

Medición de la conductividad eléctrica de materiales cerámicos en una guía de onda

Rubén Morones Ibarra, Eder Zavala López, Oxana V. Kharissova
Facultad Ciencias Físico-Matemáticas, UANL.
Ubaldo Ortiz Méndez, Zarel Valdez Nava, Juan A. Aguilar Garib
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica-UANL
ovkharissova@ccr.dsi.uanl.mx.

ABSTRACT

A method for measuring conductivity of materials exposed to intensive electric fields is proposed in this paper. Previous measurements of permittivity in a waveguide showed that it is possible to introduce electrodes in such a way that they are not affected by the microwave energy. Therefore in this work a similar device was employed. The energy was supplied by a magnetron working at 2.45 GHz. Comparisons with traditional impedance analyzer are also presented.

KEYWORDS

Electrical conductivity, microwaves, ceramics.

INTRODUCCIÓN

La conductividad eléctrica es una de las propiedades más importantes, desde el punto de vista funcional de los materiales. La eficiencia con la que la energía eléctrica se transmite depende de ella y se sabe que está relacionada con el calentamiento del material. La necesidad de materiales superconductores también ha hecho que se preste cada vez más atención a esta materia. Los valores de la conductividad para materiales típicos pueden ser encontrados en múltiples referencias, pero se debe tomar en cuenta que aún pequeñas variaciones en la composición afectan esta propiedad, de manera que los datos para los materiales con los que un investigador trabaja en el laboratorio normalmente no están disponibles. Dada su dependencia de la frecuencia, el equipo más común para llevar a cabo estas mediciones es el analizador de impedancia. Sin embargo, éste opera a baja potencia y por lo tanto no se pueden detectar cambios que puedan ocurrir cuando el material se expone a un campo eléctrico intenso.

El objetivo de este trabajo está enfocado a explorar la posibilidad de hacer mediciones de conductividad de materiales bajo un campo de microondas aprovechando la experiencia con la que se cuenta para hacer mediciones de permitividad en esas condiciones. Se propone un método en que se utilizan microondas para mantener el campo eléctrico a una frecuencia y una potencia dadas, tal que la muestra sufra calentamiento.



CALENTAMIENTO DE LOS MATERIALES POR MICROONDAS

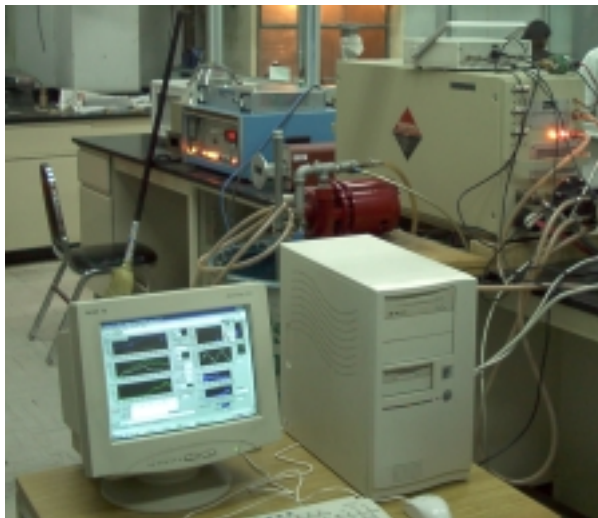
La absorción de energía electromagnética por un dieléctrico ocurre por el fenómeno conocido como histéresis dieléctrica. Este fenómeno se debe a la oscilación de los dipolos atómicos del dieléctrico los cuales oscilan en fase con la frecuencia del campo eléctrico externo.

Cuando se coloca un dieléctrico en un campo eléctrico externo sus átomos se polarizan. Si se somete un material a un campo eléctrico oscilante, entonces los dipolos \vec{p} del material oscilan en fase (con frecuencia ω) con este campo externo. Si $\vec{p} = q\vec{X}$ es el momento dipolar eléctrico, siendo q la carga eléctrica del átomo y \vec{X} el desplazamiento del centro de carga negativa respecto al núcleo atómico, entonces, la oscilación del dipolo \vec{p} cuando se coloca en un campo electromagnético externo quedará descrita por la oscilación de $\vec{X}(t)$ que satisface la ecuación del oscilador armónico forzado¹.

$$m\ddot{X} + \gamma\dot{X} + kX = F_{ext} \quad (1)$$

Donde m , γ y k son la masa, la constante de amortiguamiento y la constante de tensión del dipolo, respectivamente y $X(t)$ es el tamaño del dipolo.

El efecto del campo magnético sobre los átomos es despreciable comparado con la interacción eléctrica, así que se toma F_{ext} como la fuerza eléctrica sobre la carga del átomo: $F_{ext} = qE(X,t)$, siendo q la carga eléctrica de éste.



Vista del generador de microondas, el control y la pantalla durante una prueba.

Por otra parte, la longitud de onda de las microondas de 2.45 GHz es de 12.5 cm en trayectoria libre y 23.2 cm en la guía de onda utilizada en este trabajo, así que la variación espacial del campo eléctrico en la región del átomo, cuyas dimensiones son del orden de Å, es también despreciable.

Se tiene así que la Ecuación (1) puede escribirse como

$$m\ddot{X} + \gamma\dot{X} + kX = qE_0 \text{Sen}\omega t \quad (2)$$

Donde se ha definido a $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ la cual es la frecuencia natural de oscilación del dipolo.

Por otra parte la permitividad compleja se expresa como:

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (3)$$

En donde ϵ' y ϵ'' son respectivamente la parte real e imaginaria de la permitividad.

De la solución de estas ecuaciones², se llega a la conclusión de que estas componentes dependen de la frecuencia ω del campo externo.

Por otra parte, al incluir la permitividad compleja en la ley de Ampere-Maxwell, y considerando a la conductividad eléctrica del material (σ) surge una expresión que relaciona ambas contribuciones:

$$\sigma' = (\sigma + \epsilon''\omega) \quad (4)$$

Con frecuencia se conoce a σ' como la conductividad equivalente del material, aunque se debe apreciar que solamente la componente σ se refiere al transporte de electrones o conductividad eléctrica.

Así, la rapidez con la que se ganará calor por unidad de volumen en el material está dada por:

$$P = \sigma' E^2 \quad (5)$$

Cuando se considera un material conductor, no existe la polarización de los átomos, $\sigma' = \sigma$ entonces en la ecuación (5) $P = \sigma E^2$ y el calentamiento del material es óhmico (efecto Joule), debido al paso de una corriente a través del material.

Para el caso de un material dieléctrico (una cerámica, un vidrio o un plástico, por ejemplo), $\sigma = 0$ y en la ecuación (5) $P = \epsilon''\omega E^2$ y el calentamiento se debe a la oscilación de los dipolos eléctricos del material.

MIDIENDO LA PERMITIVIDAD

El método que se ha utilizado para medir la permitividad fue propuesto inicialmente por Roussy y Pearce³ y modificado para muestras con las propiedades de los cerámicos⁴. Este método consiste en colocar una pequeña muestra cilíndrica en el centro de una guía de onda (en $x=a/2$; siendo “a” el ancho de la guía de onda) y estimar la impedancia basados en el análisis de la onda estacionaria. Se supone que la muestra es suficientemente pequeña como para aceptar que se trata de una impedancia en paralelo y que el campo eléctrico es constante (figura 1).

Un aspecto importante fue la manera en que se midió la temperatura, se utilizaron termopares blindados, colocados perpendicularmente al campo eléctrico tal como se sugiere en la literatura³ y que ya ha sido probado en otros trabajos⁵.

En la figura 1 se observan dos electrodos que están colocados perpendicularmente al campo eléctrico dentro de la onda. En esa misma posición fueron colocados los termopares de los que se hace mención y de los cuales la confiabilidad ha sido probada de diferentes maneras.

Debido a que en ese experimento se comprobó que los termopares no eran afectados por las microondas, se supone que en el arreglo experimental del presente trabajo tampoco se verán afectados los electrodos que se utilizan.

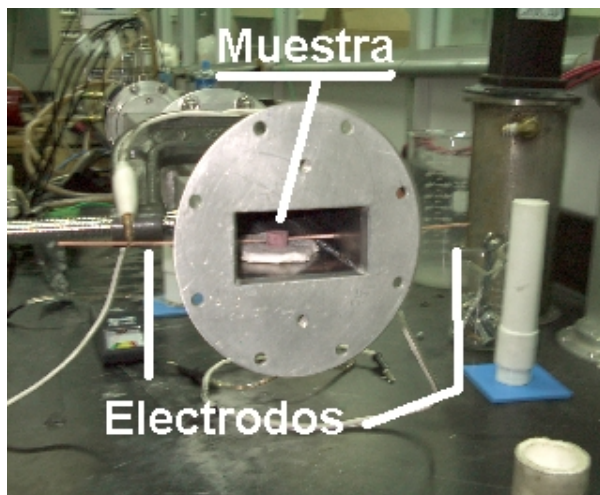


Fig. 1. Vista frontal de la guía de onda utilizada con la muestra y los electrodos insertados. La guía mide 76 mm x 36 mm (denominación WR284).

Se encontró que para el caso de la alúmina, la parte imaginaria de la permitividad (ϵ'') aumenta con la temperatura (figura 2), lo que estaría de acuerdo con el hecho de que la conductividad equivalente (σ') aumentara.

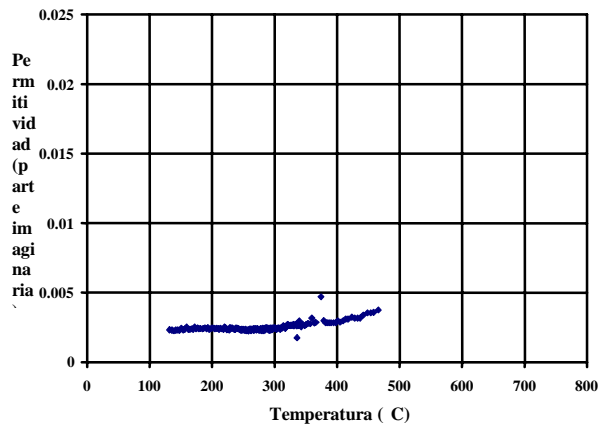


Fig. 2. Estimación de ϵ'' en una prueba de alúmina expuesta a 800 Watts y 2.45 GHz.

EXPERIMENTACIÓN

En este trabajo se pretende medir la conductividad utilizando un arreglo similar al empleado para la permitividad, colocando un par de electrodos en lugar de los termopares, como ya se mostró en la Figura 1, para que al igual que éstos no resulten afectados por el campo eléctrico.

Las pruebas fueron llevadas a cabo en una guía de onda WR284. La fuente consistió en un generador de 2.45 GHz en el que se varió la potencia a valores de hasta 1500 W. En la Figura 3 se puede observar la guía de onda cerrada que contiene la muestra en su interior, como muestra la Figura 1.

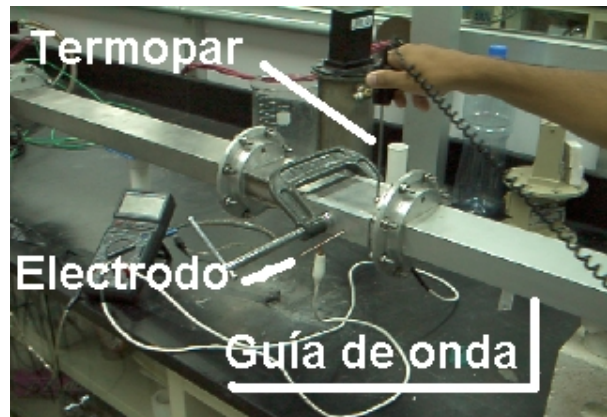


Fig. 3. Guía de onda cerrada en la que se muestran los electrodos y un termopar de contacto para medir la temperatura de la pared.

Se utilizó además un termopar de contacto para medir la temperatura de la pared, en este arreglo no se puede medir la temperatura de la muestra.

El material que se deseaba probar es una espinela que contiene 9% molar de hematita (Fe_2O_3). Sólo para efecto de comparar las mediciones de permitividad contra las de conductividad se analizó primeramente la alúmina mediante un analizador de impedancias en el intervalo de frecuencia de 1 KHz a 1 MHz y a diferentes temperaturas en el intervalo de 25°C hasta 500°C.

RESULTADOS Y DISCUSION

Como se indicó anteriormente, una muestra de alúmina fue probada con un analizador de impedancia y se encuentra que la conductividad aumenta tal como la permitividad lo hace. En la figura 4 se observa que la conductividad (en Siemens) aumenta con la frecuencia, pero además se puede apreciar que alrededor de los 500°C este valor se eleva y corresponde con el comportamiento de la permitividad con respecto a la temperatura.

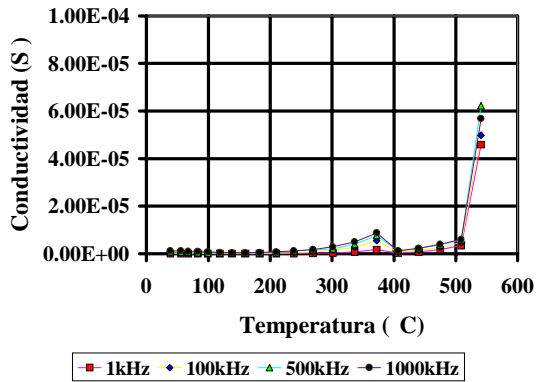


Fig. 4. Conductividad de la alúmina determinada en un analizador de impedancia a diferentes frecuencias.

Por otra parte, el material objeto de este trabajo mostró un comportamiento similar. Se puede observar en la figura 5 que al igual que la alúmina, la conductividad se incrementa de manera importante a partir de los 500°C.

La figura 6 muestra un ejemplo de los resultados que se obtuvieron típicamente en la guía de onda que se utilizó en este trabajo.

Se observa que los valores obtenidos son más pequeños que los que se obtuvieron con el analizador

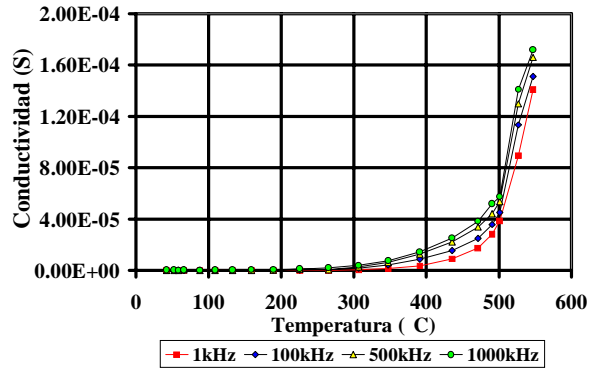


Fig. 5. Conductividad de la espinela con 9% molar de hematita determinada en un analizador de impedancia a diferentes frecuencias.

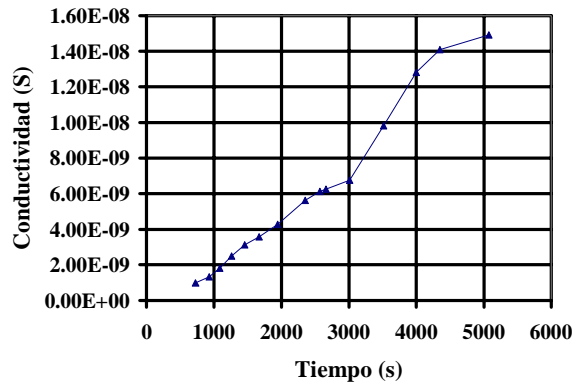


Fig. 6. Resultados obtenidos en el dispositivo propuesto en este trabajo.

de impedancia, cuando deberían ser mayores ya que la frecuencia de las microondas utilizadas es mayor (2.45 GHz). Sin embargo debe considerarse que en este caso existe incertidumbre con respecto al contacto eléctrico entre la muestra y el electrodo además de determinar las áreas de contacto. Por otra parte, se estimó de las mediciones llevadas a cabo sobre la pared de la guía que la temperatura que la muestra alcanzó fue del orden de los 200°C. Dado que no fue posible seguir la curva de calentamiento a lo largo de la prueba, mejor se presentan los resultados graficados contra el tiempo de prueba (figura 6) y se observa que hay, en efecto, independientemente de la cuestión de los electrodos, un aumento en la conductividad con respecto a la temperatura, ya que la muestra se estaba calentando.

No obstante las limitaciones del método propuesto en este trabajo para medir la conductividad (s), los valores se encuentran dentro del orden de magnitud de los que se reportan con el analizador de

impedancias para la temperatura alcanzada por la muestra (alrededor de 200°C), como se aprecia en la figura 7.

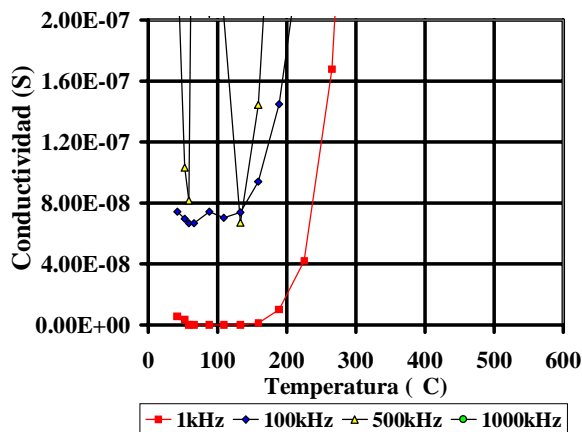


Fig. 7. Sección de la gráfica de la figura 5.

En este trabajo solamente se estudió la posibilidad de hacer las mediciones dentro del campo de microondas como posibilidad adicional del analizador de impedancia en el cual el dispositivo de soporte de la muestra y los electrodos deben colocarse dentro de un horno. Los hornos convencionales de resistencia eléctrica no alcanzan más de 1800°C, y aun así se darían casos en que los electrodos no resistirían.

La idea es que dependiendo del material que se expone a las microondas es la temperatura que se podrá alcanzar, sin embargo de tenerse un material que sea buen absorbedor de microondas se podrían alcanzar temperaturas tan altas como el punto de fusión de algunos cerámicos. Por otro lado se trata de calentar únicamente la muestra, aunque los electrodos se calentarían por conducción ya que en este trabajo se corrobora que no se afectan más que los termopares que fueron utilizados para la medición de temperatura en el caso de la permitividad. Además, dado que la transferencia de calor no está gobernada por conducción, se puede proporcionar alta potencia a fin de alcanzar las temperaturas deseadas rápidamente, y registrar los datos necesarios para calcular la conductividad antes de que los electrodos se vean afectados.

CONCLUSIÓN

Comúnmente se puede medir la conductividad a diferentes frecuencias utilizando un analizador de impedancia. En la actualidad el procesamiento de materiales mediante microondas ha ido tomando cada vez más auge, por lo que la propuesta de medir esta propiedad bajo estas condiciones de los materiales con los que se trabaja en el laboratorio y que normalmente no aparecen en las referencias. Aunque en este trabajo no se alcanzó alta temperatura si se pudo confirmar que se puede llevar a cabo una medición y que los electrodos no se vieron afectados. Se debe trabajar aun más en lo que respecta al contacto y a la medición de la temperatura, que se podría hacer mediante pirometría óptica a través de una perforación en la guía o bien, utilizar el blindaje de los propios termopares como electrodos, y poder registrar aun temperaturas bajas.

REFERENCIAS

1. Jackson, J.D.: Classical Electrodynamics, 2nd. Ed., John Wiley and Sons, Inc., 1975, p.285.
2. Griffiths, D.J.: Introduction to Electrodynamics, 2nd. Ed., Prentice-Hall., 1989, p.382.
3. Roussy G., Pearce J.: Foundations and Industrial Applications of Microwaves and Radio Frequency Fields, John Wiley and Sons, 1995.
4. Aguilar J, Pearce J.: Study of the thermal behavior of materials exposed to microwaves achieving temperatures over 650°C. 33rd Microwave Power Symposium, International Microwave Power Institute, Chicago, ILL. Jul. 1998, pp. 47-50.
5. Aguilar J.: Termopares para medición de temperatura en materiales expuestos a microondas. Vol 1, 4, 1998, pp. 319-325.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado por el CONACYT y por la Universidad Autónoma de Nuevo León a través del PAICYT para el desarrollo de este trabajo.