

# Termopares para medir temperatura en muestras expuestas a microondas

JUAN AGUILAR \*

\* Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Doctorado en Ingeniería de Materiales. Apartado Postal 076 F, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. CP 66420. aaguilar@ccr.dsi.uanl.mx

## Resumen

Dado el principio de operación del termopar, por lo común no se recomienda su uso en lugares en que se encuentren expuestos a campos electromagnéticos. Existen otras técnicas que han sido desarrolladas para hacer mediciones en estas condiciones, pero utilizan elementos que no pueden ser sometidos a temperaturas mayores a los 350°C. Por otra parte, los elementos que componen un termopar resisten temperaturas superiores a los 1000°C por lo que resulta conveniente estudiar la posibilidad de emplearlo bajo campos electromagnéticos. En este documento se presentan los resultados que se obtuvieron al utilizar termopares en muestras expuestas a microondas y un análisis de los puntos que deben ser tomados en cuenta para hacer mediciones confiables.

## Abstract

The principle of operation of the thermocouples makes them often not recommendable for applications where they are exposed to electromagnetic fields. There are other techniques that are intended for such applications, but they make use of elements that can not be exposed to temperatures above 350°C. On the other hand, the thermocouples are made of elements that resist temperatures over 1000°C, therefore, it is convenient to study their possible application under electromagnetic fields. The results of the tests conducted with thermocouples exposed to microwaves and an analysis of the aspects that must be taken into account for having reliable measurements are presented in this work.

## Introducción

La mayoría de los procesos tradicionales tales como la producción de acero y materiales cerámicos, entre otros, requieren que se tenga control de la temperatura. Por lo general, ésta es muy fácil de medir y uno de los elementos más ampliamente utilizados es el termopar, el cual consiste en un arreglo de dos alambres de distinto material unidos por un extremo, la fuerza electromotriz que se tiene en los extremos que quedan libres es función

de la temperatura en la unión, así que conociendo esta fuerza se conoce la temperatura. Existen varios tipos de termopar según la temperatura y el medio ambiente en que se desea hacer la medición, otro aspecto a considerar es el tiempo de respuesta, si se requieren tiempos de respuesta cortos se utilizan termopares muy delgados. La razón por la cual los termopares se utilizan ampliamente es porque se pueden ajustar prácticamente a cualquier ambiente y se pueden medir temperaturas hasta de 1500°C sin gran problema, aunque dado su principio de operación estos elementos no deben exponerse a como campos electromagnéticos alternantes, como es el caso de las microondas, ya que se generarían corrientes y por lo tanto se agregaría una señal que no es función de la temperatura. Hasta hace poco tiempo la necesidad de medir temperatura dentro de campos electromagnéticos no era muy común, sin embargo esta necesidad es ahora cada vez más frecuente, debido a que en los últimos años ha habido un interés creciente por su uso como forma para proporcionar energía a los procesos. En áreas tales como la alimenticia y algunos procesos relacionados con la química orgánica no se requieren temperaturas mayores de 350°C, por lo que la fibra óptica se puede utilizar sin problema, pero en áreas tales como el procesado de materiales cerámicos, hasta el momento la fibra óptica es inútil por lo que se ha buscado la manera de utilizar al bien conocido termopar.

## Termopares y campo electromagnético

Aunque el uso del termopar es una de las técnicas más utilizadas para realizar mediciones a altas temperaturas, uno de sus puntos débiles está relacionado con su uso dentro de campos electromagnéticos, no solo por las razones que se han mencionado, sino que además por su naturaleza metálica pueden perturbar el patrón electromagnético dentro de la cavidad en la que se esté llevando a cabo un proceso dado. Para poder utilizar el termopar en estas condiciones se pueden hacer algunas modificaciones; una sería blindarlo para protegerlo del campo, cuidando que no esté aterrizado, para minimizar las posibilidades de que este sistema actúe como una antena que pueda extraer una cantidad significativa de energía. Dado que las ondas electromagnéticas están

formadas por un campo eléctrico y un campo magnético que se encuentran defasados  $90^\circ$  (en el espacio) entre sí, otra forma para evitar que el termopar se vea afectado por el campo sería colocarlo en posición perpendicular al campo eléctrico [1], ya que de esta manera el campo magnético quedaría paralelo al mismo y de acuerdo a la Ley de Faraday no habría una generación neta de corrientes sobre él. Esto se puede lograr, como se mostrará posteriormente, si el proceso se lleva a cabo dentro de una guía de onda de dimensiones tales que las microondas se propaguen con un solo modo, y por lo tanto la dirección del campo eléctrico sea conocida. En este trabajo se utilizaron termopares tipo K, cuyo límite de operación son  $1250^\circ\text{C}$ , estaban blindados con acero inoxidable (el conjunto era de 1.58 mm de diámetro) y sin aterrizar para evitar pérdidas, además, en el caso de las pruebas en guía de onda (en donde la dirección del campo eléctrico es conocido) se probó colocarlos en dirección perpendicular al campo eléctrico. Una hipótesis que se probó en este trabajo fue que además del blindaje con el que contaba el termopar, se suponía que la muestra en sí protegería al termopar, es decir que si el material que está siendo calentado y que está rodeando al termopar es lo suficientemente absorbente como para evitar que las microondas lleguen hasta el termopar, se podrían tener mediciones confiables de temperatura. Este tipo de pruebas se llevó a cabo en una cavidad multimodo de manera que no era posible que el campo eléctrico fuera perpendicular al termopar. En este trabajo se utilizaron dos materiales que se pueden encontrar ampliamente en la industria de los refractarios y que tienen propiedades radicalmente diferentes en términos de absorción, se trata de la alúmina que se reporta frecuentemente como transparente a las microondas [2] y el grafito que se reporta como un buen absorbedor.

### Pruebas en una cavidad multimodo

Las pruebas se llevaron a cabo en una cavidad (380 mm X 430 mm X 230 mm) con un magnetrón de 1000 Watts como fuente de microondas. En este aparato las pruebas podían llevarse a cabo a toda la potencia o a cierto porcentaje de potencia utilizando un variador que apagaba al magnetrón intermitentemente (100% de potencia durante cierto tiempo). En las pruebas que se realizaron tal sistema fue fijado a 16% del tiempo (representando 16% de la energía) en un ciclo de 2.43 segundos, a 20% en un ciclo de 2.5 segundos y 61% en un ciclo de 2.6 segundos. La duración del ciclo era una característica del equipo y no se podía controlar, pero lo importante es que era lo suficientemente corto como para evitar confusión con los efectos de la transferencia de calor en sí. Las muestras se colocaron dentro de un crisol hecho de alúmina (Peso: 115 gr., vol. del crisol: 41.8 cc, densidad: 2.75 gr./cc, capacidad: 26.9 cc), un esquema de

este crisol aparece en las Figuras 1 y 2. Mediante una serie de pruebas en las que se colocó el crisol con grafito (20.2 gr. en promedio) en diferentes posiciones dentro de la cavidad, se localizó el lugar en donde la ganancia de energía era máxima. Este sitio fue elegido para llevar a cabo las pruebas con el arreglo que se muestra en la Figura 1.

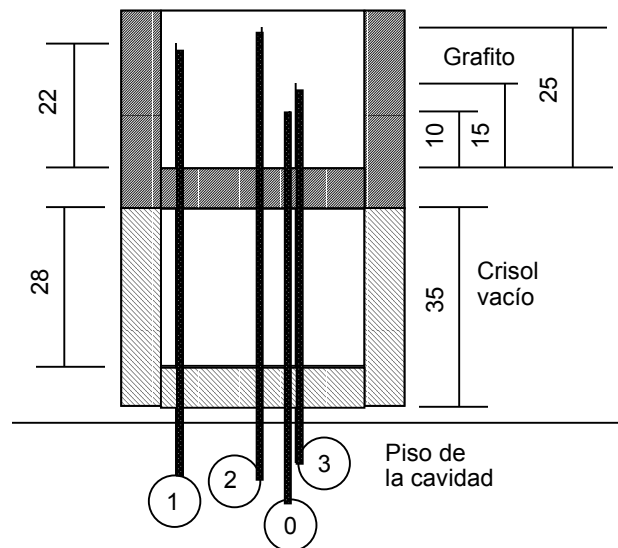


Figura 1: Esquema del arreglo utilizado para las pruebas dentro de la cavidad. Se utilizó un crisol vacío (50 mm de diámetro) como apoyo porque el mejor sitio para colocar el crisol estaba a 35 mm sobre el piso de la cavidad (acot. en mm). Los termopares (0, 1, 2 y 3) se introdujeron a través del fondo y se ilustran en posiciones típicas.

En este caso, debido a las características de la cavidad (es multimodo) no se tiene el campo eléctrico en una sola dirección y por lo tanto no hay manera de colocar el termopar en dirección perpendicular a éste, pero como se mencionó anteriormente se propone probar que el material que está rodeando al termopar lo protege del campo de tal manera que las mediciones sean confiables. En trabajos previos se utilizó un solo termopar con éxito [3], pero por esta razón no se logró tener ninguna conclusión en cuanto al perfil térmico y por lo tanto de la influencia que los termopares podrían tener sobre el calentamiento de la muestra.

### Pruebas en la guía de onda

Para tener una idea del desempeño de los termopares cuando se colocaran perpendicularmente al campo eléctrico se llevó a cabo otro tipo de pruebas. En este caso se utilizó el mismo tipo de crisol que en la prueba anterior pero aquí fue colocado dentro de una guía de onda WR284 (36 mm X 72 mm de sección transversal) hecha de acero inoxidable. El crisol se colocó de tal

manera que la energía suministrada era conocida, mientras que dos termopares fueron colocados perpendiculares al campo eléctrico. La Figura 2 muestra este arreglo experimental, el cual está basado en una técnica para llevar a cabo mediciones a alta potencia en una guía de onda.

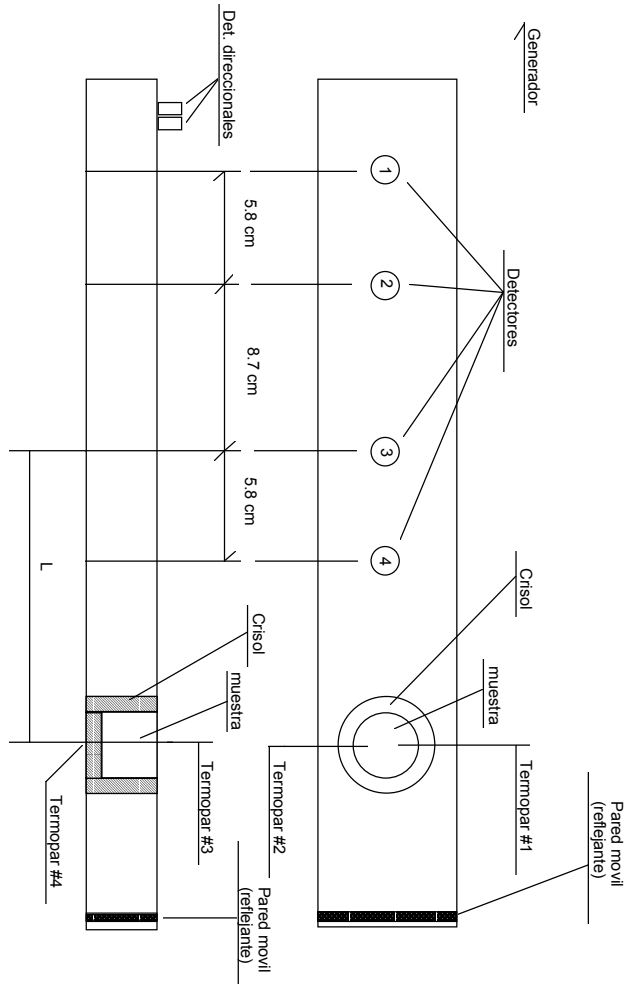


Figura 2: Esquema del sistema de guía de onda, los termopares 1 y 2 están en los lados (perpendiculares al campo eléctrico), mientras que el 3 está arriba (paralelo al campo eléctrico) y el 4 está en la parte inferior, pero fuera de la guía de onda. La distancia L es de 87 cm (no se muestra a escala) y es la apropiada para tener la muestra en la misma posición eléctrica que el detector 3. La pared móvil se ajusta para tener una onda estacionaria cuyo máximo se encuentre sobre la muestra.

La técnica [1] consiste en colocar una muestra cilíndrica hecha del material que va a ser probado en el centro de la guía de onda en donde el campo eléctrico es máximo y paralelo a éste. Para este experimento se utilizó un generador de 2.45 GHz en el cual se podía variar la potencia de salida hasta un máximo de 1500 W.

La Figura 3 muestra a la guía de onda con sus cuatro detectores, a este conjunto se le conoce como analizador de fase.

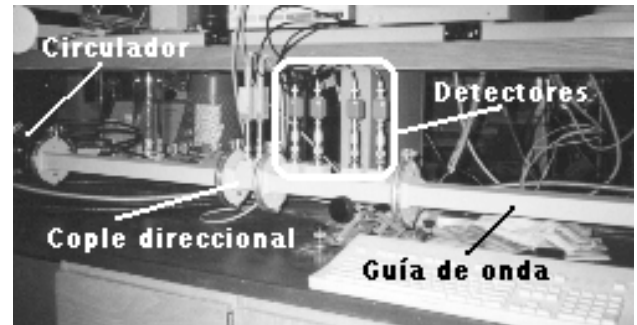


Figura 3. Vista externa de los cuatro detectores en el analizador de fase mostrado en la Figura 2. El circulator se encuentra justo a la salida del generador y evita que las ondas reflejadas regresen a éste. El cople direccional permite conocer la razón entre la energía que sale del generador y la que retorna.

Una manera de conocer el desempeño de los termopares es mediante la observación de los perfiles de calentamiento. Si éstos están midiendo la temperatura adecuadamente se calentarán siguiendo patrones que corresponden a la ganancia de calor en un sólido, mientras que si el termopar está afectando al campo, éste se calentará de modo inexplicable porque ha impuesto una nueva condición de frontera. Este último punto sería notorio en el momento que la energía se aplicara o se suspendiera, ya que la curvas de calentamiento presentarían discontinuidades en estos puntos de haber una interferencia del campo de microondas. Otra prueba que es muy importante es colocar los termopares en la guía de onda vacía y corroborar que no hay aumento de temperatura (autocalentamiento) ni señales erráticas producto de la exposición al campo de microondas. Con la guía vacía solamente los termopares que estaban perpendiculares al campo eléctrico (T# 1 y T# 2) no sufrieron autocalentamiento, T# 3 produjo arco eléctrico y T# 4 no proporciona información a este respecto por encontrarse fuera de la guía de onda.

## Resultados y discusión

Los argumentos que se han presentado hasta este momento, así como esta discusión contienen los elementos que se refieren al comportamiento de los materiales que específicamente se utilizaron aquí, los razonamientos se basan en conceptos de ingeniería de microondas [4] y se utilizan solo para confirmar que los termopares respondieron de la manera esperada. Los arreglos experimentales que se utilizaron tienen el diseño básico con el que cuenta cualquier dispositivo para

utilizar microondas como fuente de energía, así los resultados que aquí se obtuvieron son extensivos a otros aparatos para el mismo fin.

### Rapidez de calentamiento

Las pruebas se llevaron a cabo con el crisol lleno (28 gr. de alúmina ó 20 gr. de grafito, según la prueba) y con los termopares colocados en diferentes lugares dentro del mismo. En ambos tipos de pruebas el material que rodeaba al termopar evitaba que se formara arco entre ellos y las lecturas fueron confiables en base al criterio antes descrito, como se muestra a continuación. Las posiciones de los termopares y las condiciones de las pruebas se dan en las figuras que corresponden a cada una de ellas.

La Figura 4 corresponde a una muestra de grafito calentada en la cavidad multimodo, el termopar T# 0 se encuentra a 5 mm de la parte exterior de la muestra, mientras que el T# 1 se encontraba hacia el interior. El hecho de que la temperatura sea menor cerca del exterior corresponde a que es en este lugar en donde se dan las pérdidas de calor al exterior. Nótese que las curvas no presentan ruido y siguen un patrón continuo que se mantiene aún durante el enfriamiento. Esto demuestra que las microondas no están afectando a los termopares.

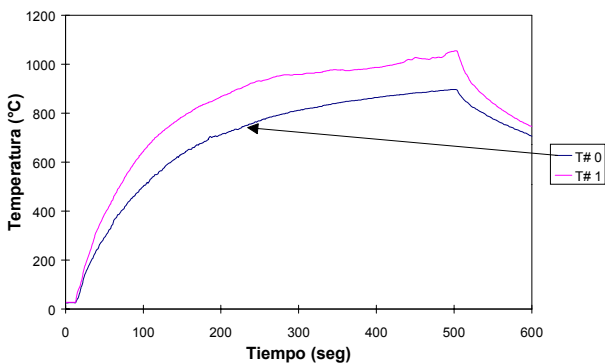


Figura 4: Muestra de grafito calentada en la cavidad a 1000 W. La posición de los termopares se tomó en la coordenada radial (r) desde el centro, y la coordenada (z) desde el fondo del crisol, así las posiciones (r,z) en milímetros son: T# 0 (0,20) y T# 1 (15,15).

La Figura 5 corresponde a una muestra de alúmina calentada en la cavidad multimodo, aquí la temperatura máxima que se alcanza es relativamente baja porque la alúmina no absorbe de modo efectivo las microondas, especialmente a temperatura ambiente [2]. Sin embargo se puede notar que una vez más es la parte central la que se calienta más. El momento en que la temperatura decrece, alrededor de 240 segundos de prueba, corresponde a un momento en que el horno fue apagado

para comprobar que los termopares estaban tomando la temperatura correcta y permitir una estabilización de la temperatura en la muestra. Los resultados de esta prueba son importantes en el sentido de que el máximo ruido en la medición debería darse en este caso, ya que la alúmina es semitransparente a las microondas y por esta razón el termopar no está protegido por la muestra en la misma medida que con el grafito. Adicionalmente se puede comprobar que en el momento en que el magnetrón fue apagado las curvas presentan el enfriamiento normal, sin discontinuidades en la rampa de temperatura, lo cual indica que el campo no afecta a los termopares.

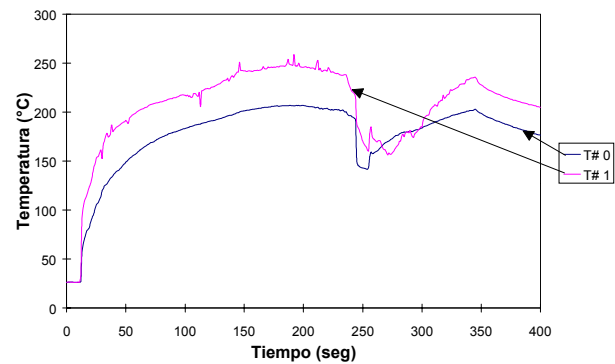


Figura 5: Muestra de alúmina calentada en la cavidad a 1000 W. La posición de los termopares se tomó como en la figura anterior, para este caso las posiciones (r,z) en milímetros son: T#0 (10,24) y T#1 (10,15).

La Figura 6 corresponde a una prueba de una mezcla de alúmina y grafito llevada a cabo en la guía de onda de la Figura 2. Aún cuando se había probado que los termopares colocados en dirección paralela al campo eléctrico se sobrecalientan, especialmente con la cavidad vacía o con materiales que no son buenos absorbentes de microondas, aquí se puede observar el efecto de la muestra sobre el termopar que estaba paralelo al campo eléctrico (T# 3). La mezcla resultó ser suficientemente buena absorbiendo microondas, de manera que este termopar fue protegido del campo y se calentó solamente como función de su posición, al principio éste estaba a 2 mm de la superficie y al empujarlo a 3 mm, la temperatura se incrementa (Flecha sobre T# 3).

La potencia fue variada hacia el final de la prueba y los termopares siguieron el comportamiento esperado, se puede apreciar aquí que solamente T# 4 en el exterior se calienta solamente por conducción, ya que no está ubicado dentro de la guía de onda, mientras que la parte central de la muestra (T# 1) es la que más se calienta. Además se puede observar la cercanía en temperaturas entre T# 3 que está en una posición opuesta y casi simétrica a T# 4 (solamente que uno esta adentro y otro está afuera de la guía de onda) y se comportan como la transferencia de calor indica. La forma de “U” en el perfil

térmico es mayor en T# 1 y es casi nula en T# 4, lo que también demuestra que los termopares son confiables.

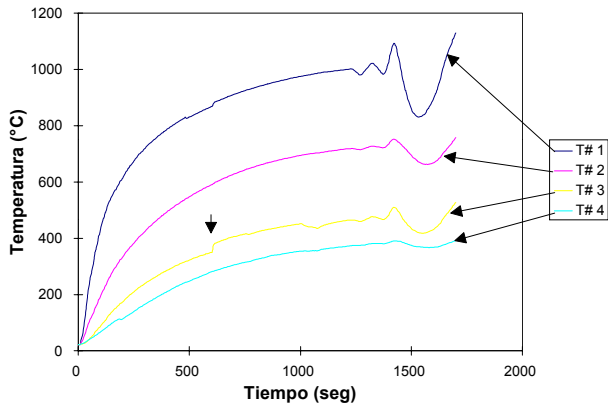


Figura 6: Muestra de una mezcla de alúmina y grafito (1:1 en peso) calentada en la guía de onda a 400 W. Las posiciones (r,z) son: T# 1 (6, 11), T #2 (12,11), T # 3 (0, 23) y T# 4 (0, exterior). La numeración corresponde a la Figura 2.

La figura 7 corresponde a una prueba de grafito llevada a cabo en la guía de onda, en este caso los termopares funcionaron muy bien, nótese como ambos termopares (que se encontraban bastante cerca uno del otro) responden de manera similar, en la parte en que se observa un cambio de pendiente (aproximadamente 600 segundos de prueba) corresponde a un incremento en la potencia suministrada. La potencia fue variada al final de la prueba, se aumentó y se disminuyó gradualmente y los termopares siguieron este cambio sin mostrar ninguna perturbación.

Aunque en la literatura [1] se ha sugerido que colocar los termopares de manera perpendicular al campo eléctrico en una guía de onda funciona, no se especifica el rango de potencias, o el tamaño que estos termopares pueden tener. También se ha sugerido que el material absorbente alrededor del termopar puede protegerlo [3], pero no se especifica ni la cantidad, ni las dimensiones, ni que propiedades debe tener. Los resultados de este trabajo permiten afirmar que en las pruebas que se lleven a cabo en cavidades multimodo con los materiales y las dimensiones que aquí se presentan se pueden utilizar termopares con buenos resultados, aquí lo más importante es que todo el termopar esté protegido por la muestra, las partes que queden expuestas podrían formar arcos con la pared. En cuanto a las pruebas que se llevan a cabo en guías de onda, en las cuales se conoce la orientación del campo eléctrico, los termopares deben estar perpendiculares a éste. Cuando la muestra está hecha de un material que absorbe las microondas considerablemente, la posición de los termopares podría no ser tomada en cuenta. Pero se puede afirmar que si no se desea tomar en cuenta ni el tamaño ni la capacidad de

absorción de la muestra, la posición del termopar resulta crucial. Es conveniente en todos los casos que los termopares sean delgados y que cuando se utilizan varios no se toquen entre ellos.

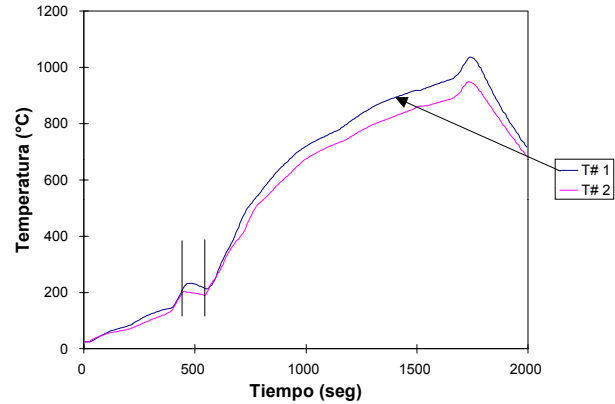


Figura 7: Muestra de grafito calentada en guía de onda. Las posiciones (r,z) son: T# 1 (4,11) y T# 2 (6,11). Las líneas verticales separan el momento en que la potencia fue aumentada de 150 a 400 W. En este caso el generador no fue apagado al final, sino que se disminuyó la potencia gradualmente y los termopares muestran este cambio.

## Conclusión

Las temperaturas alcanzadas estuvieron alrededor de las que se encuentran en los hornos utilizados en la industria para llevar a cabo el proceso de sinterización. Así que si estos procesos se llevaran a cabo con microondas se podrían utilizar termopares para medir la temperatura.

Muestras relativamente pequeñas, como las que se utilizaron aquí, son suficientemente grandes como para proteger a los termopares, por lo que se pudieron hacer mediciones confiables a potencias de alrededor de 1000 Watts.

El tamaño de la muestra utilizada es menor que las formas que comúnmente se producen en la industria por otros métodos, por lo que existe un gran potencial en el uso de termopares para tomar temperaturas durante el procesamiento de estos materiales mediante microondas.

## Referencias

- [1] Roussy G., Pearce J.: Foundations and Industrial Applications of Microwaves and Radio Frequency Fields, John Wiley and Sons, 1995

- [2] Westphal W.: Tables of Dielectric Materials, Volume VI, Laboratory of Insulation research, MIT, Cambridge Massachusetts, 1958
- [3] Aguilar J. Gómez I., González M, Morales J.: Description of the heating behavior of some ceramic materials in a microwave field, 32nd Microwave Power Symposium, Jul. 1997, pp 38-41
- [4] Metaxas A., Meredith R.: Industrial Microwave Heating, Peter Peregrinus, 1983

### **Agradecimientos**

El autor agradece el apoyo recibido de la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. También se reconoce el apoyo otorgado por John Pearce, así como el Centro para Recursos Energéticos y Ambientales (Center for Energy and Environmental Resources) a través del Laboratorio de Energía de Procesado (Process Energetics Laboratory) de la Universidad de Texas en Austin.

### **Palabras clave**

Medición de temperatura, termopar, microondas, campos electromagnéticos