

# Simulación del calentamiento de manganitas mediante microondas

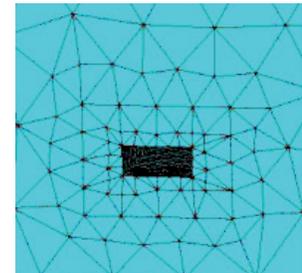
Juan Antonio Aguilar Garib, Felipe Raymundo García Cavazos,  
Zarel Valdez Nava

FIME-UANL

jaguilar@gama.fime.uanl.mx

## RESUMEN

*Las microondas han sido utilizadas para calentar, además de alimentos, a cerámicos y polímeros. Una aproximación que se sigue comúnmente para describir el calentamiento de estos materiales es suponer que la contribución resistiva es nula, y que la única aportación de energía es dieléctrica. En el caso de los semiconductores la contribución resistiva no se puede descartar, por lo que en este trabajo se consideran ambas contribuciones. Para poder hacer una estimación de ellas se construye un modelo de elemento finito que se resuelve utilizando el paquete ANSYS<sup>MR</sup>. Se cuenta con una herramienta operativa que permite además estimar las propiedades dieléctricas del material basado en las eléctricas, o viceversa, conociendo la temperatura y la potencia aplicada durante una prueba con microondas.*



## PALABRAS CLAVE

Simulación, manganitas, microondas.

## ABSTRACT

*Microwaves have been employed for heating, besides meals, ceramics and polymers. One approach that is taken commonly for describing heating in these materials assumes that resistive contribution is negligible, and that the only energy input is dielectric. In the semiconductor case, resistive contribution can not be discarded, therefore in this work both of them are considered. A finite element model implemented in a computational package (ANSYS<sup>TM</sup>) was proposed for estimating each contribution. The model provides an operational tool that allows estimating dielectric properties based on the electric properties ones, and vice versa, based on temperature measurement and applied power during microwave heating.*

## KEYWORDS

Simulation, manganites, microwaves.

## INTRODUCCIÓN

Se ha demostrado que utilizando microondas es posible alcanzar la temperatura necesaria para la producción de espinel alúmina-magnesia,<sup>1</sup> circonato de calcio<sup>2</sup> y el carburo de silicio.<sup>3</sup> La estimación de la absorción de energía de estos sistemas se hace suponiendo que la contribución principal

corresponde al calentamiento dieléctrico, dejando de lado la posibilidad de calentamiento resistivo. Esta suposición podría considerarse válida para los polímeros y los cerámicos, pero para el caso de los semiconductores debe ser comprobada. En este trabajo se considera el caso de la sinterización de óxidos de manganeso con níquel,  $Mn_3O_4$  Ni-Fe, también conocidos como manganitas,<sup>4</sup> y que se utilizan en la fabricación de termistores de coeficiente negativo de temperatura.

El procedimiento para sinterizar estos materiales convencionalmente consiste simplemente en compactar el polvo y someterlo a una temperatura tal que las partículas se unan entre ellas, aquí se utilizan microondas para proporcionar el calor necesario buscando mantener una estructura final al menos de las características de la obtenida convencionalmente.<sup>5</sup>

Ya que las manganitas son materiales semiconductores que poseen algunas características similares a los materiales conductores y algunas otras propias de los materiales aislantes, se deben considerar simultáneamente efectos resistivos y dieléctricos.<sup>4</sup> También se deben considerar las ecuaciones de campo electromagnético y flujo de calor de manera simultánea. En este caso la solución analítica es compleja por lo que se recurre al método de elemento finito, utilizando para la solución el paquete ANSYS<sup>MR</sup>.

## EXPERIMENTACIÓN

### Metodología

Una vez que se ha propuesto que el calentamiento de la manganita por medio de microondas obedece a la combinación de efectos resistivos y dieléctricos, se plantean las ecuaciones con las condiciones de frontera correspondientes que puedan ser determinadas experimentalmente, y de allí se verifica la validez del modelo haciendo una evaluación en situaciones extremas.

### Muestra

La manganita de muestra es un paralelepípedo de 5.9 mm X 11.4 mm X 1.6 mm, con densidad de 4.2 g/cm<sup>3</sup> y fue obtenido mediante la sinterización de polvo de  $Fe_{0.22}Ni_{0.67}Mn_{2.11}O_4$ .

### Arreglo experimental

Se utiliza un generador de microondas de 2.45 GHz y potencia variable de hasta 3000 Watts, conectado a una guía de onda rectangular de paredes conductoras WR284 (figura 1). La muestra se colocó en el interior de la guía en un arreglo que permite contar con una onda estacionaria.

En las figuras 2, 3 y 4 se observa la ubicación de la muestra dentro de la guía de onda, sostenida

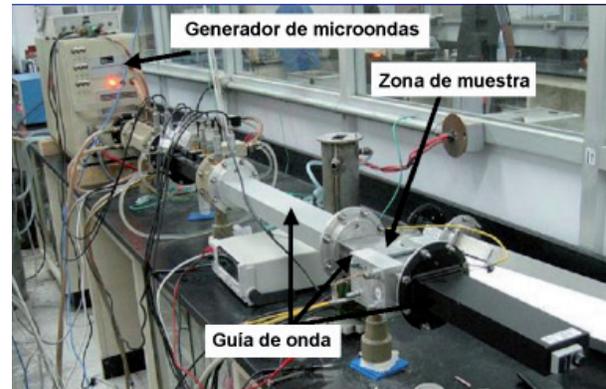


Fig. 1. Generador y guía de onda.

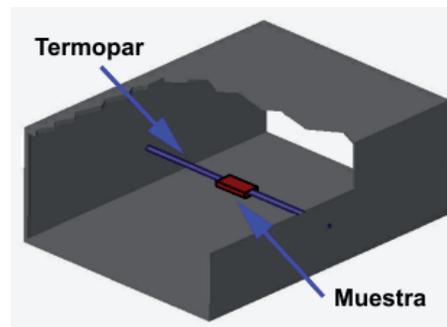


Fig. 2. Esquema de la ubicación de la muestra en la guía de onda.

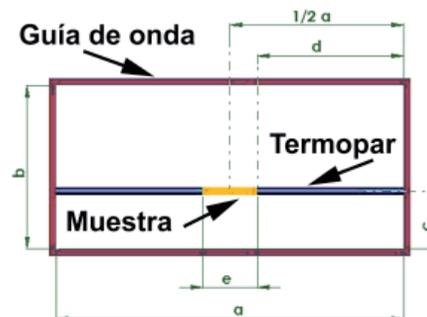


Fig. 3. Ubicación de la muestra y los termopares en el interior de la guía de onda. Las dimensiones son: a = 72.14 (mm); b = 34.04 (mm); c = 12.55 (mm); d = 30.37; e = 11.40 (mm).

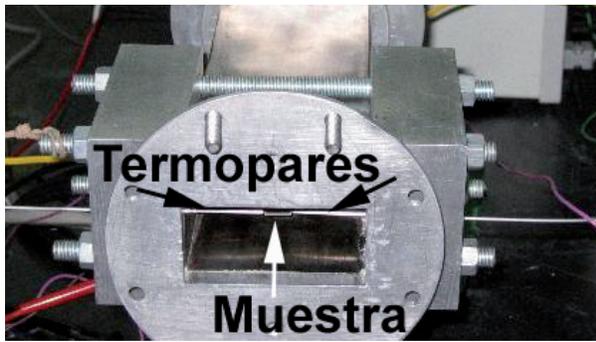


Fig. 4. Muestra y termopares dentro de la guía de onda.

por dos termopares tipo K blindados que además se utilizan como electrodos para medir la resistencia eléctrica formando un circuito con ella. Las caras que estuvieron en contacto con los electrodos fueron recubiertas con una capa de plata de dos micrómetros de espesor. Los termopares tienen el mismo diámetro que el espesor de la muestra (1.6 mm) para evitar discontinuidades que dificulten la discretización del arreglo en el modelo computacional.

Para poder efectuar las mediciones se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:<sup>6</sup>

- Los termopares están cubiertos con una capa de material conductor (acero inoxidable) que impide que la onda penetre en ellos.
- La onda estacionaria no proporciona un campo magnético variable en el termopar.
- Los termopares se posicionaron perpendiculares al campo eléctrico en la guía de onda.
- Los termopares (electrodos) no hicieron contacto con la guía de onda
- Se registraron la temperatura, conductividad eléctrica y potencia utilizada durante las pruebas.

### Solución del modelo

La simulación del proceso de calentamiento de la muestra bajo la acción de un campo de microondas se llevó a cabo por medio del método de análisis de elementos finitos. Este método podría implementarse manualmente, pero los sistemas físicos reales deben discretizarse en miles de elementos para ser representados adecuadamente, lo que hace impráctica la operación manual del método y justifica implementarlo por medio de un programa computacional. Para tal fin se utilizó el paquete de

elemento finito ANSYS<sup>MR</sup>. El proceso de cálculo incluye los pasos que se describen a continuación.

### Definición del dominio geométrico de simulación

La mayor parte de los 2.24 m de guía que recorre la microonda en el arreglo experimental está construida de metales de alta conductividad eléctrica con baja disipación de potencia. Con el objetivo de reducir la carga de cómputo se aprovechó la simetría del sistema considerándose sólo un termopar, la mitad de la muestra y una sección de la guía equivalente a dos longitudes de onda alrededor de ella (figura 5). En razón de que la muestra se ubicó en el centro de la coordenada (a) de la guía, se consideró simetría a lo largo del eje de propagación Z, reduciéndose adicionalmente las necesidades de cómputo.

### Discretización del dominio geométrico de simulación

El dominio geométrico definido se discretizó en una malla de elementos tridimensionales. La malla de elementos debe incluir tanto el volumen de la guía de onda, así como los volúmenes del termopar y de la muestra, considerando dominios electromagnéticos de alta frecuencia y dominios térmicos.

Al generar la malla un modelo de elemento finito debe considerarse que:

- La cantidad de elementos deben minimizar las posibles discrepancias entre la geometría real y la simulada.
- La malla debe ser adecuada para que el modelo arroje resultados físicos consistentes.

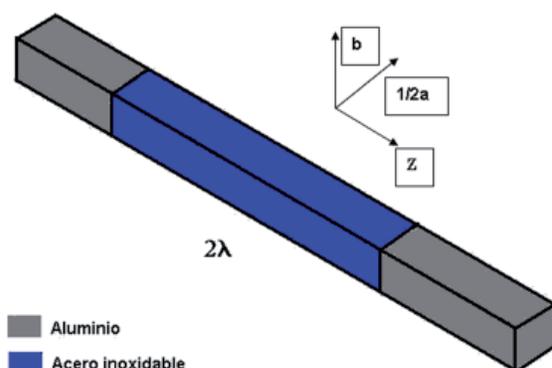


Fig. 5. Sección del arreglo experimental considerado en la simulación: Guía de onda cortada longitudinalmente a la mitad.

- La cantidad de elementos y nodos debe ser la mínima para reducir los tiempos de cómputo.

La mayor dificultad en el mallado fue la gran diferencia en tamaño de la guía de onda y el conjunto muestra-termopar. Este último requirió mallarse con elementos de dimensiones menores a un milímetro para minimizar la discrepancia entre la geometría. También se hizo una transición de elementos relativamente grandes en la guía de onda, a elementos menores a un milímetro en el conjunto muestra-termopar. La estrategia de mallado consistió, primeramente, en la elaboración de dos volúmenes auxiliares que envolvieran al conjunto muestra-termopar, como se puede observar en las figuras 6 y 7.

El volumen de la guía alrededor del volumen auxiliar externo se malló utilizando elementos de 8 mm por lado, posteriormente los elementos alrededor del volumen auxiliar externo se refinaron a 4 mm por lado (figura 7).

El siguiente paso fue mallar el interior del volumen auxiliar externo con elementos de 4 mm, para posteriormente refinar los elementos alrededor del volumen auxiliar interno a dimensiones menores a 1 mm por lado (figura 8).

Finalmente se procedió al mallado de la muestra y del termopar, con elementos de 0.7 mm y 0.8 mm respectivamente, y del volumen auxiliar interno con elementos de 0.8 mm (figuras 9 y 10).

Los elementos de cada componente se presentan en la tabla I.

Al elaborar una malla donde existen elementos de diferente tamaño, debe considerarse que las dimensiones del elemento influyen directamente

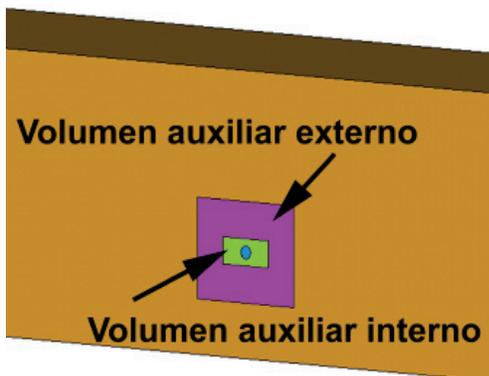


Fig. 6. Volúmenes auxiliares alrededor de la muestra y del termopar.

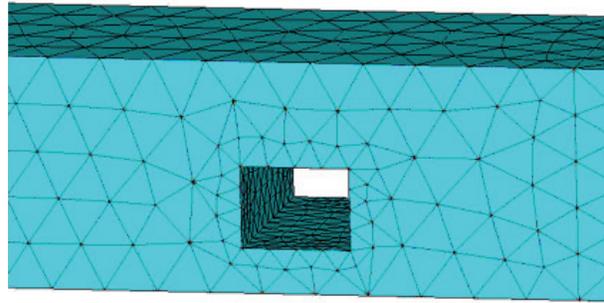


Fig. 7. Mallado de la guía alrededor del volumen auxiliar externo.

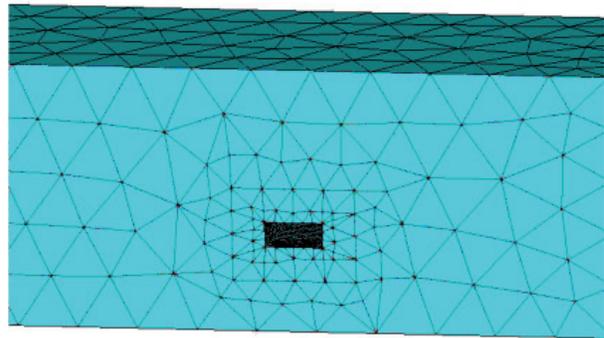


Fig. 8. Mallado del volumen auxiliar interno.

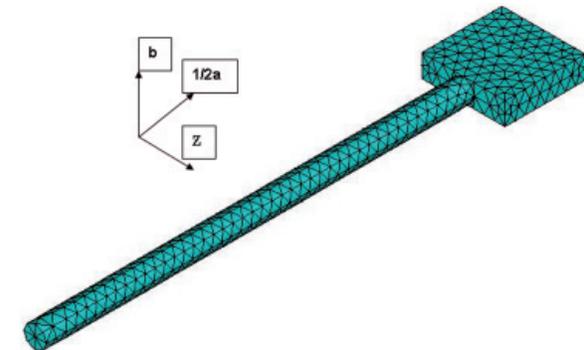


Fig. 9. Malla de la muestra y del termopar.

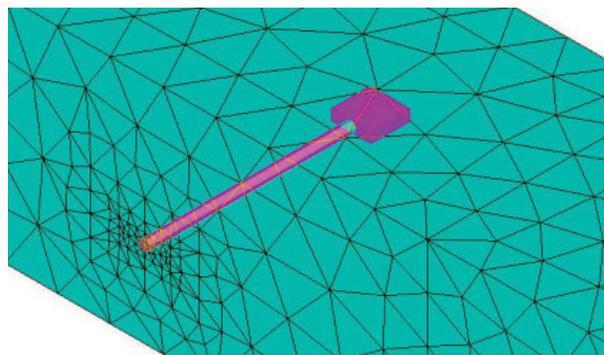


Fig. 10. Ubicación de la muestra de manganita y del termopar en el interior de la malla final del modelo computacional del arreglo experimental.

Tabla I. Número de elementos en cada componente del modelo:

Componente	Número de elementos
Guía de onda	10,616
Volumen auxiliar externo	5,723
Volumen auxiliar interno	5,696
Termopar	1,244
Muestra	1,102
Total de elementos	24,381
Total de nodos	35,745

en la magnitud de los coeficientes de la matriz, por lo que una malla donde existen elementos de dimensiones muy reducidas con relación a los demás, puede generar una matriz global mal condicionada, cuya solución podría ser errónea o físicamente inconsistente.

En el mallado del modelo del arreglo experimental, se utilizaron elementos cuyas dimensiones van desde los 8 mm por lado en la guía de onda, hasta 0.7 a 0.8 mm por lado en la muestra, termopar y volumen auxiliar interno, lo que implica una relación de 1:10 a 1:11 entre los elementos más grandes y los más reducidos. Debido a la considerable diferencia de tamaño en los elementos de la malla del modelo de elemento finito del arreglo experimental, se optó por verificar su precisión y consistencia física mediante la comparación de la distribución de campo eléctrico calculada por este modelo, contra la distribución de campo eléctrico evaluada según la solución analítica de la ecuación de onda del campo eléctrico.

Al determinar la distribución de campo eléctrico en el modelo de elemento finito, se consideraron las propiedades electromagnéticas del aire en los volúmenes del termopar y de la muestra, en razón de que la solución analítica considera vacía a la guía de onda. En ambos casos se utilizó una microonda de 130 Watts a 2.45 GHz.

La distribución de campo eléctrico en el modelo de elemento finito del arreglo experimental resultó prácticamente igual a la distribución de campo eléctrico en este mismo modelo según la solución analítica de la ecuación de onda, con lo cual se comprobó la consistencia física del modelo de elemento finito y la validez del mallado desarrollado.

### Condiciones frontera, propiedades de materiales y parámetros del modelo electromagnético

La sección del arreglo experimental considerada en el modelo incluyendo los volúmenes auxiliares que rodean a la muestra y termopar se modelaron como volúmenes de aire (permitividad,  $\epsilon=1$  y permeabilidad,  $\mu=1$ ).

Las paredes de la guía de onda están constituidas por metales de conductividad eléctrica relativamente alta, donde las microondas prácticamente no penetran, por lo que se consideró conductividad de superficie en las paredes externas de la guía, exceptuando la región de simetría y la zona de excitación, con las propiedades de la tabla II.<sup>7</sup>

En la región de simetría de la guía de onda el ANSYS<sup>MR</sup> considera la llamada condición frontera de Neumann:

$$\int_c \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \tag{1}$$

La cual es adecuada para este caso<sup>8</sup> ya que indica que el flujo neto, tanto de campo eléctrico y magnético a través de la región de simetría es cero.

En la zona de excitación se especificaron las características de la microonda. Sobre la superficie externa del termopar, constituida por una capa de acero inoxidable, y sobre la cara de la muestra de manganita donde se aplicó una capa de plata, se asumieron conductividades de superficie utilizando las propiedades listadas en la tabla III.<sup>7</sup>

Tabla II. Propiedades electromagnéticas en la pared de la guía de onda.

Secciones de la guía	Conductividad (S/m)	Permeabilidad relativa
Aluminio	$3.5 \times 10^{-7}$	1
Acero inoxidable	$0.57 \times 10^{-7}$	2000

Tabla III. Propiedades electromagnéticas en la cubierta del termopar y en las capas de plata en la muestra.

Superficies:	Conductividad (S/m)	Permeabilidad (relativa)
Termopar	$0.57 \times 10^{-7}$	$0.57 \times 10^{-7}$
Capas de plata	$6.1 \times 10^{-7}$	1

En la zona del termopar que sale de la guía y de la muestra de manganita en la región de simetría se aplica la condición frontera de Neumann.

En el resto de las caras de la muestra de manganita se aplicó la condición frontera de Dirichlet:<sup>8</sup>

$$\int_c \frac{\partial u}{\partial n} \neq 0 \tag{2}$$

que en este caso se interpreta como la existencia de un flujo neto de campo eléctrico y magnético.

Las propiedades electromagnéticas del termopar no son necesarias ya que al estar cubierto de acero inoxidable, las microondas no lo penetran. En el caso de la muestra de manganita se utilizó la resistividad medida experimentalmente, y sus propiedades dieléctricas se estimaron por medio del modelo computacional.

**Condiciones frontera y propiedades de materiales en el modelo térmico**

En el caso del modelo térmico, solamente se consideró el dominio geométrico de la muestra y el termopar, debido a que el calor que fluye de estos componentes hacia el aire dentro de la guía de onda es reducido. El modelo considera la ecuación general de difusión de calor, incluyendo un término no homogéneo debido a la generación de calor en la muestra por la acción de la microonda.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + f(x, y, z) \tag{3}$$

El paquete considera la condición frontera de Neumann en la zona de la muestra, en la región de simetría y en la salida del termopar de la guía de onda. En el caso del modelo térmico esto se interpreta como un flujo de calor nulo. En el resto de las fronteras de la muestra y del termopar se aplicó la condición de flujo de calor por convección:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{h}{k} [T - T_\infty] \tag{4}$$

$$T_\infty = 23^\circ\text{C} \quad h = 5 \text{ W/m}^2$$

La temperatura del aire ( $T_\infty$ ) considerada es el promedio de la tomada por los termopares al inicio de los experimentos (muestra a temperatura ambiente) y el valor del coeficiente de convección (h) corresponde a un valor típico para el aire estacionario.

En el caso de las propiedades térmicas de la manganita, se utilizaron las del óxido de manganeso,<sup>9</sup> que es el componente mayoritario. El termopar se consideró enteramente construido de acero y se tomaron las propiedades térmicas de este material tabla IV.<sup>10</sup>

Tabla IV. Propiedades térmicas de la muestra de manganita y del termopar.

Componente	Conductividad (k) (W/s-m-°C)	Calor específico (Cp) (J/kg-°C)	Densidad (ρ) (g/m³)
Manganita	4	628	4.20
Termopar	68	450	7.85

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Pruebas de temperatura - resistividad de la manganita**

La temperatura de la muestra evolucionó de forma similar en todas las pruebas (figura 11), incrementándose relativamente rápido en los primeros cinco minutos, para después llegar a un estado térmico aproximadamente estacionario. La resistividad exhibió un comportamiento inverso al de la temperatura, confirmando su operación de éste como un termistor de coeficiente negativo de temperatura (figura 12). La relación inversa de temperatura – resistividad de la manganita, sigue el mismo camino a diferentes potencias, lo cual indica que no hay envejecimiento en el material (figura 13). A temperaturas mayores a los 100°C se manifiesta de forma considerable el envejecimiento en las

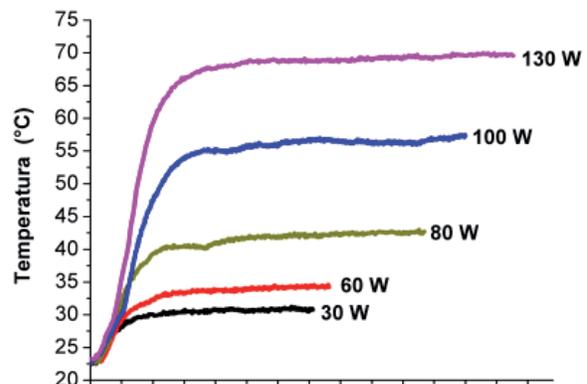


Fig. 11. Evolución de la temperatura de la manganita durante las pruebas de calentamiento a diferentes potencias de la microonda.

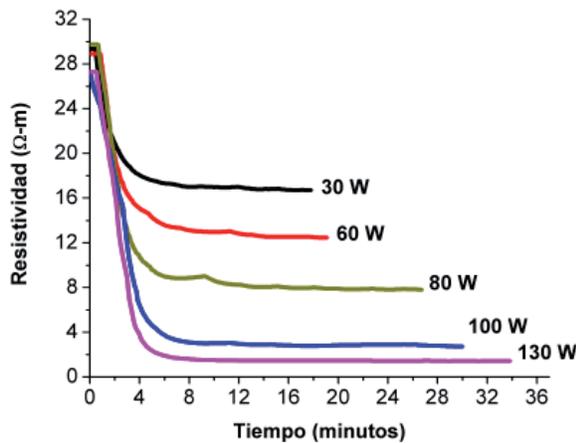


Fig. 12. Evolución de la resistividad de la manganita durante las pruebas de calentamiento a diferentes potencias de la microonda.

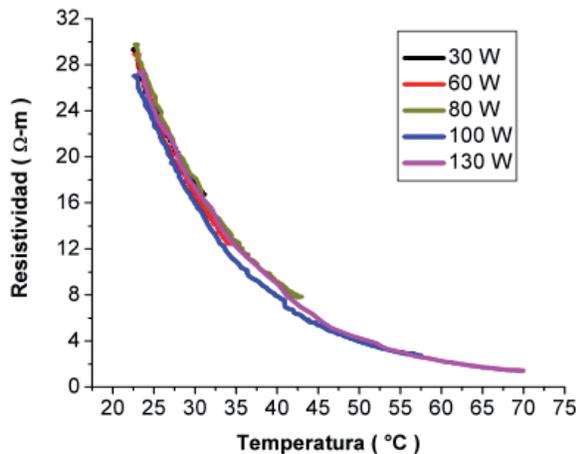


Fig. 13. Relación temperatura-resistividad de la manganita en algunas de pruebas de calentamiento a diferentes potencias de la microonda.

manganitas Ni-Fe,<sup>11</sup> por lo que se busca evitar estas temperaturas. El principal efecto del envejecimiento en el material consiste en que los átomos del material difunden y se produce un cambio en sus propiedades eléctricas. Un envejecimiento de la muestra inutilizaría su uso en pruebas posteriores.

Las microondas se mantuvieron por un periodo que permite que la muestra alcance un estado térmico aproximadamente estacionario. Específicamente, se buscó que la temperatura no cambiase en más de 1°C en 5 minutos. Al alcanzar la muestra el estado térmico pseudoestacionario, se obtuvieron datos de temperatura y resistividad en esta condición, para posteriormente utilizarlos en la estimación de

otras propiedades electromagnéticas por medio de la simulación del calentamiento en el modelo. La alternativa anterior tiene la ventaja de facilitar la estimación de las propiedades electromagnéticas de la manganita, en vista de una menor dependencia de estas propiedades de la temperatura, que en el estado térmico transitorio.

La tabla V resume los datos de temperatura y resistividad al inicio de cada prueba (manganita a temperatura ambiente) y al final de cada prueba (manganita en estado térmico aproximadamente estacionario).

En cada prueba se obtuvieron los datos de temperatura y resistividad de la manganita al alcanzar un estado térmico aproximadamente estacionario, a diferentes valores de potencia, lo cual es equivalente a haber realizado una sola prueba a diferentes potencias, permitiendo que la muestra alcance diferentes estados estacionarios (figura 14).

Las temperaturas listadas corresponden a las temperaturas registradas se comparan con las de un nodo ubicado al centro del termopar, en la zona donde éste se une con la muestra de manganita.

Tabla V. Temperaturas y resistividades al inicio y final de cada prueba de calentamiento.

P.	Pot. (W)	Temp. (°C)	Res. inicial (Ω-m)	Temp.final (°C)	Res. final (Ω-m)
1	30	22.7	29.346	30.3	16.707
2	35	22.6	29.174	33.0	15.283
3	40	22.6	30.037	30.5	17.073
4	45	22.6	29.584	32.3	15.399
5	50	22.8	29.143	33.3	13.705
6	55	22.4	29.687	34.0	12.981
7	60	22.8	28.912	34.9	12.206
8	65	23.1	28.354	35.9	11.312
9	70	22.6	29.870	35.2	12.786
10	75	23.0	29.098	38.7	10.692
11	80	22.6	29.736	42.8	7.768
12	85	22.9	28.602	47.5	5.755
13	100	22.8	27.001	56.5	2.883
14	110	22.6	27.796	61.3	2.190
15	120	22.8	27.766	65.3	1.733
16	130	23.2	27.294	69.5	1.421

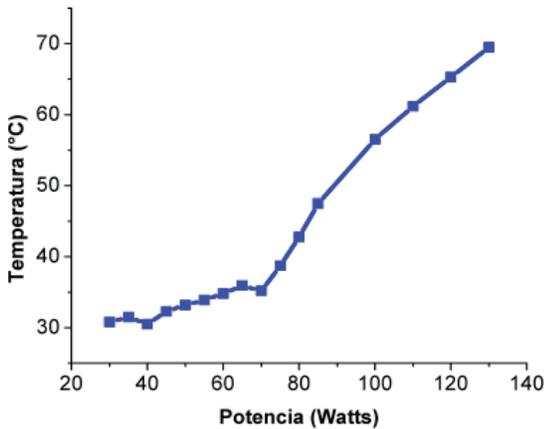


Fig. 14. Gráfica de potencia-temperatura en los diferentes estados térmicos estacionarios alcanzados durante las pruebas de calentamiento.

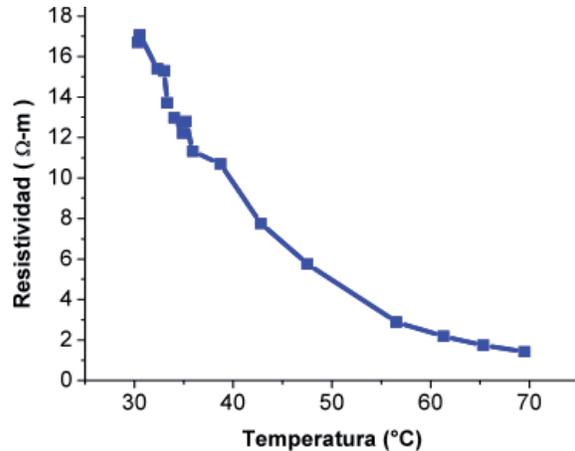


Fig. 15. Gráfica de temperatura-resistividad en los diferentes estados térmicos estacionarios alcanzados durante las pruebas de calentamiento.

### Modelo de calentamiento resistivo - dieléctrico para la manganita

La gráfica de temperatura – resistividad (figura 15) muestra que la medición de temperatura a bajas potencias se dificulta debido a una mayor influencia de las condiciones ambientales.

Para dar explicación al calentamiento de la manganita al someterse a la acción de un campo de microondas, y en vista de que se trata de un semiconductor, se propuso un modelo de calentamiento en el que la disipación de potencia de microondas en este material es función a la vez de efectos resistivos y dieléctricos.

El modelo de calentamiento resistivo-dieléctrico de la manganita mediante microondas sigue las ecuaciones siguientes:

Propagación del campo eléctrico:

$$\nabla^2 E = -\omega^2 \mu \cdot \epsilon \cdot E \quad (5)$$

Distribución de campo eléctrico:

$$E = f(\mu, \epsilon, x, y, z) \quad (6)$$

Transferencia de calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + f(x, y, z) \quad (7)$$

Distribución de temperatura:

$$T = f(\alpha, x, y, z, t) \quad (8)$$

Disipación de potencia:

$$P = \frac{1}{2} \int_V (\sigma + \omega \cdot \epsilon'' ) E \cdot E^* \cdot dv \quad (9)$$

De los experimentos de calentamiento de la manganita se conocen la resistividad en función de la temperatura:  $\rho = f(T)$ , la temperatura en función del tiempo:  $T = f(t)$  y la frecuencia del campo eléctrico:  $\omega$ , los cuales son aplicables al modelo de calentamiento resistivo-dieléctrico.

La permeabilidad de la manganita se considera igual a la del vacío ( $\mu=1$ ) y sus propiedades térmicas ( $\alpha$ ) también son conocidas, por lo cual quedan dos parámetros desconocidos en el modelo de calentamiento resistivo-dieléctrico:

- 1.- La permitividad eléctrica:  $\epsilon'$
- 2.- La permitividad eléctrica compleja:  $\epsilon''$

La disipación de potencia tanto por efectos resistivos como dieléctricos depende de la permitividad eléctrica. En cuanto a la permitividad eléctrica compleja, o factor de pérdida, ésta solamente influye en la disipación de potencia por efectos dieléctricos en la manganita.

La existencia de dos parámetros desconocidos para el modelo de calentamiento resistivo-dieléctrico, así como la falta de alguna condición que los relacione, dificulta la validación del modelo. Sin embargo, la certeza de que el planteamiento matemático incluye elementos que permiten hacer una estimación de esos factores en base a los datos experimentales.

### Estimación de la permitividad eléctrica y factor de pérdida de la manganita

Para lograr una estimación de los órdenes de magnitud de los dos parámetros desconocidos del modelo de calentamiento resistivo–dieléctrico, es necesario considerar sólo una de las incógnitas a la vez. De los experimentos de calentamiento se tienen datos de resistividad, con lo cual es posible resolver el modelo de calentamiento propuesto considerando solamente la parte resistiva, quedando como única incógnita la permitividad eléctrica. Se ajusta este valor hasta minimizar las diferencias entre las temperaturas experimental y predicha por el modelo.

Una vez estimado el orden de la permitividad eléctrica se resuelve nuevamente el modelo de calentamiento, pero considerando sólo la parte dieléctrica, con lo cual queda como única incógnita el factor de pérdida, el cual se ajusta hasta minimizar el error entre las temperaturas arrojadas por el modelo y las experimentales. Los valores de permitividad de la manganita que explicarían un calentamiento puramente resistivo, en estado térmico aproximadamente estacionario, se muestran en la tabla VI.

Las figuras 16 a 19 presentan las distribuciones de campo eléctrico y temperatura en el sistema en dos condiciones durante el proceso de estimación de la permitividad.

La permitividad se estimó a diferentes temperaturas, por lo que pudo obtenerse una curva de temperatura-permitividad de la figura 20.

La forma de la curva de temperatura-permitividad y sus órdenes de magnitud corresponden con los datos reportados para otros materiales de este tipo.<sup>12</sup> La dispersión en los valores iniciales se debe a los errores en la medición de temperatura a bajas potencias.

Durante el análisis de la permitividad se observó que al aumentar el valor, la magnitud del campo eléctrico y la absorción de potencia disminuían y en consecuencia, las temperaturas calculadas en el modelo resultarían inferiores a las temperaturas experimentales, de tal manera que para elevar la temperatura, sería necesario que hubiera pérdidas dieléctricas en el material. Con las temperaturas experimentales y este comportamiento se puede proponer que la curva de permitividad eléctrica obtenida bajo la suposición de un calentamiento

Tabla VII. Resultados de la acotación del factor de pérdida de la muestra.

Datos experimentales		Datos del modelo dieléctrico			
Pot. (W)	Temp. (°C)	Per. (ε)	tan (δ)	Factor (ε'')	Temp. (°C)
30	30.8	6	0.070	0.42	29.8
35	31.5	6	0.085	0.51	32.6
40	30.5	7	0.065	0.46	30.5
45	32.3	7	0.075	0.53	32.8
50	33.2	7.5	0.075	0.56	33.3
55	33.9	8	0.075	0.60	33.8
60	34.8	8.5	0.075	0.64	34.8
65	35.9	8.5	0.075	0.64	35.2
70	35.2	8.75	0.075	0.66	35.9
75	38.7	8.75	0.085	0.74	38.5
80	42.8	9	0.105	0.95	43.0
85	47.5	10	0.135	1.35	48.01
100	56.5	13	0.195	2.54	57.0
110	61.2	15	0.220	3.30	60.2
120	65.3	16.5	0.250	4.13	65.0
130	69.5	18.5	0.290	5.37	70.0

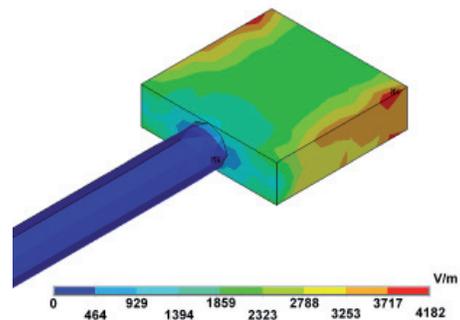


Fig. 16. Distribución de campo eléctrico en la muestra y termopar a una potencia de 30 W.

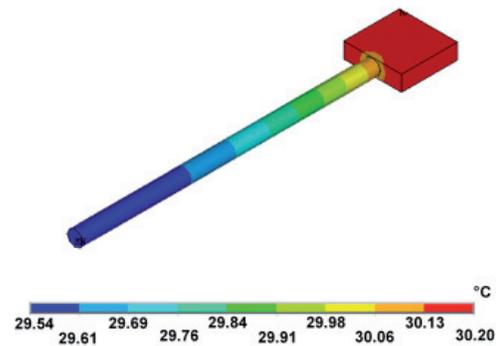


Fig. 17. Distribución de la temperatura en la muestra y termopar a una potencia de 30 W.

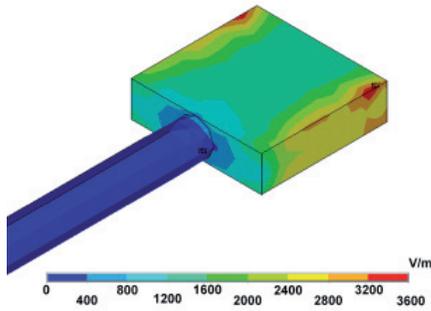


Fig. 18. Distribución de campo eléctrico en la muestra y termopar a una potencia de 130 W.

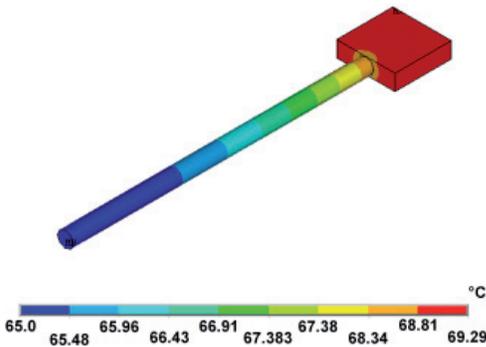


Fig. 19. Distribución de temperatura en la muestra y termopar a una potencia de 130 W.

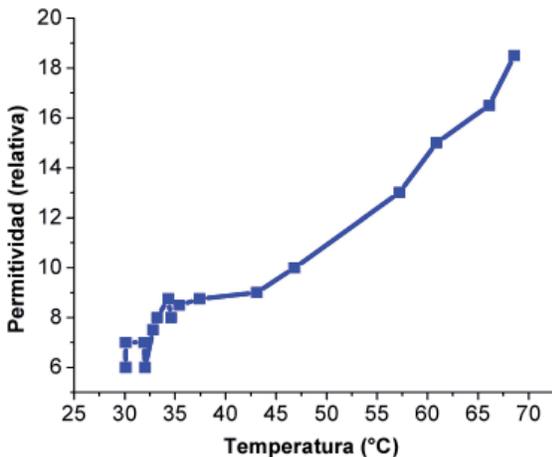


Fig. 20. Curva estimada de temperatura - permitividad de la manganita.

puramente resistivo, puede considerarse una curva de valores mínimos de permitividad de la manganita.

A continuación se muestra la línea de razonamiento seguida.

Si se considera en el modelo que  $\epsilon_{\text{modelo}} > \epsilon_{\text{estimada}}$  el campo eléctrico es:

$$E_y = -2 \cdot E_x \cdot \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cdot \sin(\beta_{10} z) \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$(10)$$

la potencia absorbida es:

$$\beta_{10} = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - \pi^2 / a^2} \quad (11)$$

entonces la función de la temperatura es:

$$P = \frac{1}{2} \int_V \sigma \cdot E \cdot E^* \cdot dv \quad (12)$$

Por lo cual  $T_{\text{modelo}} < T_{\text{experimental}}$

$$T = f(P, \alpha, x, y, z, t) \quad (13)$$

La diferencia de la temperatura del modelo con la experimental podría explicarse por pérdidas dieléctricas en la manganita y no es aceptable que  $T_{\text{modelo}} > T_{\text{experimental}}$

Por otro lado si se considera que en el modelo  $\epsilon_{\text{modelo}} < \epsilon_{\text{estimada}}$  se concluye que la  $\epsilon_{\text{estimada}}$  corresponde a la  $\epsilon_{\text{mínima}}$  de la manganita.

Una vez que se estiman los valores mínimos de permitividad de la manganita considerando exclusivamente el calentamiento resistivo, se siguió un procedimiento análogo para estimar los valores del factor de pérdida de este material. En este caso se consideró solamente la parte dieléctrica del modelo de calentamiento resistivo – dieléctrico, obteniéndose los valores del factor de pérdida y  $\tan(\delta)$  (tabla VII).

Las figuras 21 a 24 presentan las distribuciones de campo eléctrico y temperatura en el termopar y la muestra de algunas de las simulaciones para la estimación del factor de pérdida.

Al estimar la tangente de pérdida y el factor de pérdida a varias temperaturas, se obtuvieron relaciones temperatura– $\tan(\delta)$  de pérdida y temperatura-factor de pérdida (figuras 25 y 26). Al igual que en el caso

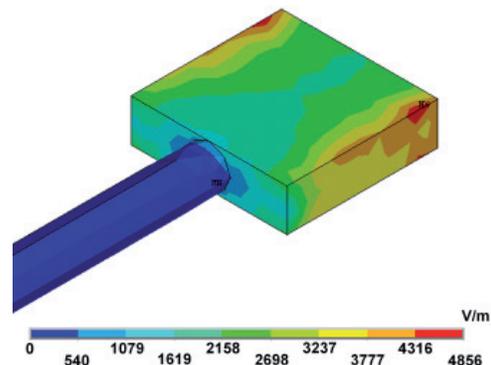


Fig. 21. Distribución de campo eléctrico en la muestra y termopar a una potencia de 60 W.

Tabla VI. Resultados de la estimación de la permitividad de la manganita.

Datos experimentales			Datos del modelo resistivo	
Pot. (W)	Res. ( $\Omega$ -m)	Temp. ( $^{\circ}$ C)	Per. ( $\epsilon$ )	Temp. ( $^{\circ}$ C)
30	16.707	30.3	6	30.1
35	15.283	33.0	6	32.0
40	17.073	30.5	7	30.1
45	15.399	32.3	7	31.9
50	13.705	33.3	7.5	32.8
55	12.981	34.0	8	33.2
60	12.206	34.9	8.0	34.6
65	11.312	35.9	8.5	35.4
70	12.786	35.2	8.75	34.3
75	10.692	38.7	8.75	37.4
80	7.768	42.8	9	43.1
85	5.755	47.5	10	46.8
100	2.883	56.5	13	57.2
110	2.190	61.3	15	60.9
120	1.733	65.3	16.5	66.1
130	1.421	69.5	18.5	68.6

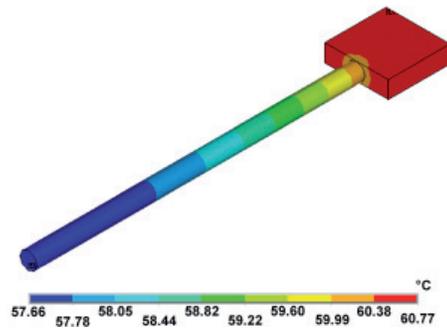


Fig. 24. Distribución de temperatura en la muestra y termpoar a una potencia de 110 W.

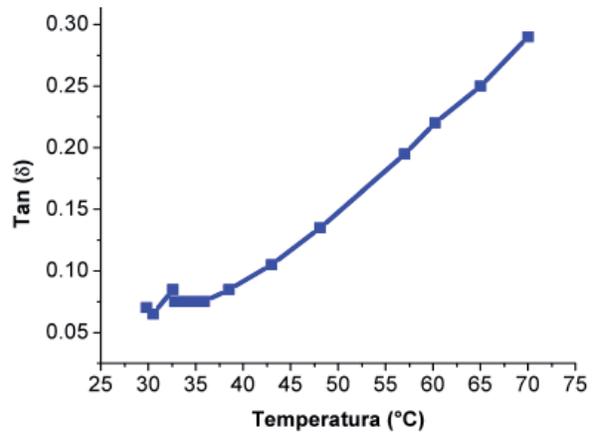


Fig. 25. Curva estimada de temperatura-tan( $\delta$ ) de la manganita.

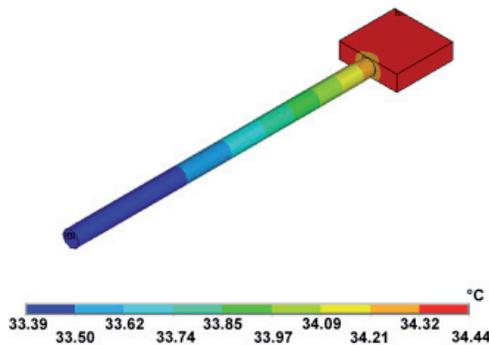


Fig. 22. Distribución de temperatura en la muestra y termpoar a una potencia de 60 W.

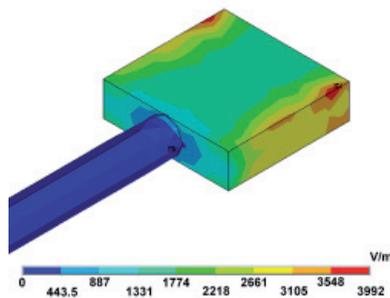


Fig. 23. Distribución de campo eléctrico en la muestra y termpoar a una potencia de 110 W.

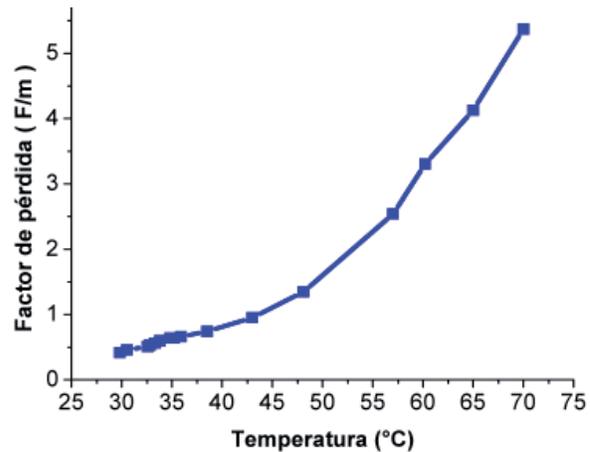


Fig. 26. Curva estimada de temperatura-factor de pérdida de la manganita.

de la curva de temperatura–permitividad, la curvas de temperatura–tan( $\delta$ ) y temperatura–factor de pérdida que se estimaron, siguen un comportamiento parecido y se encuentran dentro de los órdenes de magnitud respecto de la misma información reportada para otros materiales de este tipo.<sup>12</sup>

## CONCLUSIÓN

En este trabajo se logró desarrollar y confirmar la operatividad de un modelo de elemento finito capaz de simular el proceso de calentamiento de un material semiconductor, en este caso una manganita base níquel, mediante microondas, en estado térmico estacionario.

Las curvas de permitividad, factor de pérdida y  $\tan(\delta)$  estimadas para la manganita en función de la temperatura, presentan una evolución y magnitudes razonables y tienen similitud con las curvas conocidas para otros materiales de este tipo.

Se confirma que el calentamiento de este material proviene de al menos estos dos mecanismos propuestos.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico otorgado por el CONACYT (U38672), por la Universidad Autónoma de Nuevo León (PAICYT CA769-02) y por ECOS-ANUIES (M2-P01) para la elaboración de este trabajo.

## REFERENCIAS

1. Aguilar J, González M, Gómez I., Microwaves as an energy source for producing magnesia-alumina spinel. *Journal of the Microwave Power and Electromagnetic Energy* 1997; 32(2):347-56.
2. Aguilar J, Gómez I., Microwave processing of calcium circonate from CaO and ZrO<sub>2</sub>. *Advances in Technology and Materials Processing Journal* 2003; 5(2):92-97.
3. Aguilar J, Rodríguez J, Hinojosa M. Production of  $\beta$ -SiC with microwaves as an energy source. *Journal*

- of the Microwave Power and Electromagnetic Energy, IMPI 2001; 36(3):169-77.
4. Valdez Nava Z. Sinterización de manganitas Ni-Fe empleando microondas como fuente de energía. Universidad Autónoma de Nuevo León. Tesis doctoral, 2005.
5. Valdez Z, Guillemet S, Aguilar J, Durand B, Hinojosa M. Conductivity measurements of a spinel manganite ceramic in a microwave field. 9th International Conference on Microwave and High Frequency Heating. 2003.
6. Valdez Z, Guillemet S, Aguilar J, Durand B, Hinojosa M. Conductivity measurements of a spinel manganite ceramic in a microwave field. 9th International Conference on Microwave and High Frequency Heating. 2003.
7. Carter R.G. Electromagnetismo para Ingeniería Electrónica. Estados Unidos: Adison-Wesley Iberoamericana, 1993.
8. Stanley J.F. Partial Differential Equations for Scientifics and Engineers. New York: Dover Publications, 1993.
9. NASA. Material Properties Database: Web Edition Version 4, <http://ttsx.arc.nasa.gov/> visita marzo 2005.
10. López Cruz P. Análisis del comportamiento electro-térmico de alúmina expuesta a microondas UANL-FIME, 2003.
11. Dmitry A. Kukuruznyak, Jerome G. Moyer, Fumio S. Ohuchi. Improved Aging Characteristics of NTC Thermistor Thin Films Fabricated by a Hybrid Sol-Gel-MOD. *Process Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89 (1): 189-192
12. Von Hippel A. Dielectrics and Waves. New York: Wiley, 1954.