diferencia en el atributo de terneza en panceta de cerdo mediante dos mecanismos de calentamiento (con y sin susceptor) durante la cocción en microondas. A diferencia de los estudios anteriormente mencionados, en este artículo se utilizó un plato de cerámica como susceptor. Los autores observaron que el contenido de humedad en la muestra sin susceptor era significativamente menor ($p < 0.05$) en comparación de la muestra con susceptor, indicando que esta última presentaba una textura más jugosa. Asimismo, se evaluaron los perfiles de temperatura en ambas muestras, observándose que, durante gran parte del calentamiento, las muestras con susceptor mantuvieron una temperatura más alta que aquellas sin susceptor. Esto se debe a que el susceptor tiene la capacidad de absorber las microondas e incrementar la temperatura del alimento, lo que favorece un calentamiento más uniforme. Además, se evaluó la microestructura de ambas muestras, encontrándose que las fibras musculares de las muestras sin susceptor presentaban más irregularidades y espacios vacíos en la matriz proteína-grasa. En contraste, las micrografías de carne cocinada con susceptor

mostraron una matriz proteína-grasa más compacta y estable, con menor cantidad de espacios vacíos, lo que se asocia con una mayor capacidad de retención de agua en la carne. En consecuencia, se concluyó que la carne cocinada en microondas con susceptor presentaba mejores características de ternura.

3. Modelos matemáticos en el calentamiento con microondas de alimentos utilizando susceptores

El uso de la tecnología de microondas ha crecido rápidamente

en la industria de alimentos debido a sus ventajas en comparación con el método de horneado convencional, tales como la reducción del tiempo de procesamiento y del consumo de energía, así como un mayor control del proceso (Verma *et al.*, 2020). El calentamiento por microondas se basa en la capacidad de las ondas (figura 2) para penetrar y generar calor dentro del alimento (Bhattacharya y Basak, 2016), lo que favorece que los tiempos de calentamiento sean de tres a cinco veces más rápidos que el método convencional (Verma *et al.*, 2020).

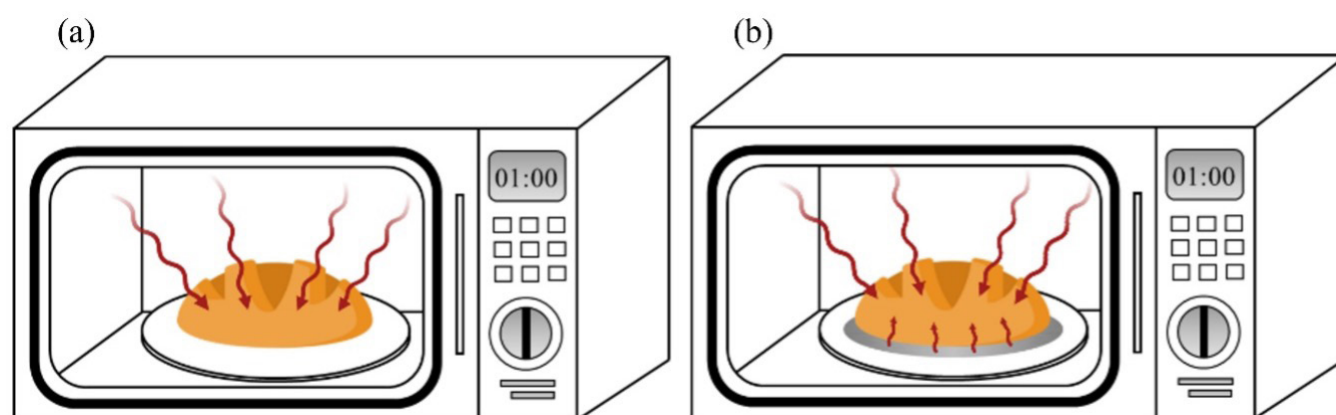


Figura 2.

Mecanismo de calentamiento del microondas sin susceptor (a) y con susceptor (b).

Los susceptores son considerados materiales disipadores de calor que se caracterizan por calentarse rápidamente debido a la acción de las microondas. Conforme el susceptor se calienta, el calor se transfiere al alimento por los mecanismos de transferencia de calor convencionales, lo que favorece la elevación de la temperatura del alimento. El calentamiento del material se produce de forma mixta con la presencia de un susceptor. Primeramente, se lleva a cabo un calentamiento convencional durante las fases iniciales y un calentamiento por microondas en las etapas posteriores. Es decir, los susceptores calientan el material

desde la superficie, mientras que los microondas calientan desde el centro, lo que permite que el alimento se someta a un calentamiento más directo y uniforme (figura 2). Este tipo de calentamiento por microondas asistido con un susceptor también se denomina calentamiento híbrido (Bhattacharya y Basak, 2016).

A pesar de que los microondas ofrecen un rápido incremento de la temperatura debido a su capacidad de generar energía térmica en el interior de los alimentos, existen algunos problemas relacionados con la distribución de la temperatura que deben considerarse. Uno de ellos es la aparición de puntos calientes y

fríos en varias zonas del alimento. Para caracterizar esta distribución de temperatura dentro de los alimentos, diversos autores han evaluado el calentamiento y la cocción por microondas mediante modelos matemáticos, ya que sus soluciones permiten obtener una descripción del proceso estudiado (Campañone y Zaritzky, 2005); las soluciones de los modelos matemáticos del calentamiento con susceptores y los efectos que producen estos materiales en los alimentos dan como resultado la obtención de alimentos seguros y deseados por el consumidor. Además, la optimización de estos modelos permitiría definir estrategias para mejorar la uniformidad en el calentamiento, lo que repercute directamente en la calidad de los alimentos desde un punto de vista microbiológico, sensorial y nutricional (Wäppling-Raaholt y Ohlsson, 2005).

El modelado de procesos de calentamiento con microondas implica resolver una parte electromagnética, descrita por las ecuaciones de Maxwell, junto con la parte térmica basada en los fenómenos de transferencia de calor (Wäppling-Raaholt y Ohlsson, 2005). Existen pocos estudios sobre la modelación del calentamiento con microondas de alimentos en presencia de susceptores. Chen *et al.* (2017) estudiaron un modelo térmico-electromagnético acoplado para describir el calentamiento de un pay previamente congelado en un horno de microondas con susceptores. Los autores demostraron que el susceptor presentaba una constante dieléctrica y un factor de pérdida elevados, lo que le permite absorber la energía del microondas. Además, observaron que la presencia del susceptor incrementaba el flujo de calor en la interfaz alimento-susceptor de 500 W/m² a 2000 W/m², lo que ocasiona que el alimento absorba inicialmente casi tres veces más energía. También se determinó que la eficacia del calentamiento con susceptor aumentaba en combinación con la rotación del horno.

Por su parte, Zuckerman y Miltz (1998) estudiaron un modelo basado en parámetros del alimento, el tiempo de calentamiento

y la resistencia superficial del susceptor para predecir los perfiles de temperatura en una masa calentada por microondas con susceptor, utilizando el método de elemento finito para la solución del modelo matemático. Durante los primeros 30 segundos de calentamiento, el susceptor absorbió entre el 60 y el 80 % de la energía del microondas, debido a su alto factor de pérdida. Posteriormente, dejó de calentarse y de absorber energía, lo que resultó en una disminución de la velocidad de calentamiento. Además, se observó que las temperaturas calculadas para el susceptor y los tiempos de calentamiento se correlacionaron adecuadamente con los valores experimentales.

Finalmente, Pitchai *et al.* (2011) desarrollaron y validaron un modelo de simulación en COMSOL Multiphysics 4.2 (COMSOL, 2011) para analizar la interacción entre un alimento modelo con un susceptor durante el calentamiento en un horno de microondas doméstico. En este estudio se emplearon dos enfoques diferentes para la solución del modelo: la discretización del dominio y la condición de frontera transitoria. Los perfiles de temperatura simulados se compararon con el calentamiento en microondas de un cilindro de gel a base de gelano al 1 % colocado junto con un susceptor. Los autores concluyeron que la condición de frontera transitoria requería solo el 20 % del tiempo de simulación necesario para el método de discretización de dominio, por lo que resulta preferible usarla para este tipo de simulación.

4. Tendencias actuales

Diversos materiales han sido probados como alternativas a los susceptores metálicos. Estos materiales se caracterizan por ser conductores o semiconductores eléctricos con altas propiedades dieléctricas, como el grafito, el carbón y el carburo de silicio (Chandrasekaran *et al.*, 2013; Haile *et al.*, 2017; Kumari *et al.*, 2020). Algunas ventajas principales de este tipo de susceptores son la diversidad de patrones y formas, menor cantidad de resi-

duos y mayor precisión en la posición del suscepto, lo que permite colocarlos en zonas específicas donde se busca calentar al alimento. Los estudios de este tipo de susceptores se han centrado en suspender partículas de materiales conductores en una matriz de polímero. Sin embargo, la eficiencia de este tipo de materiales depende de tener un control adecuado de la cantidad de partículas, con el fin de mantener un contacto efectivo entre el material y el alimento, lo que permite lograr una correcta conductividad y flujo de corriente (Bohrer y Brown, 2001; Perry y Lentz, 2020).

Por otra parte, en lo que respecta a susceptores metálicos comerciales, se han desarrollado diversos diseños con el objetivo de adaptarse al tipo de alimento para el cual serán utilizados. Asimismo, estos susceptores cuentan con tecnología avanzada para lograr el calentamiento adecuado del alimento. Algunos ejemplos de los actuales susceptores disponibles en el mercado son QuiltWave™, Qwik Crisp™, MicroFlex-Q™, Qwik Crisp™ y MicroRite™ (Inline Packaging LLC, Estados Unidos).

Las diferentes formulaciones de un alimento también pueden mejorar el calentamiento por microondas. Algunos de los ingredientes con propiedades dieléctricas importantes para el calentamiento por microondas incluyen triglicéridos, amilopectinas, amilosas, fosfatos, almidones, algunos polioles como la glicerina y el sorbitol, los monosacáridos y disacáridos, azúcares, aminoácidos, hidrolizados de proteínas y proteínas, y ciertos ácidos (Bou-Orm *et al.*, 2021). En la actualidad, el diseño de alimentos destinados al calentamiento con microondas se basa en el estudio y evaluación de la formulación en conjunto con el suscepto. De acuerdo con Shukla y Anantheshwaran (2001), este enfoque del diseño debe fundamentarse en la comprensión de los principios básicos del calentamiento por microondas, la naturaleza de los fenómenos de transferencia de calor y masa, así como en la selección adecuada de los ingredientes y los empaques.

CONCLUSIONES

La aplicación de la tecnología del microondas en conjunto con materiales susceptores en la industria de alimentos es una estrategia viable debido a sus ventajas frente a métodos convencionales, como un mayor control del proceso, la reducción de tiempo y del consumo de energía, así como facilidad en la preparación de alimentos. La mayoría de los estudios actuales coinciden en que el uso de estos materiales permite obtener alimentos con atributos de calidad deseables para el consumidor, ya que favorecen un calentamiento más uniforme y directo del alimento, disminuyendo la presencia de puntos calientes y fríos.

Sin embargo, los estudios experimentales sobre el uso de susceptores aún son limitados, y su aplicación se concentra en la industria panadera y cárnica. La aplicación de estos materiales en otras áreas de la industria, como en alimentos hechos a base de frutas y vegetales, permitiría potenciar su uso. Además, existen áreas de oportunidad de estudios basadas en la evaluación de otras variables que también tienen un efecto en el calentamiento con microondas, como la formulación o los parámetros del horno. Por otro lado, es necesario el estudio y desarrollo de modelos matemáticos más robustos que involucren a estas variables y que permitan optimizar el calentamiento de alimentos mediante microondas.

AGRADECIMIENTOS

La autora Flor Elizabeth de León Serna agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) —hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)— y a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por el apoyo recibido para el financiamiento de sus estudios doctorales.

REFERENCIAS

- Aguilar, N., Albanell, E., Minarro, B., Gallardo, J. y Capellas, M. (2015). Influence of final baking technologies in partially baked frozen gluten-free bread quality. *Journal of Food Science*, 80(3), E619-E626. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12784>
- Albert, A., Salvador, A. y Fiszman, S. M. (2012). A film of alginate plus salt as an edible susceptor in microwaveable food. *Food Hydrocolloids*, 27(2), 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.11.005>
- Albert, A., Varela, P., Salvador, A. y Fiszman, S. (2009). Improvement of crunchiness of battered fish nuggets. *European Food Research and Technology*, 228, 923-930. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-1005-9>
- Bhattacharya, M. y Basak, T. (2016). A review on the susceptor assisted microwave processing of materials. *Energy*, 97, 306-338. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.034>
- Bohrer, T. H. y Brown, R. K. (2001). Packaging techniques for microwaveable foods. En *Handbook of Microwave Technology for Food Application*. CRC Press.
- Bou-Orm, R., Jury, V., Boillereaux, L. y Le-Bail, A. (2021). Microwave baking of bread; a review on the impact of formulation and process on bread quality. *Food Reviews International*, 0(0), 1-23. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1931299>
- Campaione, L. A. y Zaritzky, N. E. (2005). Mathematical analysis of microwave heating process. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 359-368. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.08.027>
- Celuch, M. y Olszewska-Placha, M. (2020). Space-discrete electromagnetic modeling of microwave susceptors. En U. Erle, P. Pesheck, y M. Lorence (Eds.), *Development of Packaging and Products for Use in Microwave Ovens (Second Edition)*, 513-529. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102713-4.00019-0>
- Chandrasekaran, S., Basak, T. y Srinivasan, R. (2013). Microwave heating characteristics of graphite based powder mixtures. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 48, 22-27. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmass-transfer.2013.09.008>
- Chen, F., Warning, A. D., Datta, A. K. y Chen, X. (2017). Susceptors in microwave cavity heating: modeling and experimentation with a frozen pie. *Journal of Food Engineering*, 195, 191-205. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.09.018>
- Clarke, C. I. y Farrell, G. M. (2000). The effects of recipe formulation on the textural characteristics of microwave-reheated pizza bases. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(8), 1237-1244. [https://doi.org/10.1002/10970010\(200006\)80:8<1237::AID-JSFA630>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/10970010(200006)80:8<1237::AID-JSFA630>3.0.CO;2-8)
- Contreras, C., Benlloch-Tinoco, M., Rodrigo, D. y Martínez-Navarrete, N. (2017). Impact of microwave processing on nutritional, sensory, and other quality attributes. En *The Microwave Processing of Foods: Second Edition*, 65-99. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100528-6.00004-8>
- Das, A. y Banik, B. (2021). *Foundational principles of microwave chemistry*, 3-26. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822895-1.00005-9>
- Haile, M., Sweeney, C. B., Lackey, B. A., Sarwar, O., Henderson, R., Saed, M. A., Green, M. J. y Grunlan, J. C. (2017). Ultrafast and highly localized microwave heating in carbon nanotube multilayer thin films. *Advanced Materials Interfaces*, 4(15), 1700371. <https://doi.org/10.1002/admi.201700371>
- İçöz, D., Sumnu, G. y Sahin, S. (2004). Color and texture development during microwave and conventional baking of breads. *International Journal of Food Properties*, 7(2), 201-213. <https://doi.org/10.1081/JFP-120025396>
- Kamper, S. L. y McGauley, M. A. (1994). *Edible microwave susceptor composition* (World Intellectual Property Organization Patent N.º WO1994000029A1). <https://patents.google.com/patent/WO1994000029A1/en>
- Kumari, S., Kumar, R., Agrawal, P. R., Prakash, S., Mondal, D. P. y Dhakate, S. R. (2020). Fabrication of lightweight and porous silicon carbide foams as excellent microwave susceptor for heat generation. *Materials Chemistry and Physics*, 253, 123211. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123211>
- Limited, L. I. y Burch, R. (2007). *Examination of the effect of domestic cooking on acrylamide levels in food*. Leatherhead Food International.
- Meda, V., Orsat, V. y Raghavan, V. (2017). Microwave heating and the dielectric properties of foods. En M. Regier, K. Knoerzer, y H. Schubert (Eds.), *The Microwave Processing of Foods (Second Edition)*, 23-43. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100528-6.00002-4>

- Megahey, E. K., McMin, W. A. M. y Magee, T. R. A. (2005). Experimental study of microwave baking of madeira cake batter. *Food and Bioprocess Processing*, 83(4), 277-287. <https://doi.org/10.1205/fbip.05033>
- Orsat, V., Raghavan, G. S. V. y Krishnaswamy, K. (2017). Microwave technology for food processing: an overview of current and future applications. En M. Regier, K. Knoerzer, y H. Schubert (Eds.), *The Microwave Processing of Foods (Second Edition)*, 100-116. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100528-6.00005-X>
- Ozkoc, S. O., Sumnu, G., Sahin, S. y Turabi, E. (2009). Investigation of physicochemical properties of breads baked in microwave and infrared-microwave combination ovens during storage. *European Food Research and Technology*, 228(6), 883-893. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-1001-0>
- Ozmutlu, O., Sumnu, G. y Sahin, S. (2001). Assessment of proofing of bread dough in the microwave oven. *European Food Research and Technology*, 212(4), 487-490. <https://doi.org/10.1007/s002170000276>
- Perry, M. R. y Lentz, R. R. (2020). Susceptors in microwave packaging. En U. Erle, P. Pesheck, y M. Lorence (Eds.), *Development of Packaging and Products for Use in Microwave Ovens (Second Edition)*, 261-291. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102713-4.00008-6>
- Pitchai, K., Birla, S., Raj, J. D., Subbiah, J. y Jones, D. D. (2011). Modeling of susceptor assisted microwave heating in domestic ovens. *Boston Comsol conference proceeding*.
- Regier, M. (2014). Microwavable food packaging. En J. H. Han (Ed.), *Innovations in Food Packaging (Second Edition)*, 495-514. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394601-0.00020-5>
- Regier, M., Knoerzer, K. y Schubert, H. (2017). Introducing microwave-assisted processing of food: fundamentals of the technology. En M. Regier, K. Knoerzer, y H. Schubert (Eds.), *The Microwave Processing of Foods (Second Edition)*, 1-22. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100528-6.00001-2>
- Sahin, S., Sumnu, G. y Zircirkiran, D. (2002). Effects of susceptor, coating and conventional browning applications on color and crust formation during microwave baking. *The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy: A Publication of the International Microwave Power Institute*, 37(4), 223-236. <https://doi.org/10.1080/08327823.2002.11688481>
- Schiffmann, R. F. (2011). Technology of microwavable coated foods. En K. Kulp, R. Loewe, K. Lorenz y J. Gelroth (Eds.), *Batters and Breadings in Food Processing (Second Edition)*, 207-217. AACC International Press. <https://doi.org/10.1016/B978-1-891127-71-7.50017-6>
- Schiffmann, R. F. (2017). Packaging for microwave foods. En *The Microwave Processing of Foods: Second Edition*, 273-299. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100528-6.00013-9>
- Shukla, T. P. y Anantheswaran, R. C. (2001). Ingredient interactions and product development for microwave heating. En *Handbook of Microwave Technology for Food Application*. CRC Press.
- Verma, D., Mahanti, N., Thakur, M., Chakraborty, S. y Srivastav, P. (2020). *Microwave Heating: Alternative Thermal Process Technology for Food Application*, 25-67. <https://doi.org/10.1201/9780429297335-2>
- Walsh, H. y Kerry, J. P. (2012). Packaging of ready-to-serve and retail-ready meat, poultry and seafood products. En J. P. Kerry (Ed.), *Advances in Meat, Poultry and Seafood Packaging*, 406-436. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095718.3.406>
- Wang, J., McDowell, D. J., Hahm, T. S. y Lo, Y. M. (2008). Effects of expanded polytetrafluoroethylene as a packaging material on the appearance and texture of microwave-baked soy cookies. *International Journal of Food Properties*, 11(2), 427-438. <https://doi.org/10.1080/10942910701530818>
- Wang, X., Wang, X., Muhoza, B., Feng, T., Xia, S. y Zhang, X. (2020). Microwave combined with conduction heating effects on the tenderness, water distribution, and microstructure of pork belly. *Innovative Food Science y Emerging Technologies*, 62, 102344. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102344>
- Wäppling-Raaholt, B. y Ohlsson, T. (2005). Improving the heating uniformity in microwave processing. *The Microwave Processing of Foods*, 292-316.
- Zuckerman, H. y Miltz, J. (1998). Temperature profiles in dough heated with a susceptor in the microwave oven. *Journal of Food Processing and Preservation*, 22(1), 53-65. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1998.tb00804.x>