

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO ELECTRO-TERMICO
DE ALUMINA EXPUESTA A MICROONDAS

POR

ING. PEDRO LOPEZ CRUZ

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

CD. UNIVERSITARIA

DICIEMBRE DE 2003

TM

Z5853

.M2

FIME

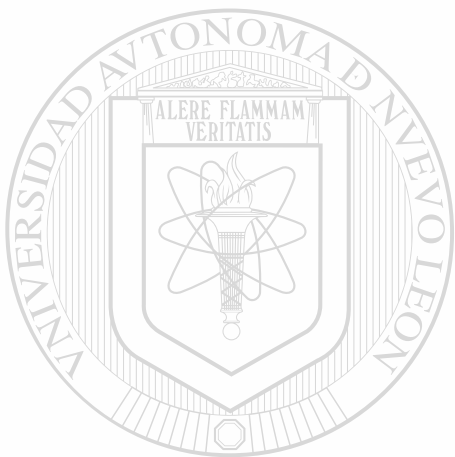
2003

.L66

2003

ANVAALLESSES DEBIL COMISSO ORTA AJALLESVIO
WWW.COMISSO-ORTA.AJALLESVIO.COMISSO

DEB AJALLESVIO DEBIL COMISSO ORTA AJALLESVIO

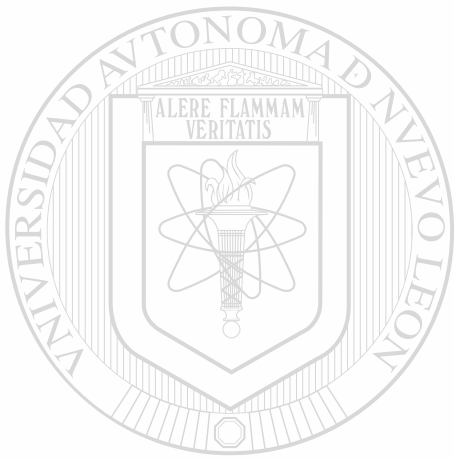


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

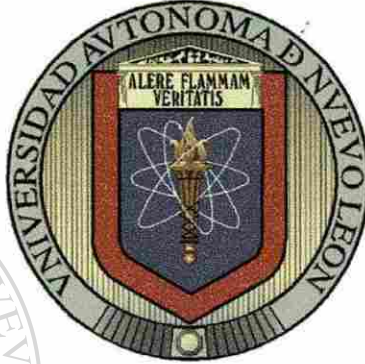
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

m

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ELECTRO-TÉRMICO DE ALÚMINA EXPUESTA A MICROONDAS

POR

ING. PEDRO LÓPEZ CRUZ

TESIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

CIUDAD UNIVERSITARIA

DICIEMBRE DE 2003

TH

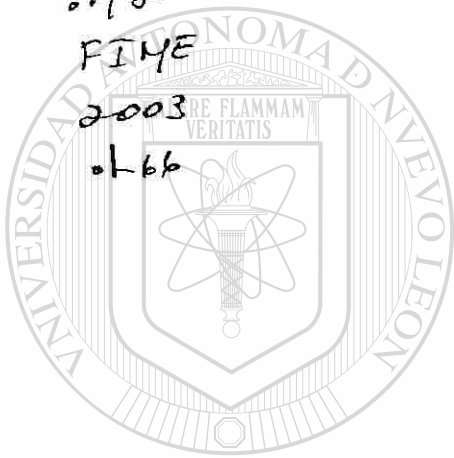
Z 5853

0.42

FIYE

2003

0.66



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

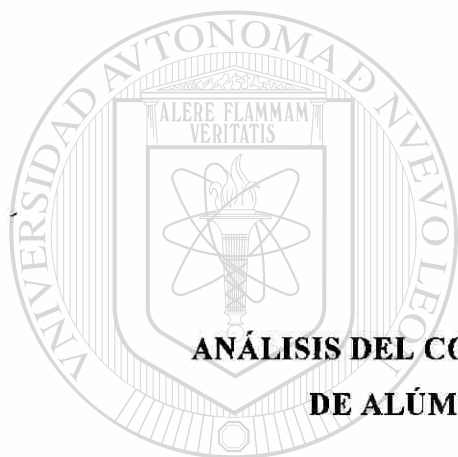


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ELECTRO-TÉRMICO
DE ALÚMINA EXPUESTA A MICROONDAS**

POR

ING. PEDRO LÓPEZ CRUZ

TESIS

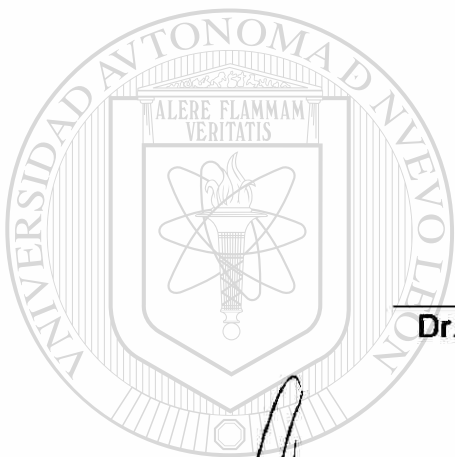
**EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

CIUDAD UNIVERSITARIA

DICIEMBRE DE 2003

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Análisis del comportamiento electro-térmico de alúmina expuesta a microondas" realizada por el Ing. Pedro López Cruz, con matrícula 690364 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.



El comité de tesis

Dr. Juan Antonio Aguilar Garib
Asesor

Dr. Carlos Alberto Guerrero Salazar
Revisor

Dr. Rubén Morones Ibarra
Revisor

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Vo. Bo.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
División de estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. Diciembre de 2003

DEDICATORIA

A MI MADRE, POR EL GRAN APOYO QUE ME HA BRINDADO A LO LARGO DE TODA MI VIDA.

A MIS HERMANOS: SANDRA MÓNICA Y CARLOS, POR TODOS LOS MOMENTOS QUE HEMOS VIVIDO JUNTOS.

Y MUY ESPECIALMENTE, A MI ESPOSA SELENE BERENICE POR SU INCANSABLE E INCONDICIONAL APOYO EN MI VIDA PROFESIONAL Y PARA LA ELABORACIÓN DE ESTA TESIS. ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico que me brindó para realizar mis estudios de maestría.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Al Dr. Juan Antonio Aguilar Garib por su gran apoyo y orientación brindada a esta investigación.

A los Doctores Carlos Guerrero Salazar y Rubén Morones Ibarra por su apoyo en la revisión de este trabajo.

A todo el personal académico del DIMAT.

A mi compañero y amigo Dr. Octavio Cobarruvias por sus consejos y apoyo.

A todos los compañeros del departamento de Dinámica: Villalobos, Lara, Carroía, Cuahútemoc, Ing. Cupich, Ing. Robledo, Ing. Ramírez, Ing. Elizondo, Ing. Campos, Dante, Ing. Lilia, Miritza, Diego y Pablo, por su gran compañerismo.

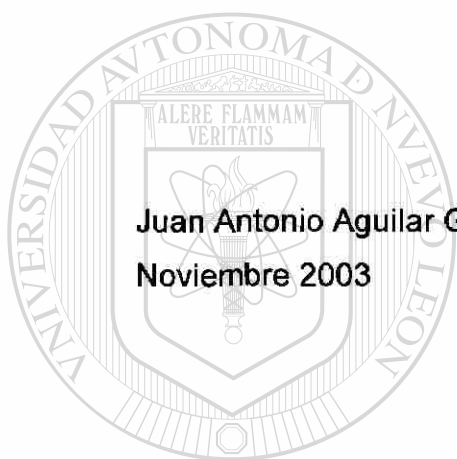
A mi esposa Selene Berenice Salazar, por todo el apoyo y satisfacciones que me ha brindado en estos cinco años de matrimonio.

A toda mi familia en Cuernavaca, Morelos, que siempre me apoyó.

PRÓLOGO

Aparece cada vez con mayor frecuencia en los programas de estudio relacionados con métodos de calentamiento en hornos, el uso de microondas como fuente de energía. La aplicación más conocida es el horno de cocina, pero en la actualidad se busca utilizarlo en la industria cerámica y de los polímeros. En el caso del calentamiento mediante gases de combustión el conocimiento de la temperatura de flama y las ecuaciones básicas de transferencia de calor son suficientes para determinar perfiles térmicos en los materiales y diseñar cédulas de procesamiento. Sin embargo el calentamiento mediante microondas sigue un mecanismo diferente en el que las propiedades del material afectan significativamente el patrón del campo electromagnético, responsable del calentamiento, dentro de la cavidad y de la muestra en sí. La dificultad para describir esta distribución hace que se caiga en el riesgo de la sobre - simplificación ya que existe la inercia de aceptar como cierta la suposición de que el calentamiento es volumétrico y uniforme. Por otra parte la variable más significativa que se maneja en cualquier sistema de calentamiento es la temperatura y en este caso es mucho más difícil de medir con certeza, ya que cualquier elemento que se introduzca en el sistema afecta también la distribución del campo. Aunque las ecuaciones que rigen el comportamiento del campo electromagnético y la transferencia de calor son conocidas, determinar la ganancia de calor no es una tarea sencilla, especialmente porque los parámetros están interrelacionados. Es común recurrir a estimaciones obtenidas experimentalmente, pero se debe recordar que en muchas ocasiones son válidas únicamente para el caso particular estudiado y la extrapolación a otros casos no es directa. Por otra parte las computadoras están ahora al alcance de todos y las herramientas numéricas son accesibles a través de un sin número de paquetes comerciales. Sin embargo se corre el riesgo de abusar de ellos al desconocer los fenómenos que se están modelando o simplificar al grado de que los datos que se proporcionan al paquete no corresponden al

fenómeno que se desea describir, por lo que se obtienen resultados erróneos. Una manera de evitar esto es mediante la validación de un modelo y luego una predicción que constituya una demostración, la cual permitirá extrapolar a otras condiciones. En este trabajo tendremos la oportunidad de ver una de tales demostraciones, y observar como las ecuaciones que rigen un fenómeno, la experimentación, y el cómputo son, todos ellos, elementos de un modelo. Y es precisamente esta comprensión la que ayuda a que los mitos se derrumben al dar la oportunidad de que sea la interpretación, y no la improvisación, la que diga la última palabra.



Juan Antonio Aguilar Garib

Noviembre 2003

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
PRÓLOGO	iii
INDICE	v
RESUMEN	1
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO II. INGENIERÍA DE MICROONDAS	7
2.1. Las Microondas	7
2.2. Guías de onda	9
2.3. Guía de onda WR284 y el modo TE_{10}	15
CAPÍTULO III. CALENTAMIENTO DE MATERIALES	17
3.1 Efecto de las microondas en los materiales	17
3.2 Modelo matemático de calentamiento de materiales con microondas	19
CAPÍTULO IV. MÉTODO DE ELEMENTO FINITO	25
4.1 Introducción.	25
4.2 Métodos numéricos	26
4.3 Pasos básicos en el método de elemento finito	27
4.4 Método de elemento finito en problemas electromagnéticos	29
4.5 Método de elemento finito en transferencia de calor	31

CAPÍTULO V. DESARROLLO Y EXPERIMENTACIÓN	33
5.1 Arreglo experimental	33
5.2 Modelo de elemento finito	39
5.2.1 Modelo electromagnético	39
5.2.2 Modelo Térmico	42
5.3 Análisis acoplado	44
CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
6.1 Modelo físico	46
6.1.1 Perfil térmico	46
6.1.2 Obtención de propiedades dieléctricas	49
6.2 Modelo de elemento finito	51
6.2.1 Guía vacía	51
6.2.2 Campo eléctrico en la guía con muestra y termopares	53
6.2.3 Potencia absorbida	59
6.2.4 Temperaturas alcanzadas	61
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
<hr/>	
BIBLIOGRAFÍA	72
LISTA DE FIGURAS	75
LISTA DE TABLAS	77
ANEXO I. FUNCIONES DE FORMA	78
ANEXO II. CÁLCULOS	80
ANEXO III. PROGRAMAS DE ELEMENTO FINITO	84
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	109

RESUMEN

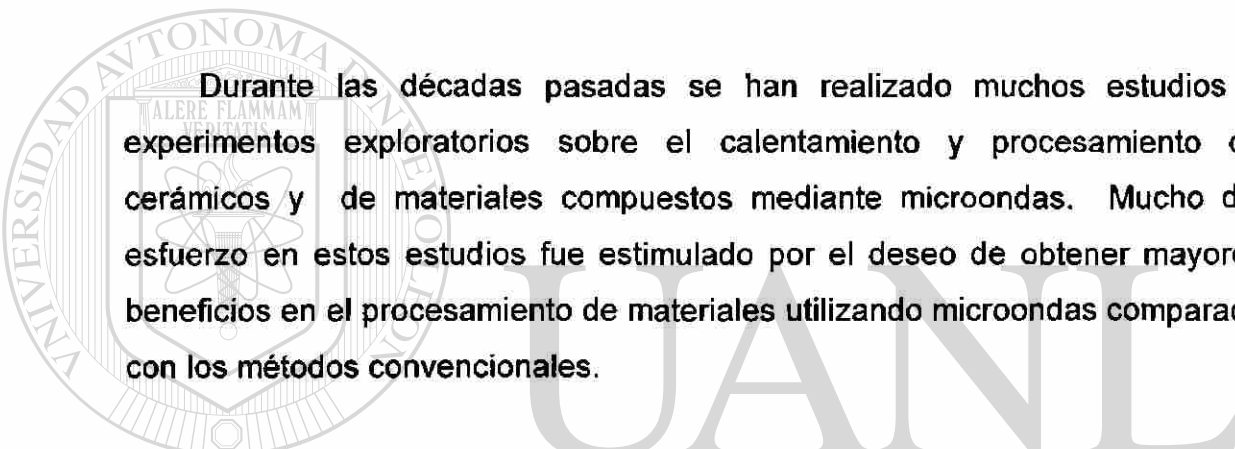
El calentamiento de materiales mediante microondas aparece durante los años 60's y 70's, y desde entonces se han hecho numerosos esfuerzos por explorar nuevas formas de procesamiento utilizando este método. Sin embargo, la caracterización de la forma de calentamiento de los materiales debida al campo eléctrico se ha llevado a cabo utilizando análisis experimentales, donde la medición de la temperatura se realiza con un elemento físico, el cuál se piensa que puede interferir en las mediciones. Esta incertidumbre dificulta aun más la descripción de la distribución del campo eléctrico dentro de los materiales durante el proceso de calentamiento.

El presente trabajo se llevó a cabo con la finalidad de analizar el comportamiento de los materiales expuestos a microondas de acuerdo a sus propiedades dieléctricas. Asimismo, se evaluó la magnitud y distribución del campo eléctrico dentro de ellos considerando la presencia de un termopar blindado. Para lograr esto, se hizo una comparación entre un análisis experimental y uno realizado numéricamente utilizando el método de elemento finito. El material que se utilizó fue alúmina colocada dentro de un crisol del mismo material y expuestos a microondas de 2.45 GHz dentro de una guía de onda.

Se analizaron los perfiles de calentamiento de la muestra obtenidos experimentalmente a diferentes potencias y a partir de esto, se estimaron las propiedades dieléctricas del material. Con esta información, se validó un análisis utilizando elemento finito en el cual se pudo determinar la distribución del campo eléctrico dentro de la muestra y determinar su perfil térmico en modo numérico para compararlo con el experimental. Se corroboró que para una onda estacionaria si se coloca perpendicularmente el termopar dentro de la guía no se perturba el campo eléctrico más allá del error experimental.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN



Durante las décadas pasadas se han realizado muchos estudios y experimentos exploratorios sobre el calentamiento y procesamiento de cerámicos y de materiales compuestos mediante microondas. Mucho del esfuerzo en estos estudios fue estimulado por el deseo de obtener mayores beneficios en el procesamiento de materiales utilizando microondas comparado con los métodos convencionales.

Desde el primer Simposio Internacional de Procesamiento de Materiales con Microondas [1], el interés por este campo ha crecido notoriamente. Esta situación sigue vigente, y se puede apreciar en la variedad de técnicas orientadas a buscar y aprovechar los beneficios de utilizar la energía de microondas [1]. Incluso, trabajos recientes sobre procesamiento de materiales con microondas [2] hacen referencia a los artículos presentados en dicho simposio.

La aplicación de las microondas al procesado de cerámicos aparece durante los años 60's y 70's, orientada únicamente al secado de los mismos. Así mismo, se reportan trabajos de calentamiento de cerámicos a mediados de los 80's; en los 90's se han dedicado numerosos esfuerzos para explorar nuevas rutas de procesamiento de acuerdo a la aplicación de los materiales.

Conforme las exigencias de desempeño aumentan, se deben diseñar nuevas vías de producción para los nuevos materiales que las cumplan y, para el caso de los procesos que se llevan a cabo a alta temperatura, se traduce en la búsqueda del incremento de la eficiencia y control del calentamiento [3].

Algunas de las hipótesis por las cuales ha crecido el interés de usar microondas para el procesamiento de cerámicos son:

- .
* Rapidez interna de calentamiento.
- * Calentamiento selectivo.
- * Capacidades de procesamiento no posibles por métodos convencionales.
- * Ahorro en costos (tiempo y energía).

Se puede decir que las primeras dos hipótesis han sido probadas de modo general en los estudios que se han realizado, mientras que se busca que como consecuencia de éstas, las restantes también puedan ser probadas. En algunos experimentos se muestra que la absorción volumétrica de la energía de microondas hace posible el sinterizado de cerámicos mucho más rápido que de manera convencional. Esto permite producir un cerámico de grano fino con microestructura más uniforme, lo que le confiere que sea un material más fuerte y menos quebradizo que los cerámicos obtenidos por métodos convencionales. Además de que un calentamiento selectivo en microondas puede ser benéfico para producir nuevos materiales cerámicos compuestos que conserven su alta dureza a altas temperaturas y bajo condiciones corrosivas [4].

Un material cerámico es un compuesto o solución que contiene elementos tanto metálicos como no metálicos y tiene una gran variedad de aplicaciones. Entre los materiales cerámicos que se utilizan ampliamente se encuentra el espinel magnesia-alúmina, el cuál es un cerámico que ha ganado gran interés

en los últimos años en la industria de refractarios debido a sus propiedades físicas y estructurales.

En Europa y los Estados Unidos, el uso del espinel como material refractario fue muy escaso, y no fue hasta finales de los años 70`s que hubo un crecimiento en el interés por utilizar este producto como material refractario, primero para la industria del cemento y más recientemente para las industrias del vidrio y del acero. En Japón, la industria del cemento empezó a utilizar ladrillos de magnesia-espinel desde 1976 y desde 1980 comenzó a producir espinel sinterizado de alta pureza.

Tradicionalmente, el espinel magnesia-alúmina se produce utilizando la energía de los combustibles fósiles o bien mediante el uso de hornos eléctricos. Sin embargo, recientemente ha habido un creciente interés en utilizar microondas como fuente de calentamiento para procesar distintos materiales debido a las ventajas antes mencionadas sobre el calentamiento convencional, como la rapidez de calentamiento, la reducción de costos y el calentamiento más uniforme [5].

Otro aspecto muy importante tiene que ver con la caracterización de la forma de calentamiento del material debido al campo eléctrico.

Para este aspecto se han desarrollado análisis experimentales [6] para poder describir los parámetros asociados a este fenómeno tales como: distribución y magnitud del campo eléctrico en el material y potencia absorbida.

Debido a las temperaturas alcanzadas, se requiere de un instrumento de medición que sea capaz de medir desde temperatura ambiente hasta temperaturas del orden de los 1500°C. Para este aspecto se pueden utilizar termopares o pirómetros, este último de poca aplicación debido a que el rango

de temperaturas está limitado y solo puede medir temperatura superficial. El instrumento de medición más utilizado es el termopar, el cual tiene un mayor rango de medición de temperaturas, se puede colocar dentro de la muestra y darnos información de la temperatura dentro de la misma. Sin embargo, se piensa que puede afectar las mediciones debido a su interacción con las ondas electromagnéticas.

Para poder describir el fenómeno, también se ha desarrollado modelos analíticos, generalmente sustentados en métodos numéricos, ya sea mediante Diferencias Finitas o Elemento finito.

Existen trabajos en los cuales se pretende modelar este fenómeno, sin embargo según las hipótesis que se aceptan tienen sus alcances y limitaciones.

La mayoría de los casos suponen que las propiedades dieléctricas del material (ϵ'') son constantes en el rango de temperaturas analizado [7,8].

En otros casos, suponen que la magnitud del campo eléctrico es uniforme a través de la muestra y por lo tanto también la generación de calor dentro de la misma. Es decir, no modelan la distribución del campo eléctrico dentro de la muestra para poder determinar la generación de calor en cada punto de la misma [9,10].

Para el análisis térmico, se puede tener en cuenta las propiedades del material como función de la temperatura [9]. En algunos casos se modela solo la conducción y convección y otros análisis más complejos incluyen además la radiación.

Sin embargo, no es sencillo encontrar modelos en los cuales se incluyen todos estos aspectos simultáneamente, es decir, modelación del campo eléctrico dentro del material tomando en cuenta las propiedades del mismo dependientes de la temperatura y al mismo tiempo acoplarlo al modelo térmico completo.

Además de lo anterior existe un aspecto muy importante que no se ha estudiado completamente: el efecto de los termopares dentro del material tanto en el proceso electromagnético como en el térmico. La mayoría de los modelos suponen que no afecta la medición [7,8,9], o solo realizan el análisis térmico del termopar sin considerar el análisis electromagnético [10].

Dado lo anterior, este trabajo tiene el objetivo de modelar la distribución del campo eléctrico del material dentro de una guía de onda, tomando en cuenta las propiedades dieléctricas del material dependientes de la temperatura y considerando además el análisis térmico.

Dado que la distribución del campo eléctrico depende de la temperatura, se valida además el uso de termopares para tomar tales valores y construir un modelo que considera las condiciones de prueba reales.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO II

INGENIERÍA DE MICROONDAS

2.1. Las Microondas

Microondas es un término descriptivo que se utiliza para identificar cierto tipo de ondas en el espectro electromagnético (Figura 2.1) comprendido entre 1GHz (10^9 Hz) y 30 GHz, que corresponde a longitudes de onda de 30 cm a 1 cm. Algunas veces también a frecuencias más elevadas (hasta 600 GHz) se les llama microondas. Estas ondas presentan algunas características que no ocurren en otros sectores del espectro electromagnético y que las hacen particularmente adecuadas para diversas aplicaciones, tales como: comunicaciones vía satélite, radar y calentamiento de materiales. ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La ingeniería de microondas se ocupa de la porción del espectro electromagnético localizado en la frecuencia de 10^9 a 10^{12} Hz correspondiente a longitudes de onda en espacio libre de 30 cm a 0.3 mm.

Los campos magnéticos y eléctricos que varían con el tiempo son gobernados por las leyes físicas descritas por cuatro ecuaciones conocidas como las ecuaciones de Maxwell [11].

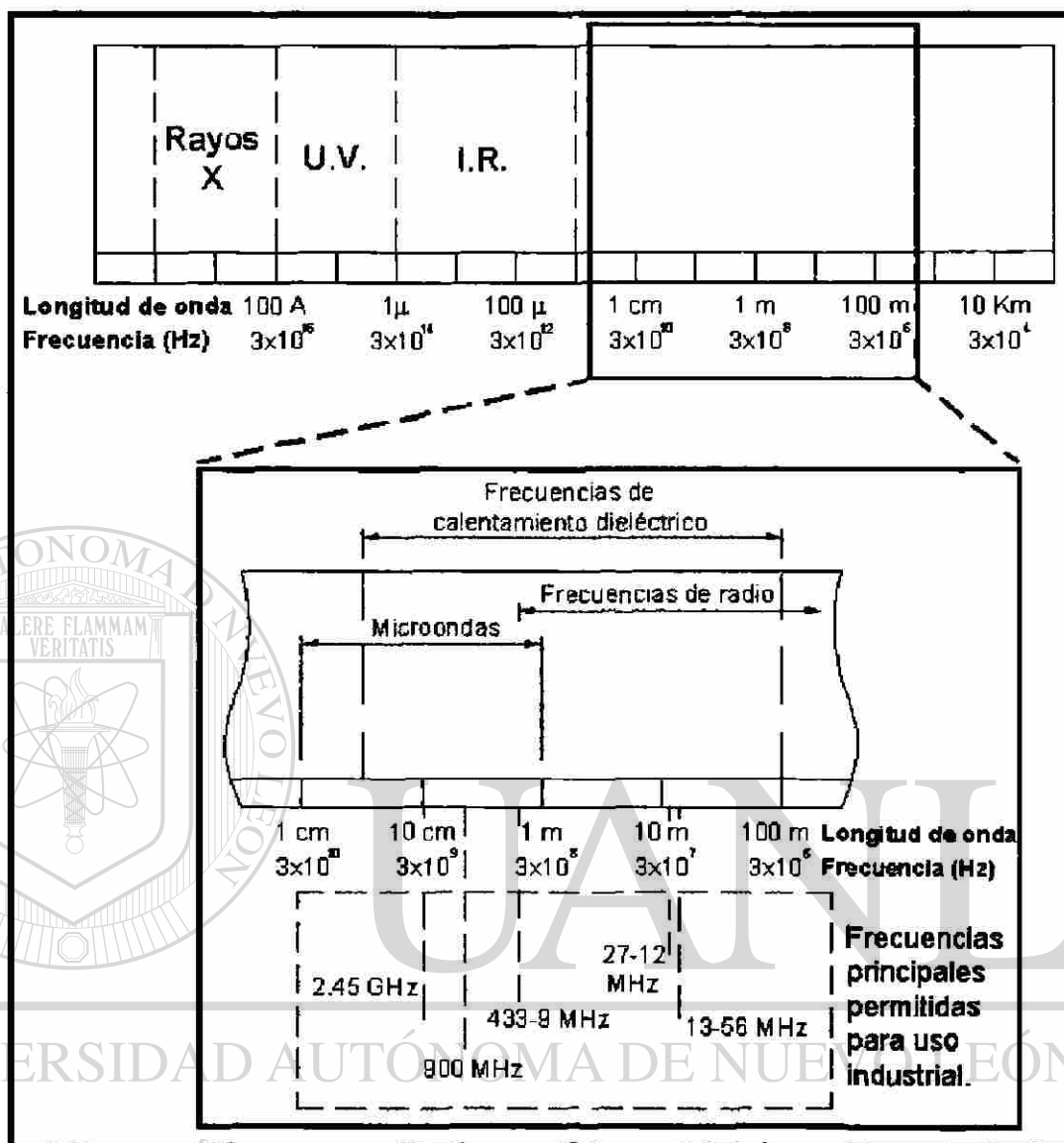


Figura 2.1. Espectro Electromagnético mostrando la sección que corresponde a las microondas.

Desde su primera aplicación en el radar, el uso de las microondas se ha extendido a otros campos, como el de la comunicación y, como en el caso de este trabajo, el de suministro de energía para el procesamiento de materiales.

2.2. Guías de Onda

El método matemático que se utiliza para analizar una determinada línea o ducto de transmisión depende fundamentalmente del tamaño del espacio por el cual se propagan las ondas electromagnéticas. Si el espacio es pequeño comparado con la longitud de onda característica, entonces se aplica la teoría de circuitos de corriente alterna y la teoría general de líneas de transmisión. Cuando dicho espacio tiene dimensiones del mismo orden que el tamaño de la longitud de onda característica, ocurren efectos de propagación de la onda que pueden ser resueltos mediante las ecuaciones de Maxwell y emplear campos eléctricos y magnéticos en lugar de corrientes y voltajes.

Una onda electromagnética que viaja en el espacio libre tiene campos eléctricos y magnéticos que viajan perpendiculares entre sí, y a su vez son perpendiculares a la dirección de propagación (Figura 2.2). En una guía de onda, los campos eléctrico y magnético pueden tener componentes en la dirección de propagación.

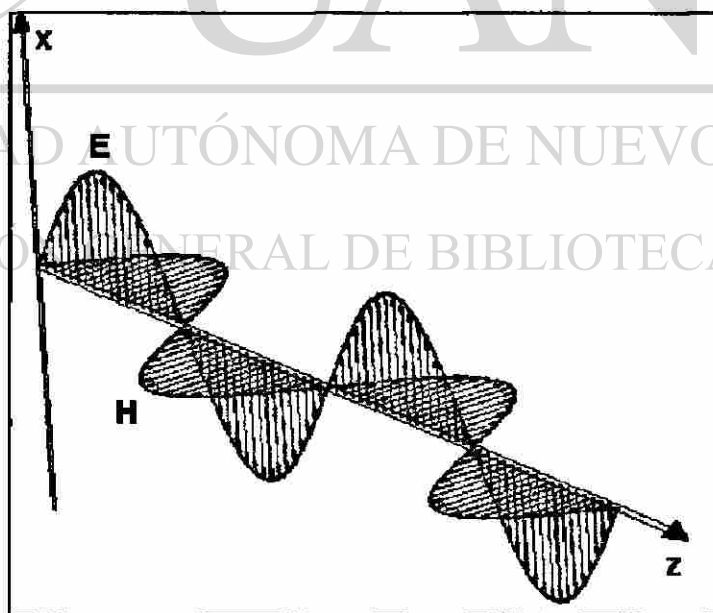


Figura 2.2 . Onda electromagnética. E= campo eléctrico, H= campo magnético.

Las guías de onda, son conductores de ondas electromagnéticas. Las formas más comunes de guías de onda son las rectangulares y las circulares. El cálculo de la distribución del campo eléctrico en las guías de onda se basa en la solución de las ecuaciones de Maxwell [11]:

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

Donde:

E y **H** denotan los campos eléctrico y magnético respectivamente

D y **B** son densidades de flujo eléctrico y magnético respectivamente

J y ρ son densidades de corriente eléctrica y carga eléctrica

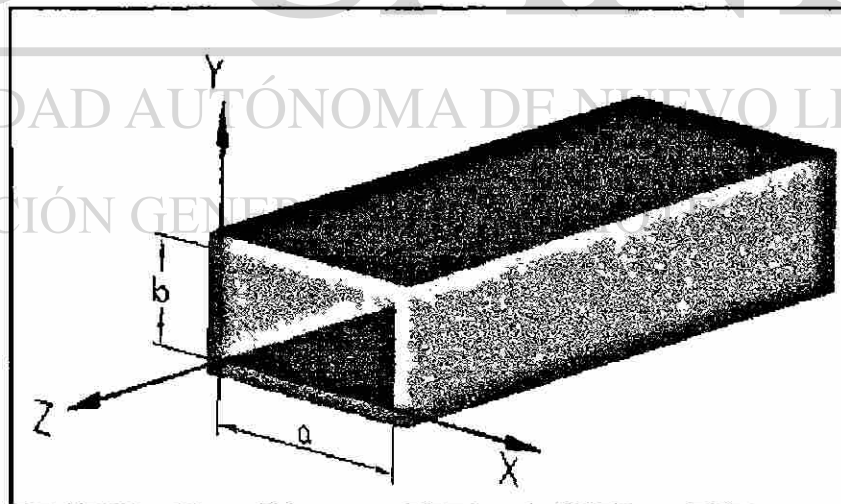


Figura 2.3. Guía de onda rectangular

Para el caso de las guías de onda rectangulares (Figura 2.3), las solución de las ecuaciones de Maxwell para el campo eléctrico y magnético para un medio no disipativo (sin pérdidas), son [12] :

$$H_{x_{mn}} = \left[\frac{jA_0\beta \frac{m\pi}{a}}{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \right] \left(\text{sen} \frac{m\pi}{a} x \right) \left(\cos \frac{n\pi}{b} y \right) e^{-j\beta z} \quad (5)$$

$$H_{z_{mn}} = \left[\frac{jA_0\beta \frac{n\pi}{a}}{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \right] \left(\cos \frac{m\pi}{a} x \right) \left(\text{sen} \frac{n\pi}{b} y \right) e^{-j\beta z} \quad (6)$$

$$H_{z_{mn}} = A_0 \left(\cos \frac{m\pi}{a} x \right) \left(\cos \frac{n\pi}{b} y \right) e^{-j\beta z} \quad (7)$$

$$E_{x_{mn}} = \frac{\omega\mu}{\beta} H_{y_{mn}} \quad (8)$$

$$E_{y_{mn}} = -\frac{\omega\mu}{\beta} H_{x_{mn}} \quad (9)$$

$$E_{z_{mn}} = 0 \quad \text{condición para modo TE}_{10} \text{ que se discute a continuación,} \quad (10)$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Donde:

A_0 : Constante. Es el producto de las constantes de las funciones que forman la solución de la ecuación diferencial [12].

β : Constante de fase ; $\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$

ω : Frecuencia angular (Rad/seg)

ε y μ representan la permitividad y permeabilidad correspondiente al medio.

m,n : Pueden tomar cualquier valor entero (0,1,2,3,...) para satisfacer las condiciones de frontera en la guía de onda.

En teoría, dentro de una guía rectangular puede haber un número infinito de distribuciones de campo, o *modos*, de acuerdo a las combinaciones posibles de los valores discretos m y n sustituidos en el conjunto de ecuaciones anteriores [12].

La denominación es: modos TE_{mn} ó TM_{mn} , donde los subíndices indican los número discretos m, n .

Los modos de propagación, es el transversal eléctrico (TE) de propagación caracterizado por tener el campo eléctrico en dirección transversal a la dirección de propagación, es decir, $E_z=0$ mientras que H_z es diferente de cero. Otro modo de propagación es el transversal magnético (TM) el cual se caracteriza por tener su campo magnético en dirección transversal a la de propagación ($H_z=0$) y una componente E_z diferente de cero.

En este trabajo se utilizó el modo TE_{10} ($m=1, n=0$) y se justificará en la sección correspondiente a la descripción de la guía de onda. Las Figuras 2.4 a la 2.6 muestran la distribución de campo eléctrico y magnético en una guía de onda para el modo TE_{10} .

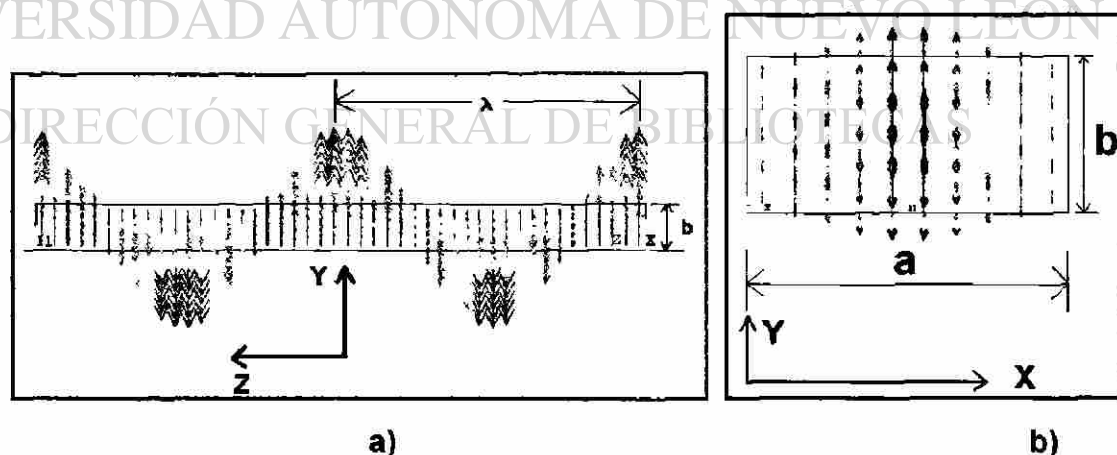


Figura 2.4. Distribución del campo eléctrico en una guía rectangular en el modo TE_{10} . a) Vista lateral, b) Vista frontal.

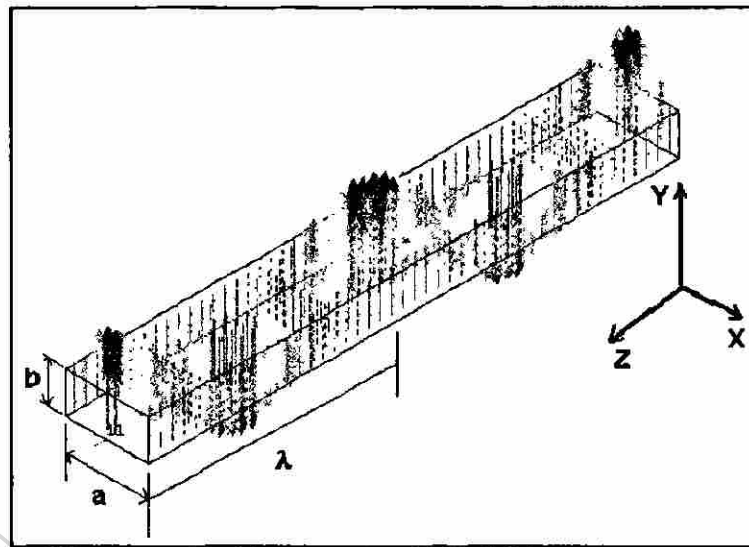


Figura 2.5. Distribución del campo eléctrico para una guía de onda rectangular en el modo TE_{10} . Vista Isométrica

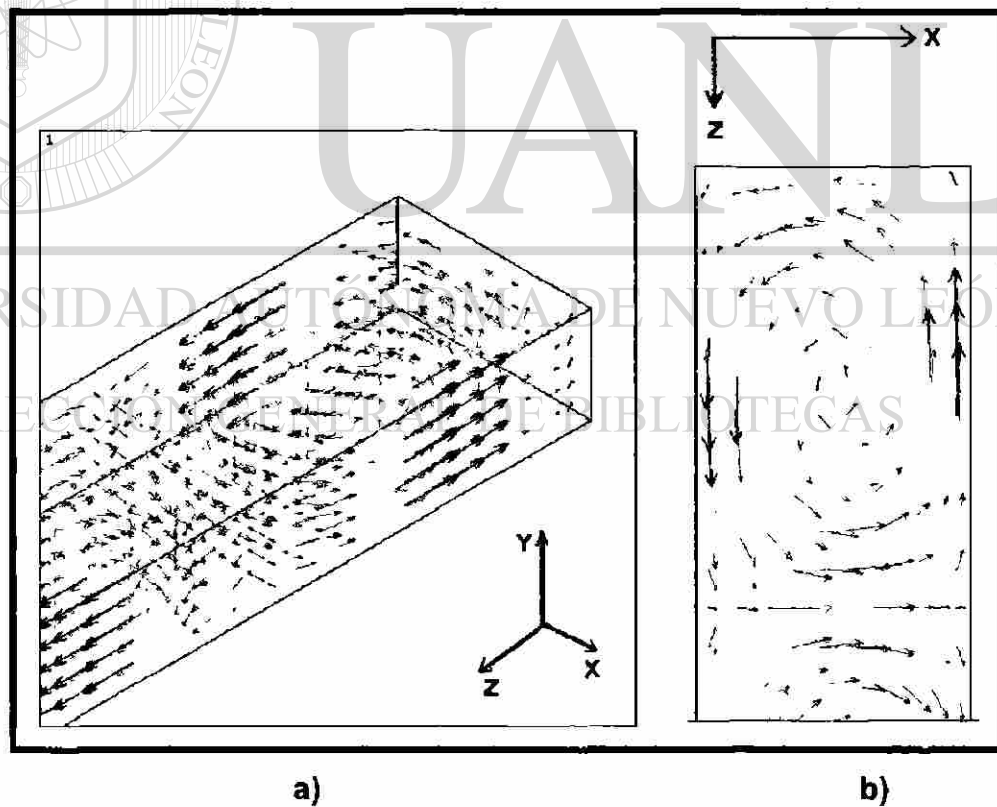


Figura 2.6. Distribución del campo magnético para una guía de onda rectangular en el modo TE_{10} : a) Vista Isométrica; b) Vista superior

La frecuencia de corte es la frecuencia mínima para la propagación, debajo de esta frecuencia no hay transmisión de la onda.

$$f_c = \sqrt{\left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2\right]} \quad (11)$$

El modo TE_{10} es el modo más utilizado en guías de onda, ya que tiene la frecuencia de corte mínima, y se denomina modo dominante.

Cuando el medio no tiene pérdidas o disipación de energía, se pueden utilizar las ecuaciones anteriores para determinar el comportamiento electromagnético de las ondas en la guía de onda.

Cierta cantidad de energía puede ser disipada, ya sea por la conductividad de las paredes, o por las propiedades disipativas del medio. Cuando el medio es disipativo, absorbe energía de microondas, convirtiendo esta energía en calor.

Otros parámetros de las guías de onda son: Velocidad de propagación y longitud de onda:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (12)$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$v_{pmn} = \frac{\omega}{\beta_{mn}} = v \left[\frac{f}{f^2 - f_{cmn}^2} \right] \quad (13)$$

$$\lambda_c = \frac{v}{f_c} = \frac{2}{\sqrt{\left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2\right]}} \quad (14)$$

donde:

v: Velocidad de fase de una onda plana (m/s)

v_p : Velocidad de fase a lo largo de la guía (m/s)

v_{pmn} : Velocidad de fase a lo largo de la guía para el modo m,n en análisis (m/s)

μ : Permeabilidad relativa

ϵ : Permitividad relativa

ω : frecuencia angular (rad/seg)

$$\beta = \left(\frac{2\pi}{v} \right) \sqrt{f^2 - f_{c_{mn}}^2} \quad \text{Constante de fase}$$

f: Frecuencia (Hz)

f_c : Frecuencia de corte (Hz)

$f_{c_{mn}}$: Frecuencia de corte del modo mn en análisis

λ : Longitud de onda (m)

a y b: dimensiones de la guía

2.3 Guía de onda WR284 y el modo TE₁₀

La guía que se utilizó en este trabajo se denomina WR284, cuyas dimensiones se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Guías de onda estándares

Designación *(EIA)	Dimensiones Internas (a x b, cm)	Frecuencia de corte para el modo TE ₁₀ (GHZ)	Rango recomendado de frecuencias (GHZ)
WR284	7.214 x 3.404	2.080	2.60 a 3.95
WR187	4.755 x 2.215	3.155	3.95 a 5.85
WR137	3.485 x 1.580	4.285	5.85 a 8.20
WR112	2.850 x 1.262	5.26	7.05 a 10.0
WR90	2.286 x 1.016	6.56	8.2 a 12.4
WR62	1.580 x 0.7899	9.49	12.4 a 18.0

EIA: Electronic Industry Association. Estados Unidos de Norteamérica

La frecuencia de corte más baja para una guía rectangular de dimensiones $a=2b$, corresponde al modo TE_{10} . En general, para toda guía que cumpla la condición $a>b$, la frecuencia de corte más baja siempre se obtiene para $m=1$ y $n=0$. Por tal razón, el modo TE_{10} se denomina modo dominante [13]. La frecuencia de corte para el modo TE_{10} es:

$$f_{c10} = \frac{v}{2a} \quad (15)$$

y es independiente de la dimensión b .

En cualquier sistema de microondas, el número de modos que puede existir dentro de la guía rectangular depende de las dimensiones a y b , del material que hay en su interior y del dispositivo de excitación.

Si la guía trabaja en varios modos a la vez, la potencia total se distribuye entre ellos, y se dificulta la detección de la potencia de cada modo. Por lo tanto, es preferible trabajar una guía en un solo modo, es decir, el modo dominante TE_{10} . Si la guía opera solo en el modo TE_{10} , todos los demás modos superiores emitidos por la fuente de microondas son atenuados y no se propagan.

Las guías rectangulares son muy útiles porque tienen un ancho de banda muy grande, dentro del cual, sólo se propaga el modo dominante

Existen en el mercado un rango muy amplio de estándares para trabajar en guías rectangulares, en frecuencias desde 300 MHz, hasta 300 GHz. La tabla 1.1 muestra los estándares más comunes.

CAPÍTULO III

CALENTAMIENTO DE MATERIALES

3.1 Efecto de las microondas en los materiales.

El calentamiento del material se realiza cuando la energía de las microondas se transforma en calor. Dado que esta conversión ocurre por la interacción de las ondas con la materia, resulta que no todos los materiales pueden ser calentados mediante microondas. Existen materiales, generalmente poco conductores eléctricos, que pueden considerarse como transparentes a las microondas, otros materiales muy conductores, como los metales, reflejan las microondas y no absorben su energía y existen también un buen número de materiales con características intermedias a las anteriores.

Existen varios fenómenos térmicos que se observan cuando los materiales son procesados en un campo de microondas. Este incluye calentamiento selectivo, calentamiento volumétrico y la rapidez con que éste se lleva a cabo. Estos fenómenos pueden ser entendidos en términos de la absorción de la energía de microondas y la conversión en calor dentro del material, como se mencionó anteriormente.

En general, los mecanismos que rigen el calentamiento por microondas son:

Salto iónico. Ocurre cuando existen en la sustancia dos o más posiciones equivalentes disponibles para un ion de impureza adyacentes a una vacancia. El dipolo ion-vacancia puede cambiar de posición en el campo.

Efecto Resistivo. Este mecanismo de calentamiento se manifiesta en conductores y semiconductores con resistividades eléctricas altas. Puede presentarse en aquellos materiales que tienen electrones libres o pares electrón-hueco; o en materiales con contenidos iónicos tales que los iones tienen suficiente libertad de movimiento para generar corrientes conductoras.

Rotación dipolar. Ocurre cuando los dipolos que existen en algunos materiales tienden a reorientarse bajo la influencia de un campo eléctrico, como resultado se tiene una "fricción molecular" que genera calentamiento instantáneo y uniforme en el material [14].

La tecnología de microondas tiene el potencial de ser un método útil para la síntesis y sinterizado de cerámicos, considerando más uniformidad de temperaturas en la muestra, mejora en la uniformidad del producto, altas eficiencias en el consumo de energía, mucho menos tiempo y espacio requerido. También se pueden crear tamaños de grano menores a cualquier densidad.

Los cerámicos son aislantes, por lo que los electrones no fluyen en respuesta al campo eléctrico aplicado, sin embargo, un campo eléctrico puede causar una reorientación de dipolos, la cual puede tener como consecuencia el calentamiento. El cambio rápido de los campos eléctricos asociados con las microondas tiene como consecuencia un rápido cambio en las orientaciones de

los dipolos del material. Hay una frecuencia natural que causa una máxima reorientación, y por lo tanto, el máximo de calentamiento del material.

En un horno convencional, el calor se transfiere del aire a la superficie de la muestra por convección, después, la muestra se calienta por conducción, por lo tanto, la temperatura de la superficie es siempre mayor que la temperatura en el interior de la muestra.

En un horno de microondas, las moléculas de la muestra, son excitadas directamente por el campo electromagnético, como la energía es absorbida por la muestra, ésta incrementa su temperatura, la cual se hace mayor en la superficie que en los alrededores, y pierde calor por convección, por lo tanto la temperatura en el interior es mayor que en la superficie. La muestra tiene la capacidad de seguir absorbiendo energía independientemente de la temperatura del medio que lo rodea.

Sin embargo, hay ciertos inconvenientes en el uso de microondas para el calentamiento de materiales. Los que tienen alta conductividad generalmente son difíciles de procesar debido a la pobre penetración de las microondas, y los aislantes con baja constante dieléctrica tienen una pobre absorción de microondas.

Aunado a esto, los materiales tienen propiedades dieléctricas que dependen de la temperatura y generalmente causan un calentamiento no uniforme.

3.2 Modelo matemático de calentamiento de materiales con microondas

La razón por la cual un material dado absorbe energía de microondas está determinada por:

- 1) Las propiedades dieléctricas.
- 2) La frecuencia de las microondas
- 3) La distribución de campo eléctrico y la profundidad de penetración de las microondas en el material.

Una expresión general que referencia al calentamiento con microondas que relaciona el flujo de calor con la potencia es [15]:

$$P = 2 \pi f \epsilon_0 \epsilon_r \tan(\delta) E^2 \quad (16)$$

Donde:

P: Potencia absorbida por unidad de volumen (watts/cm³).

f: Frecuencia (Hz).

ϵ_0 : Permitividad del aire (F/m).

ϵ_r : Permitividad relativa del material.

$\tan\delta$: Factor de pérdida

E: Campo eléctrico. (V/m)

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Cada material tiene propiedades intrínsecas relacionadas con la absorción de energía. La propiedad más importante para este trabajo, es la permitividad ϵ , la cual permite cuantificar la habilidad del material para absorber y almacenar energía eléctrica.

La permitividad de un material dieléctrico es un número complejo de la forma:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (17)$$

el factor disipación o tangente de pérdidas es:

$$\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon' \quad (18)$$

La parte real ε' , conocida como constante dieléctrica, nos da un indicativo de la habilidad de las microondas para penetrar el material [16]. (Figura 3.1)

La parte imaginaria ε'' , también conocida como factor de pérdida, de acuerdo a la ecuación 17, es una medida de la habilidad del material para absorber energía de microondas y es extremadamente dependiente de la temperatura [16].

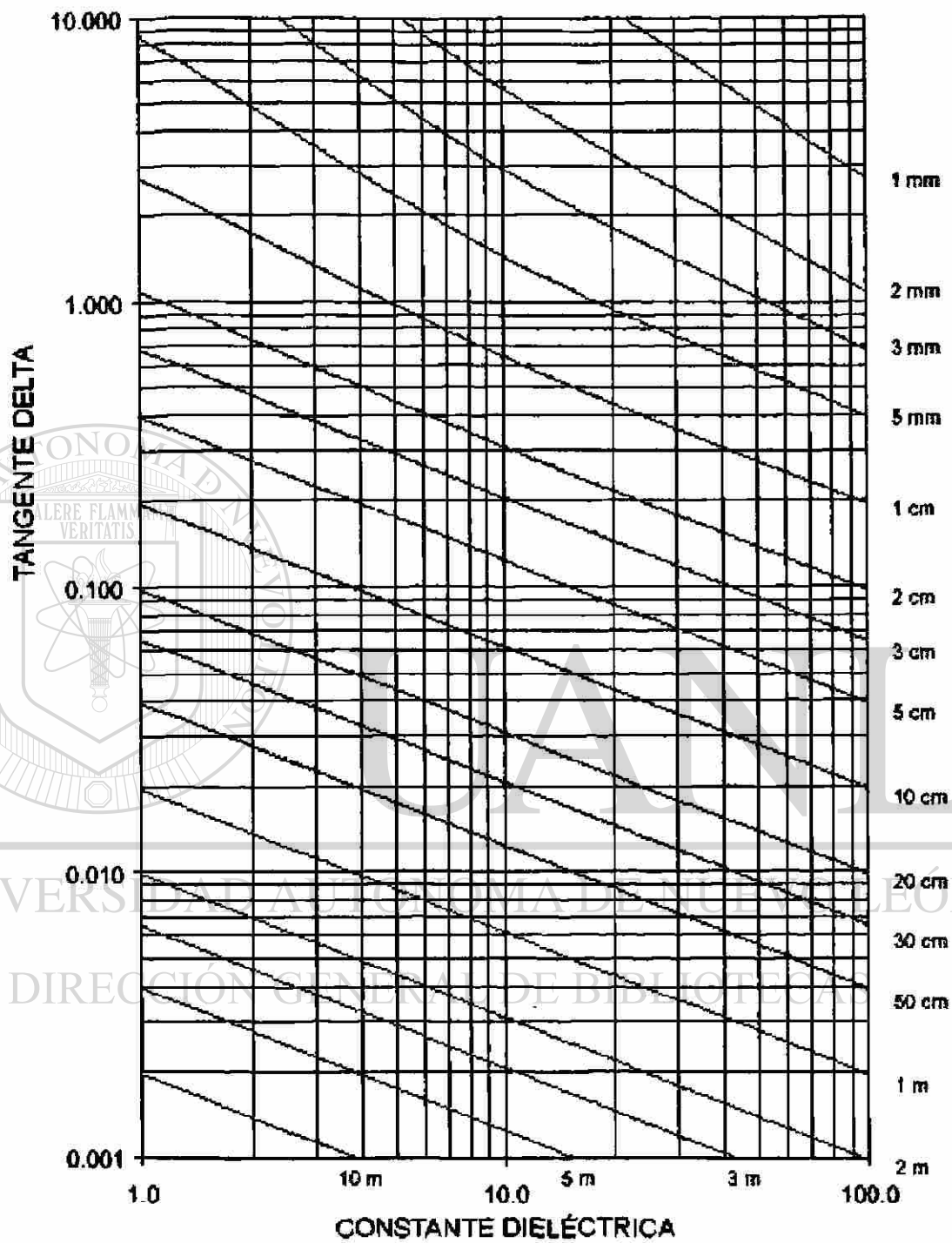


Figura 3.1. Penetración de las microondas a diferentes valores de $\tan \delta$ y constante dieléctrica ϵ' [17]

Se sabe que ε' no es muy sensible a la temperatura, pues varía del orden del 10% cada 500°C [18], mientras que $\tan(\delta)$ puede variar de 1 hasta 3 o más órdenes de magnitud en el mismo rango.

La Figura 3.2 muestra el valor de $\tan \delta$ para la alúmina a 3.6GHz.

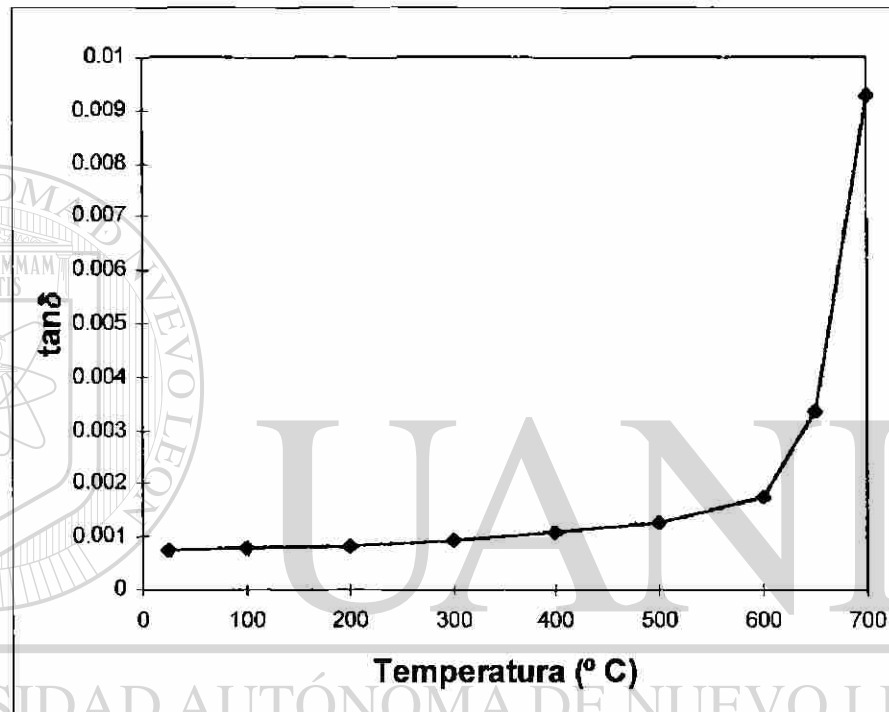
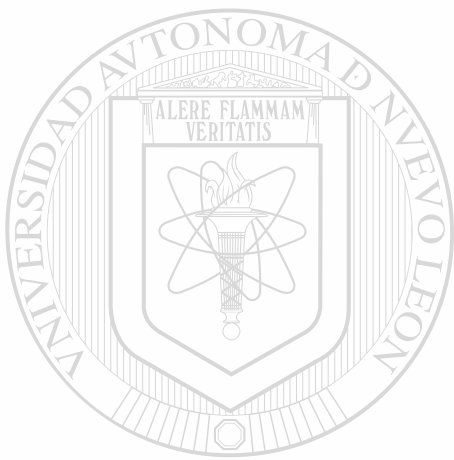


Figura 3.2 . Dependencia de $\tan \delta$ respecto a la temperatura para una muestra de alúmina expuesta a 3.6 GHz.

Así, la propiedad física de la cual depende fundamentalmente el calentamiento es la parte imaginaria de la permitividad.

Aunque la expresión que relaciona la energía que un material absorbe con la frecuencia y las propiedades dieléctricas es simple, es necesario considerar su dependencia con la temperatura.

No es claro que el calentamiento con microondas sea volumétrico, además, dado que siempre existe el gradiente térmico (dado que hay pérdidas hacia el medio ambiente) la absorción de energía está también influenciada por este gradiente de manera que incluso provoca mayor heterogeneidad en el calentamiento de la muestra, especialmente si no es pequeña. La única manera de conocer la evolución térmica real es mediante un modelo que acople las ecuaciones que describen el campo eléctrico en una muestra con la transferencia de calor.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO IV

MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

4.1 Introducción.

Los problemas de ingeniería son modelos matemáticos de distintas situaciones físicas, que con frecuencia se presentan en forma de ecuaciones diferenciales.

Las ecuaciones diferenciales se derivan aplicando las leyes y principios fundamentales de la naturaleza a un sistema o volumen de control. Esas ecuaciones representan balances de masa, fuerza o energía. Cuando existe la posibilidad, la solución exacta de esa ecuación proporciona una descripción que describe el comportamiento del sistema bajo determinadas condiciones, sin necesidad de llevar a cabo iteraciones o utilizar artificios numéricos. En cualquier problema de ingeniería, hay dos conjuntos de valores que determinan el comportamiento del sistema. Primero, las propiedades que proveen información concerniente con el comportamiento natural del sistema, tales como: módulo de elasticidad, conductividad, viscosidad. Por otro lado, hay parámetros que producen perturbaciones en el sistema y siempre aparecen en la parte homogénea de la ecuación. Algunos ejemplos pueden ser: fuerzas externas, momentos, diferencia de temperaturas, presión y campo eléctrico.

4.2 Métodos numéricos

Hay pocos problemas para los cuales se puede obtener una solución exacta, la mayoría requiere el uso de métodos numéricos. Esta inhabilidad para obtener tal solución, puede atribuirse a dos causas: la naturaleza compleja de la ecuación diferencial, o la dificultad en las condiciones iniciales y de frontera. Para poder solucionar este tipo de problemas se utilizan aproximaciones numéricas. En contraste con una solución exacta, las soluciones numéricas solo aproximan la solución en puntos discretos llamados nodos. El primer paso en una solución numérica es la discretización. Este proceso divide el medio de interés en un pequeño número de subregiones y nodos.

Los métodos más comunes para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales son: (1) Método de diferencias finitas y (2) Método de elemento finito.

Con el método de diferencias finitas, se escribe la ecuación diferencial para cada nodo, y las derivadas son reemplazadas por ecuaciones de diferencias. Esta aproximación da como resultado un conjunto de ecuaciones lineales. Aunque el método de diferencias finitas es sencillo y fácil de implementar, éste se vuelve más complejo para geometrías complicadas o condiciones de frontera complejas, y para sistemas con propiedades anisotrópicas.

En contraste, el método de elemento finito utiliza una *formulación integral* en lugar de ecuaciones de diferencia para crear el sistema de ecuaciones lineales.

El método de elemento finito, es un procedimiento numérico que puede ser aplicado para obtener la solución de una gran variedad de problemas de

ingeniería: análisis de esfuerzos, transferencia de calor, flujo y electromagnetismo entre otros.

4.3 Pasos básicos en el método de elemento finito

Fase de preprocesamiento.

- 1.- Crear y discretizar el dominio a solucionar en elementos finitos, esto es, subdividir el problema en nodos y elementos.
- 2.- Asumir una función de forma que represente el comportamiento físico, se supone que una función continua representa la solución dentro del elemento
- 3.- Desarrollar las ecuaciones del elemento.
- 4.- Ensamblar los elementos para representar la solución completa.
- 5.- Proponer las condiciones de frontera

Fase de solución.

- 6.- Resolver el conjunto de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales simultáneas para obtener resultados nodales, tales como: desplazamiento y temperaturas.

Fase de post-procesamiento.

- 7.- Presentar la solución en forma de tablas, gráficas o esquemas.

En general, hay varios métodos de aproximación para formular los problemas de elemento finito: a) Formulación directa; b) Energía potencial total mínima y 3) Métodos de residuos ponderados.

La forma más sencilla es el método directo, el cuál consiste en la formulación de las ecuaciones de cada elemento utilizando las ecuaciones que describen el comportamiento físico para cada uno, por ejemplo, ecuaciones de deformación y ecuaciones de esfuerzo. No utiliza una formulación integral y es aplicable solo a fenómenos y geometrías sencillas.

Los métodos más utilizados para la solución de problemas complejos o más generales es el de residuos pesados.

Los métodos de residuos pesados están basados en asumir una solución aproximada de la ecuación diferencial. La solución supuesta debe satisfacer las condiciones iniciales y de frontera del problema propuesto. Debido a que la solución propuesta no es exacta, su substitución en la solución de la ecuación diferencial tendrá cierto error ó residual. En forma sencilla, cada método residual requiere que el error desaparezca (cero) sobre algunos intervalos y sobre ciertos puntos [19].

Para lograr esto, hay diferentes técnicas [19]:

Método de colocación: El error o residual, función \mathcal{R} es forzado a cero en tantos puntos como incógnitas haya.

Método de subdominio: La integral de la función de error es forzada a cero sobre ciertos intervalos seleccionados. El número de sub-intervalos debe ser igual al número de incógnitas.

Método de Galerkin: Requiere que el error sea ortogonal sobre ciertas *funciones de peso*, de acuerdo a la integral:

$$\int_a^b \Phi_i \mathcal{R} dy = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (19)$$

4.4 Método de elemento finito en problemas electromagnéticos

Para la solución de problemas electromagnéticos, se utilizan los métodos de residuos pesados, en especial el método de Galerkin.

Como ya establecimos con anterioridad, cuando el espacio conductor tiene dimensiones del orden de la longitud de onda característica, ocurren efectos de propagación de la onda que pueden ser descritos resolviendo las ecuaciones de Maxwell empleando campos eléctricos y magnéticos.

Si se considera un escenario como el que se muestra en la Figura 4.1. Una superficie cerrada S divide el dominio en una parte exterior y una interior. Una fuente electromagnética localizada en algún lugar del exterior genera una onda electromagnética. El dominio interior, denotado por " Ω " es nuestro principal objeto de estudio. Este dominio interior puede ser: una guía de onda, antena, material dieléctrico o conductor.

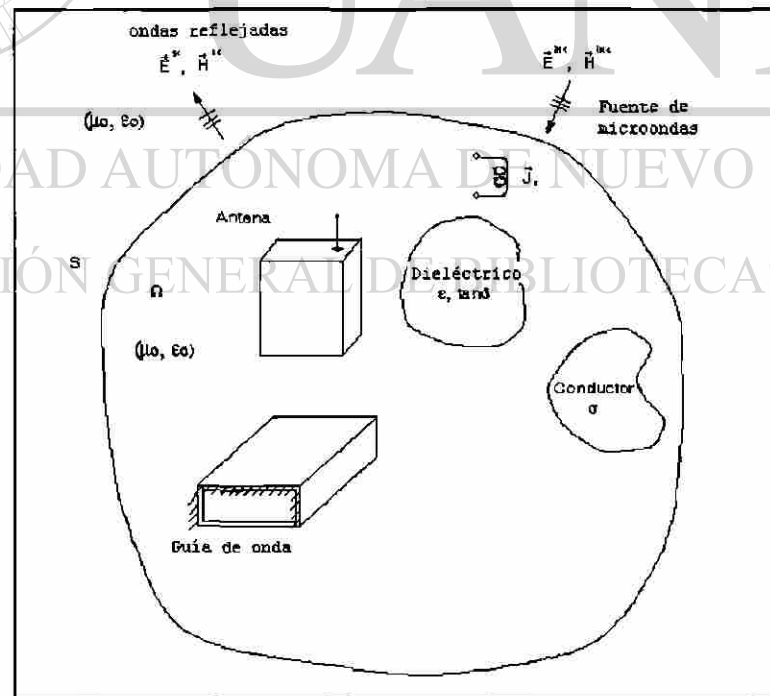


Figura 4.1 . Dominio de análisis para fenómenos electromagnéticos

El objetivo primordial es encontrar el campo electromagnético dentro del dominio Ω utilizando el método de elemento finito:

Formulación integral .

De acuerdo con las ecuaciones de Maxwell, el campo eléctrico debe satisfacer la siguiente ecuación [20]:

$$[\varepsilon] \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + [\sigma] \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \nabla \times [v] \nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{J}_s}{\partial t} \quad (20)$$

donde:

\vec{E} : campo eléctrico

\vec{J}_s : Densidad de corriente de la fuente

σ : Conductividad del medio

ε : Permitividad relativa

$$v = \frac{1}{\mu}$$

μ : Permeabilidad magnética

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Multiplicando (20) escalarmente por \vec{W}_i e integrando ambos lados sobre el volumen Ω , tenemos [20]:

$$\int_{\Omega} \vec{W}_i \cdot [\varepsilon] \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} d(\text{vol}) + \int_{\Omega} \vec{W}_i \cdot [\sigma] \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} d(\text{vol}) + \int_{\Omega} \nabla \times \vec{W}_i \cdot [v] \nabla \times \vec{E} d(\text{vol}) + \int_S \vec{W}_i \cdot \hat{n} \times [v] \nabla \times \vec{E} d(\text{área}) = - \int_{\Omega} \vec{W}_i \cdot \frac{\partial \vec{J}_s}{\partial t} d(\text{vol}) \quad (21)$$

Donde:

\vec{W}_i : i-ésima función de peso (según el método de residuos pesados).

Si se simplifica se obtiene:

$$[M] \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{A_x\} + [C] \frac{\partial}{\partial t} \{A_x\} + [K] \{A_x\} = F \quad (22)$$

Donde:

$$\{A_x\} = \text{Componentes del campo eléctrico} \quad (23)$$

$$[W] = \text{Vector de funciones de forma (Depende del elemento utilizado}$$

y no se debe confundir con \vec{W}_i , anexo 1) (24)

$$[K] = \int_{vol} (\nabla \times [W]^T)^T [\nu] (\nabla \times [W]^T) d(vol) \quad (25)$$

$$[C] = \int_{vol} [W] \mathbf{I} \sigma [W]^T d(vol) \quad (26)$$

$$[M] = \int_{vol} [W] \mathbf{I} \epsilon [W]^T d(vol) \quad (27)$$

$$\{F\} = - \int_{vol} [W] \frac{\partial}{\partial t} \{J_s\} d(vol) \quad (28) \quad \text{®}$$

Esta formulación integral es suficiente para describir el comportamiento de las ondas electromagnéticas en cualquier medio.

4.5 Método de elemento finito en transferencia de calor

Ecuación general de transferencia de calor.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T \quad (29)$$

donde:

T: Temperatura (°C)

κ : Difusividad térmica (m²/s)

La formulación integral se puede obtener utilizando un procedimiento similar al utilizado para las ecuaciones de Maxwell [21].

Dada la laboriosidad que la solución de este sistema implica, el conocimiento de las herramientas de cómputo que permiten llevar a cabo esta tarea es una actividad muy valorada hoy en día. Entre las distintas herramientas de cómputo para este fin se encuentra ANSYS, el cual será utilizado aquí, en el entendido de que cualquier otro paquete o programa en que se planteen estas mismas ecuaciones deberá dar los mismos resultados.

Proponer un sistema de ecuaciones que sea capaz de describir estos fenómenos, a través la formulación integral no queda resuelto por el paquete.

Se debe tener un conocimiento claro de las limitaciones físicas y matemáticas que el modelo conlleva y los pasos para resolverlos. Esto incluye desde el dibujo de la geometría, selección de los tipos de elementos, mallado, aplicación de condiciones de frontera adecuadas, propiedades de materiales, datos físicos del problema tales como: potencia, posición de la onda electromagnética, frecuencia, y sobre todo, tener datos experimentales que den la certeza de que los resultados son aproximados a la realidad.

CAPÍTULO V

DESARROLLO Y EXPERIMENTACIÓN

5.1 Arreglo experimental

Para llevar a cabo la experimentación del calentamiento de la muestras, se utilizó un equipo generador de microondas (2.45 GHz y hasta 3 KW), acoplado a una guía de ondas (WR284). Para las mediciones se utilizaron equipos auxiliares los cuales se describen a continuación. (Figura 5.1)

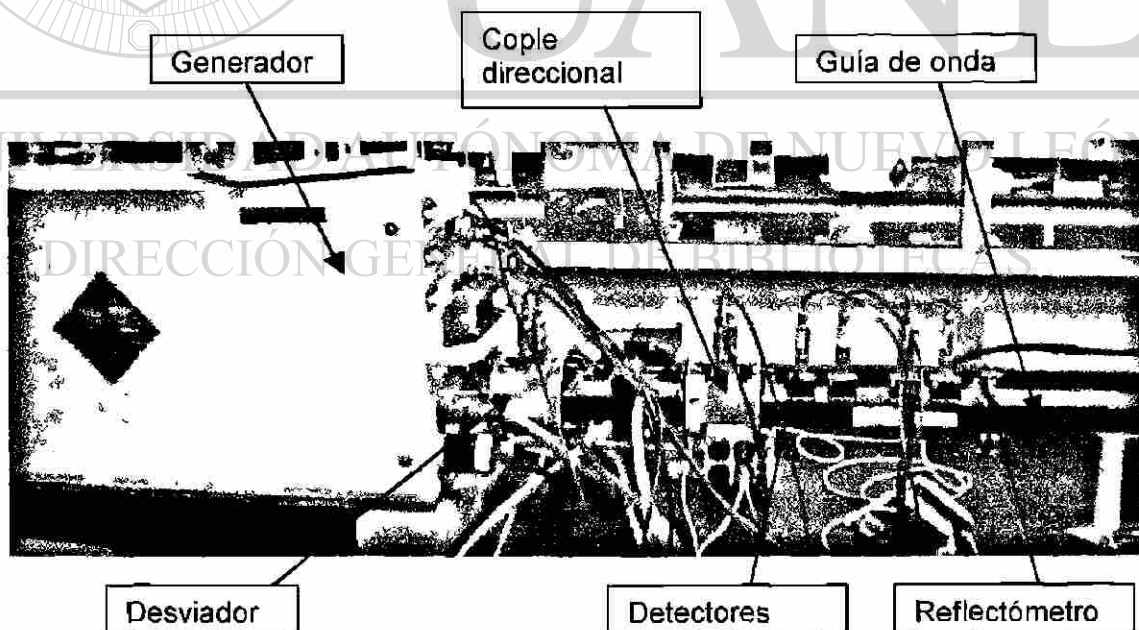


Figura 5.1 Equipo experimental

Generador

Es la parte principal del equipo ya que produce las microondas a la frecuencia deseada. Para este propósito se utiliza un magnetrón que requiere mantenerse a temperatura relativamente constante para que la onda generada sea estable.

Guía de onda

La función de la guía de onda es conducir con un mínimo de pérdidas las microondas desde el generador hasta la cavidad en la que se encuentra la muestra. El material que se coloca en la cavidad se conoce como "carga". La guía de onda consiste en una sección a través de la cual pasan las microondas. El tamaño depende de la frecuencia y la potencia que se desea transmitir.

Desviador

Las microondas se conducen por medio de la guía de onda hasta ser reflejadas por la muestra y la pared de la guía. La absorción de energía nunca es total, ya que una parte se refleja y regresa por la misma guía hasta el generador y la fuente. Esta situación podría dañar el generador por lo que la onda reflejada se desvía mediante un desviador, llamado también circulador, hacia una cámara de agua que absorbe esta energía.

Cople direccional

Para poder estimar las propiedades dieléctricas de los materiales expuestos a microondas y hacer cálculos energéticos se requiere conocer la cantidad de energía que va desde el generador hacia la muestra y la que se refleja de ésta hacia el generador. Para este fin se utiliza un cople direccional

que tiene la capacidad para hacer la medición descrita. También sirve para calibrar otros dispositivos y para medir la eficiencia del sistema. Éste tiene la forma de la guía de onda por lo que es parte del sistema para suministrar energía.

La razón entre las energías hacia la carga y la reflejada es suficiente para calcular la eficiencia con la que se está llevando a cabo el proceso mediante microondas.

Reflectómetro

Este dispositivo se coloca como parte de la guía de onda y permite medir la energía que pasa a lo largo, de manera que si se conoce la longitud de onda y los valores de potencia en cuatro puntos de los cuales se conoce su posición, entonces es posible describir la ubicación de la onda, de manera que se puede confirmar la función del sintonizador. También es posible hacer estimaciones de las propiedades dieléctricas del material observando el comportamiento de la onda.

Sintonizador

Este dispositivo permite ubicar el patrón de ondas dentro de la guía de onda o la cavidad de manera que se optimice la energía que se suministra al sistema. Se puede sintonizar la onda cambiando la longitud de la guía o poniendo obstáculos en ella.

Cavidad

El arreglo experimental se muestra en la Figura 5.2, en la cual se utilizó el equipo descrito anteriormente. Se coloca un crisol de alúmina lleno de alúmina en polvo en la guía de onda WR284. Se tiene una pared móvil al final de la guía para producir un cambio en la longitud de la guía. Dado que la onda sigue una función periódica es posible conocer el campo eléctrico en la muestra midiéndolo con los detectores a una distancia L conocida. Si se varía la longitud de la guía con dicha pared móvil, cambia la distribución del campo eléctrico dentro de la misma, y se puede lograr que el valor máximo de campo eléctrico se encuentre al centro de la muestra (Figura 5.3). Siempre y cuando se presenten condiciones de onda estacionaria.

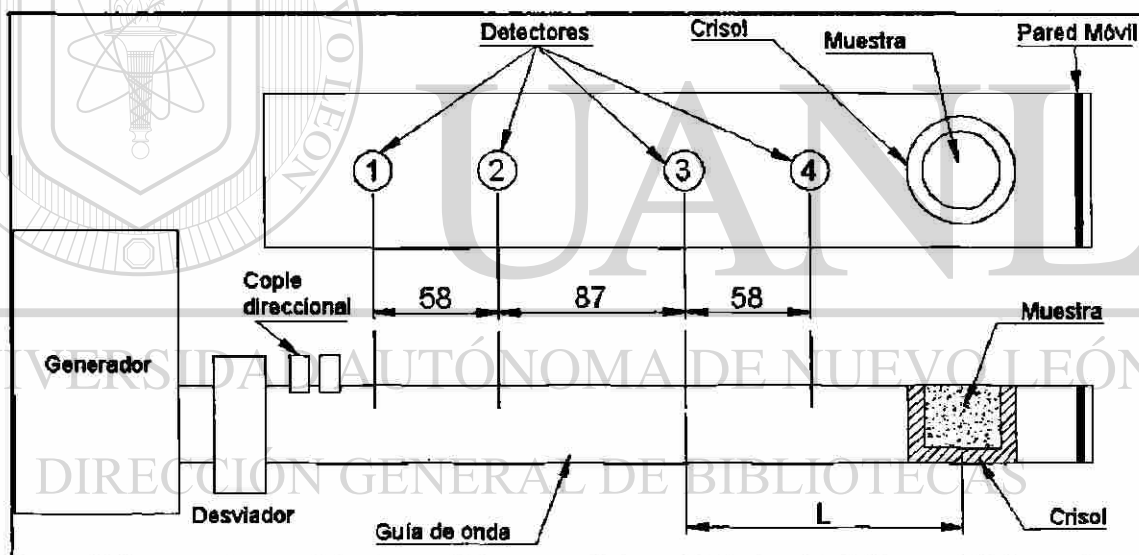


Figura 5.2 . Arreglo experimental

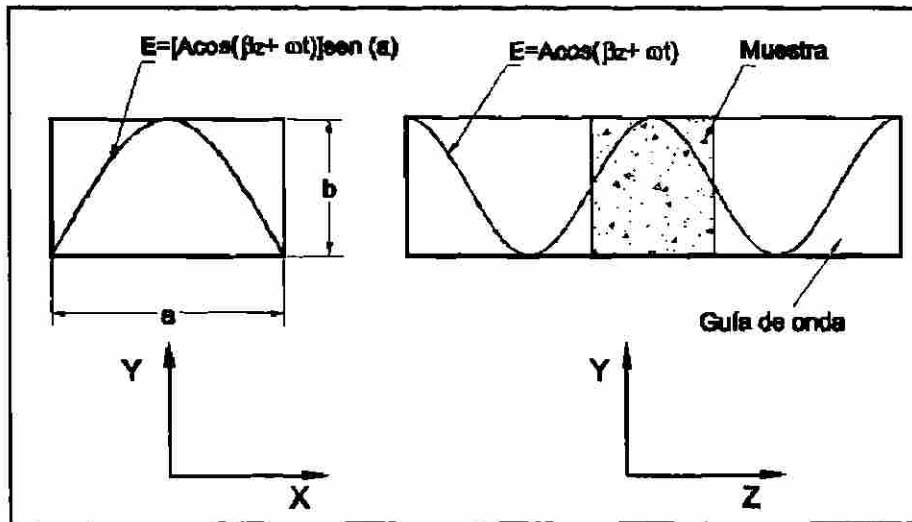


Figura 5.3 Campo eléctrico en la muestra

Las dimensiones de la guía son: $a = 7.2$ cm , $b = 3.6$ cm. El crisol tiene un diámetro de 5 cm y una altura de 3.5 cm. La muestra se coloca en el interior de la guía de onda. (Figura 5.4)

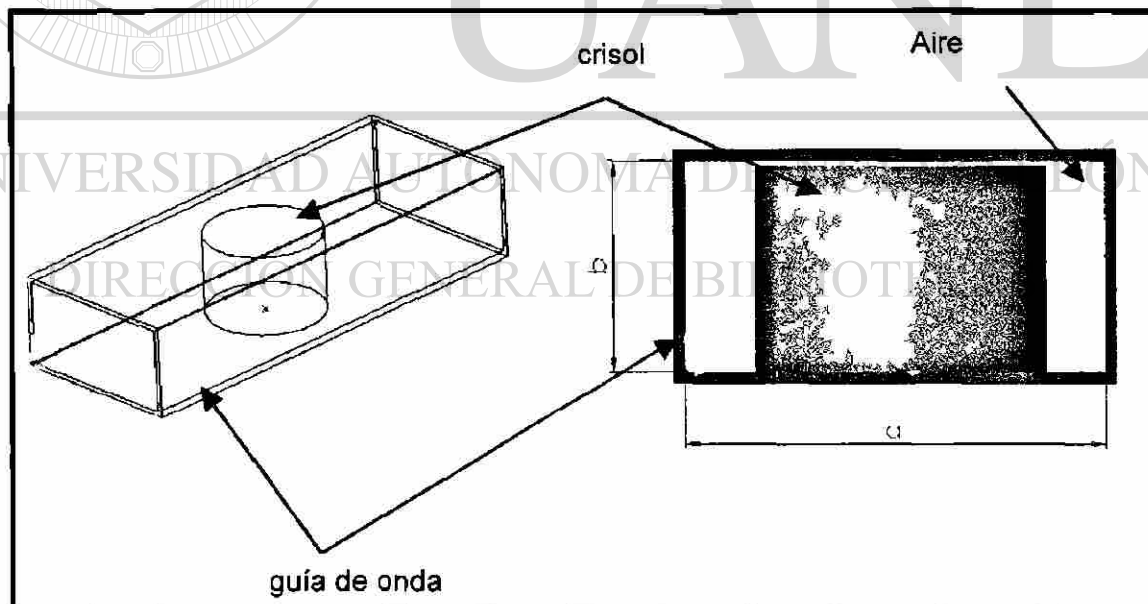


Figura 5.4 . Guía de onda y crisol

Para la medición de temperatura, se utilizaron termopares tipo K, cuyo límite de operación es 1250 °C, estaban blindados con acero inoxidable (el conjunto era de 1.58 mm de diámetro) y sin aterrizar para evitar pérdidas (Figura 5.5)

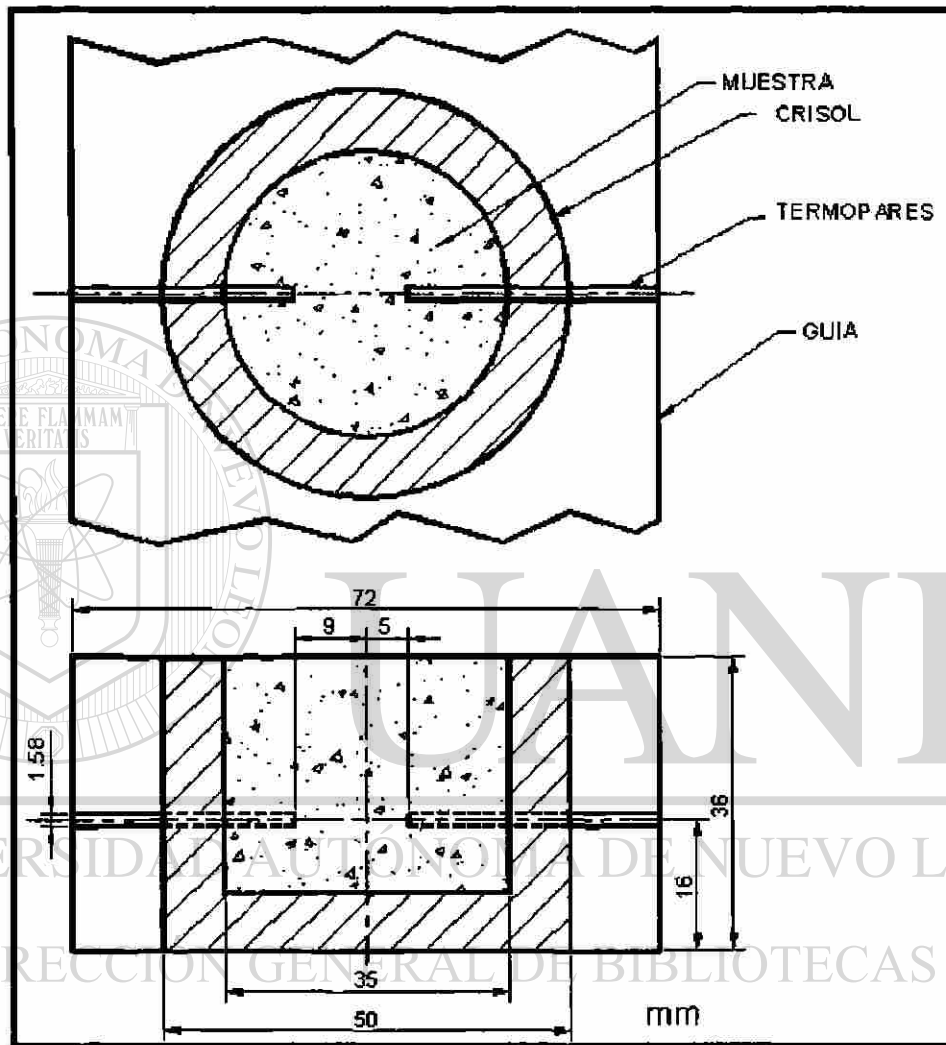


Figura 5.5 Posición de los termopares para la medición de temperatura

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. Esto debido a que

por su naturaleza metálica pueden perturbar el patrón electromagnético dentro de la cavidad o guía en la que se esté llevando a cabo un proceso dado.

Dado que las ondas electromagnéticas están formadas por un campo eléctrico y un campo magnético desfasado 90° entre sí, otra forma de evitar que el termopar se vea afectado por el campo sería colocarlo en posición perpendicular al campo eléctrico, 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 corriente entre él, de la manera que no hay autocalentamiento

Además, para poder utilizar el termopar en estas condiciones, se pueden hacer algunas modificaciones; una de ellas sería blindarlo para protegerlo del campo, cuidando que no esté aterrizado, para minimizar la posibilidad de que este sistema actúe como antena que pueda extraer una cantidad significativa de energía.

Lo anterior se puede lograr 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 tanto la dirección del campo eléctrico sea conocida.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

5.2 Modelo de elemento finito

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

5.2.1 Modelo electromagnético

Para comprobar la validez de resultados en el software, y compararlos con la solución analítica, primeramente se modeló la guía de onda vacía. Se consideró la geometría de la guía WR284 (36 X 72mm) en el modo TE_{10} . Se consideraron potencias de 470 a 680 Watts.

Posteriormente para el análisis de calentamiento, se modeló la parte interior de la guía (aire) y el crisol (Figura 5.6). Para poder modelar las paredes de la guía, se definieron éstas como conductoras en las que $E_z=0$. Las condiciones de frontera se muestran en la figura 5.7.

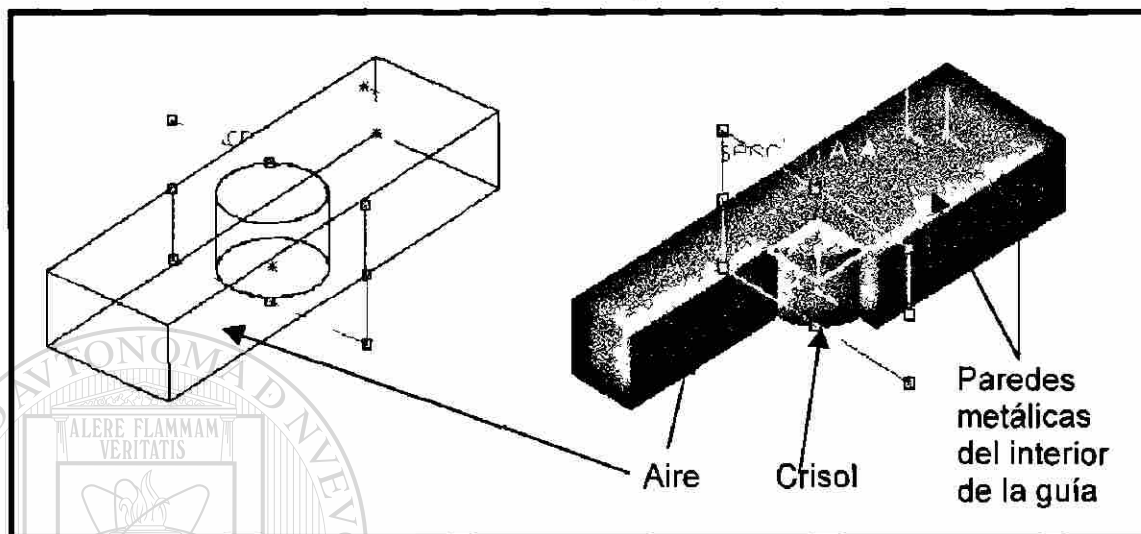


Figura 5.6. Modelo de aire y crisol. Se muestran las paredes metálicas del interior de la guía

Condiciones de frontera

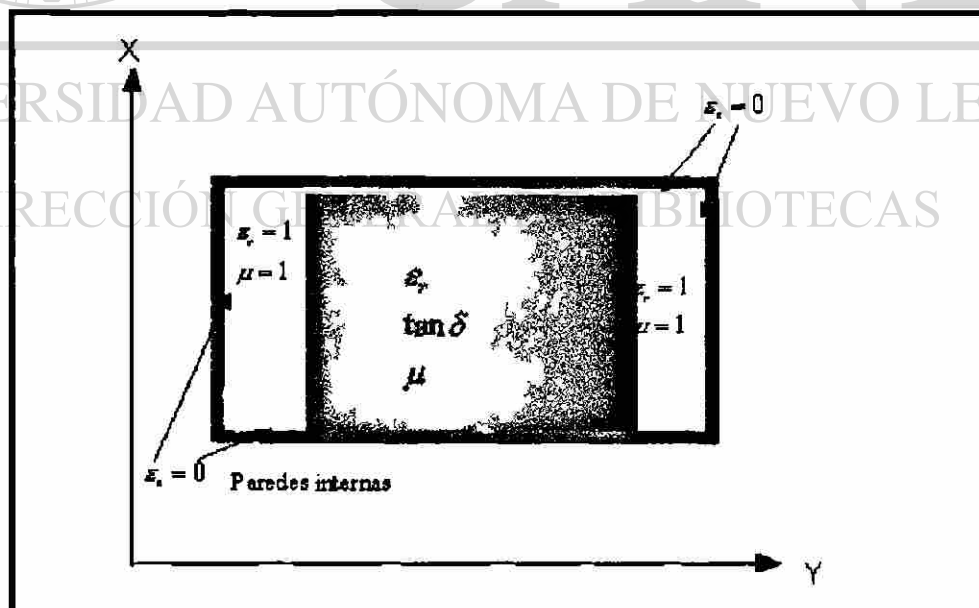


Figura 5.7. Condiciones de frontera para el modelo electromagnético.

La potencia suministrada se puede variar

Se coloca el material con la muestra de tal manera que el campo eléctrico máximo quede al centro de ésta, tal como se describe en la Figura 5.3.

Se realizaron pruebas para determinar una mallado óptimo y que permitiese una buena aproximación de la solución sin consumir demasiado tiempo de procesador. Para este caso, se realizó el análisis con las dimensiones de la guía de 23.2 cm, el crisol en el centro, y un valor único de $\tan\delta$. (Figura 5.8)

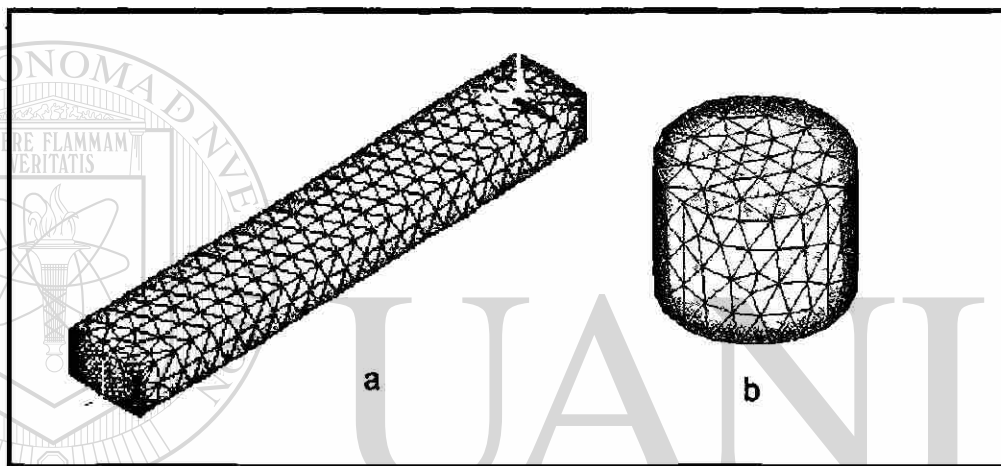


Figura 5.8. Malla para el modelo. a) Guía, b) Cilindro

El análisis siguiente requería de una comparación entre un modelo sin termopares y un modelo con termopares y ver la diferencia en tiempo de procesamiento, absorción de energía de microondas y distribución de campo eléctrico por parte del crisol, para determinar la utilización del modelo más adecuado y simplificado. Para todos los casos se utilizaron condiciones de frontera con paredes eléctricas en la guía, es decir, cero pérdidas en la superficie. Para los termopares, se consideró la resistividad del material a fin de cuantificar la potencia absorbida por los mismos y el autocalentamiento.

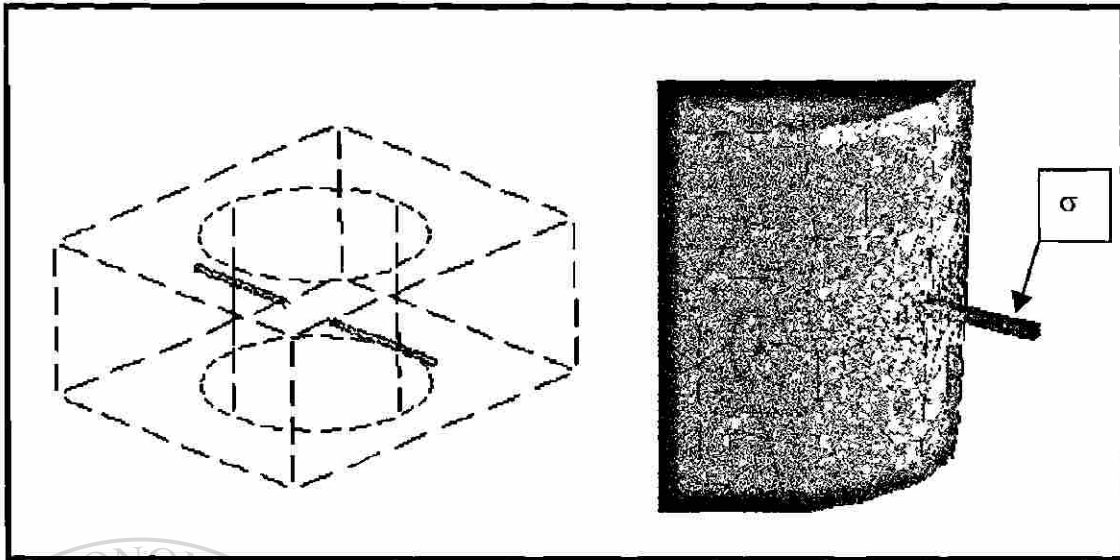


Figura 5.9. Modelo con termopares

5.2.2 Modelo Térmico

El modelo térmico es más simple, ya que solo se utiliza el crisol para el análisis, con las ecuaciones de transferencia de calor y las condiciones de frontera de la Figura 5.10

Las propiedades físicas de la alúmina son [22]:

$$C_p = 1000 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\rho = 2750 \text{ Kg/m}^3$$

y k varía con la temperatura según la figura 5.11

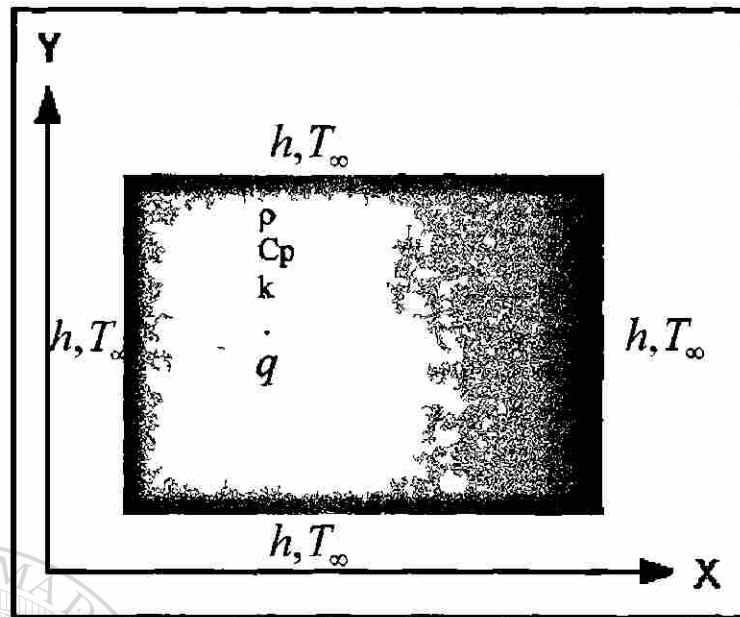


Figura 5.10. Condiciones de frontera del modelo térmico

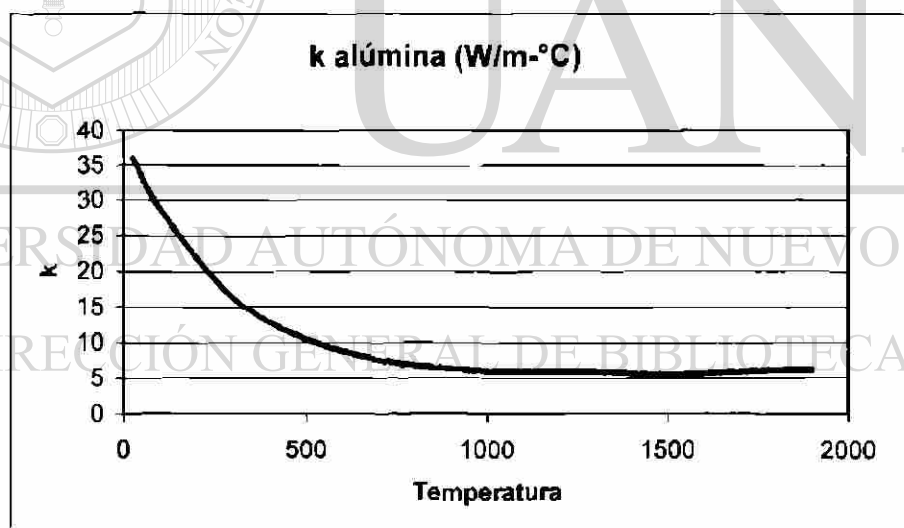


Figura 5.11. Conductividad térmica de la Alúmina

Las condiciones de frontera son:

Generación de calor (del modelo electromagnético)

Condición inicial: Temperatura inicial de 25°C

Coefficiente de convección = 6 W/m²·°C [23]

$T_{\infty} = 25^{\circ}C$

5.3 Análisis acoplado

Para poder llevar a cabo el análisis acoplado (eléctrico-térmico), se desarrolló un programa que resolvía de manera iterativa ambos análisis y combinaba los resultados de ambos.

Se realiza primero el análisis electromagnético y se calcula la absorción de energía. Posteriormente se realiza el análisis térmico y se aplica generación de calor a partir del modelo electromagnético. Se obtienen las temperaturas finales del análisis térmico para un periodo de tiempo (ΔT) determinado.

Posteriormente se actualiza el valor de $\tan \delta$ para las nuevas temperaturas, la Figura 5.12 ilustra este proceso iterativo hasta llegar a la temperatura que se desea analizar.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

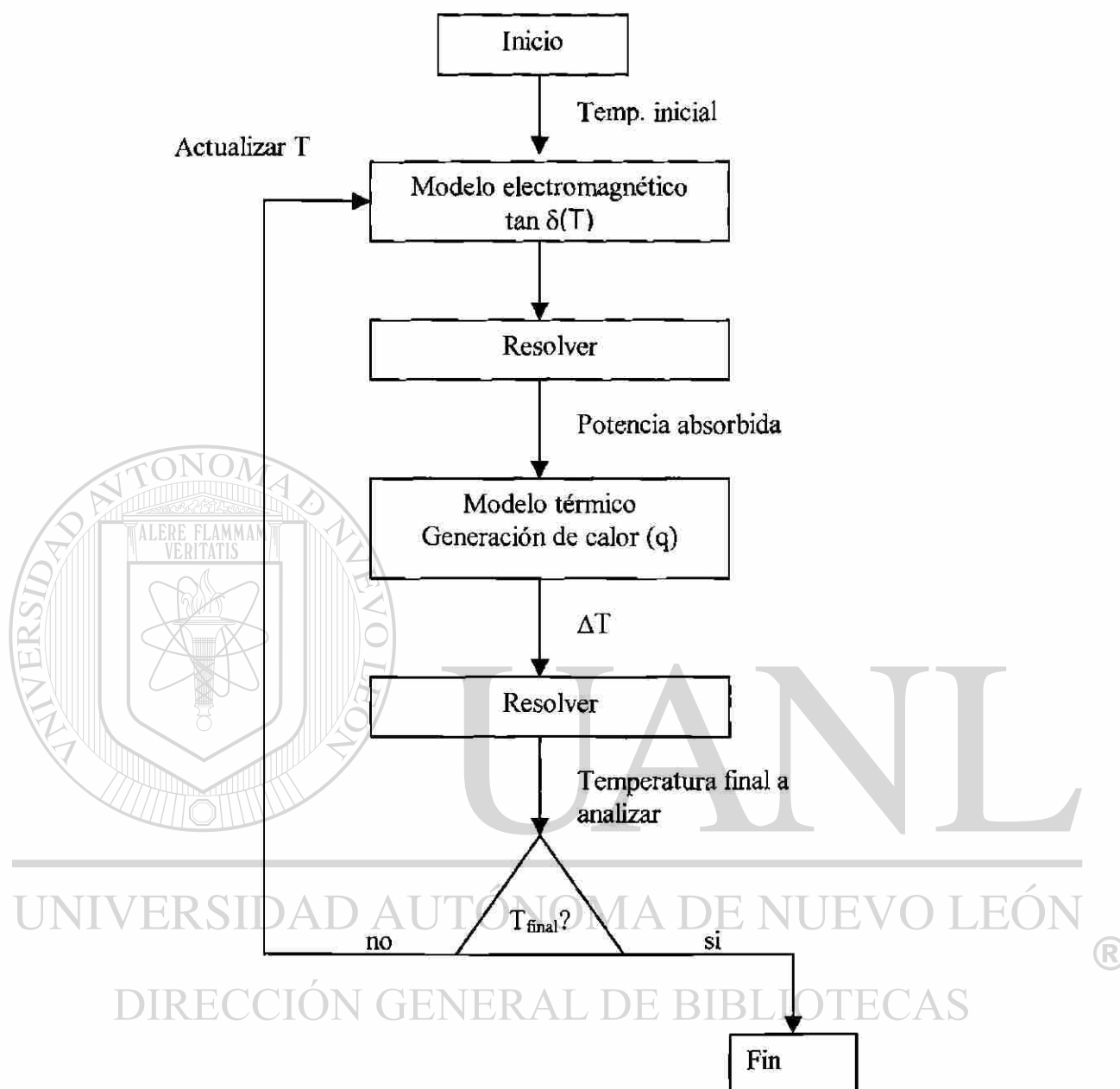


Figura 5.12. Proceso iterativo de solución del modelo acoplado

CAPÍTULO VI

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Modelo físico

6.1.1 Perfil térmico

La Figura 6.1 muestra el perfil de calentamiento de la muestra calentada en la guía de onda. La potencia es de 470 watts en promedio. En este caso, se observa un aumento muy lento en la temperatura hasta alcanzar un rango de temperatura de 320-350°C, posteriormente hay un aumento exponencial de la temperatura. Este fenómeno se debe al cambio de las propiedades dieléctricas del material, en particular $\tan \delta$.

Para el caso de la potencia absorbida, se presenta el mismo fenómeno, lo cual se puede observar en la Figura 6.2. En este caso de acuerdo a la ecuación 16, la potencia aumenta en proporción al valor de la magnitud del campo eléctrico y de $\tan \delta$.

Las figuras 6.3 y 6.4 muestran el perfil de calentamiento y potencia absorbida de una muestra calentada en la guía de onda, pero a una potencia promedio de 680 watts. La zona que se presenta entre los 400 a 800 segundos, se debe a que se desconectaba súbitamente el generador y se volvía a conectar, esto a fin de comprobar de que la medición en los termopares no se ve afectada, lo cual se corrobora porque no presenta ninguna discontinuidad en

el perfil de temperaturas, ni comportamiento errático alguno, por lo que la medición es confiable.

Se presenta el mismo fenómeno que en el caso anterior, es decir, un aumento lento, hasta presentarse el disparo térmico alrededor de los 320-350°C.

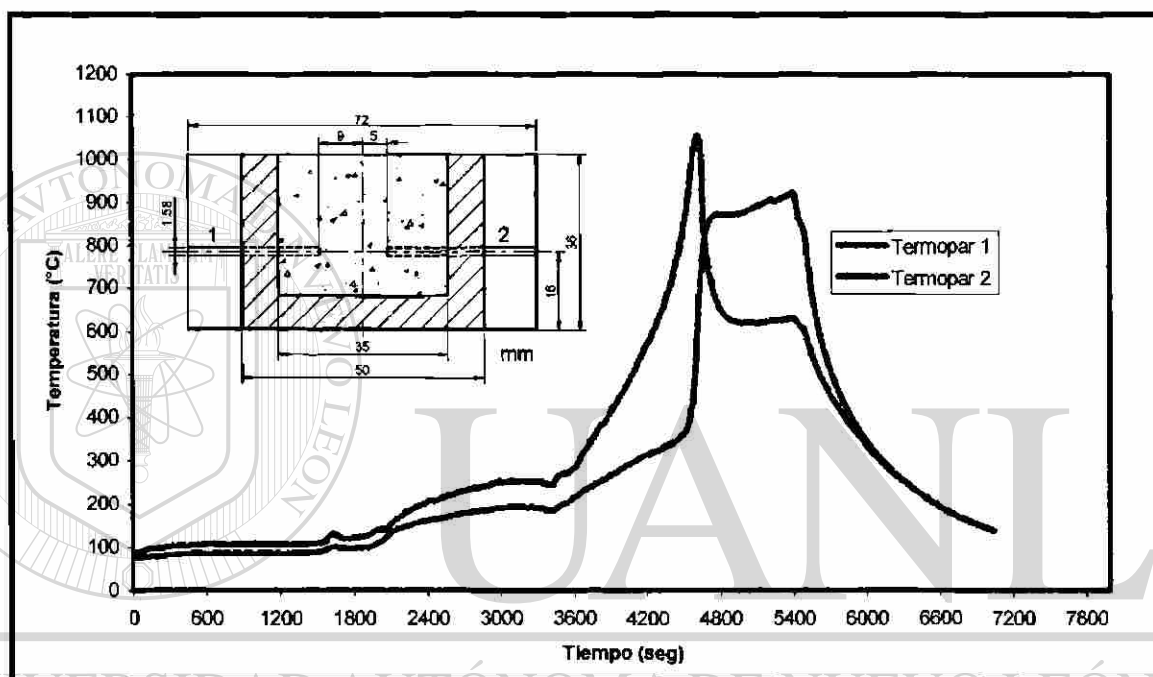


Figura 6.1. Perfil térmico experimental de la muestra calentada a 470 watts

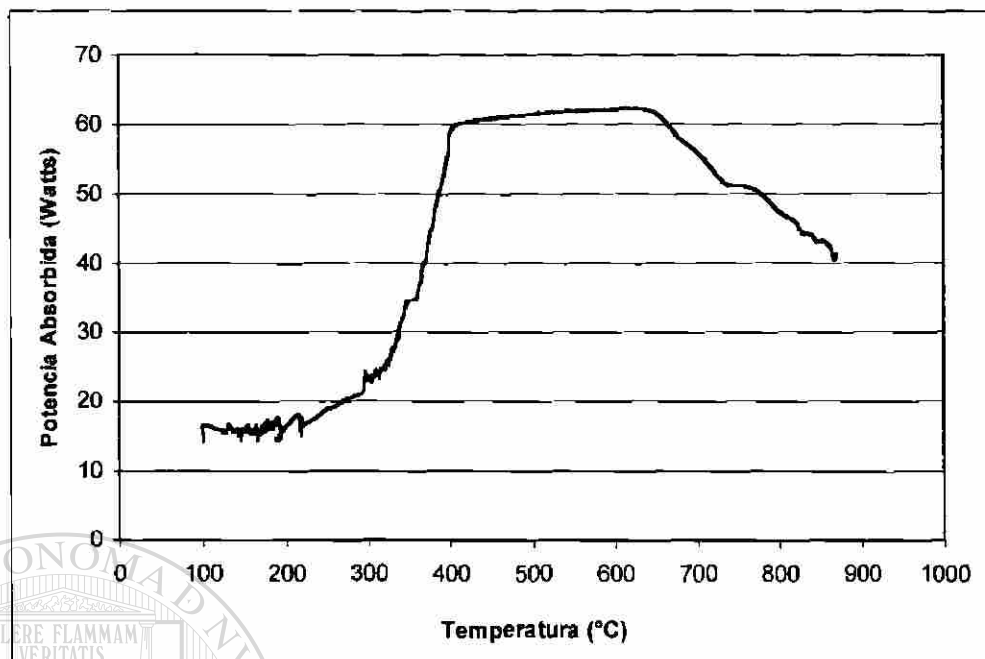


Figura 6.2. Potencia absorbida de la muestra a 470 Watts

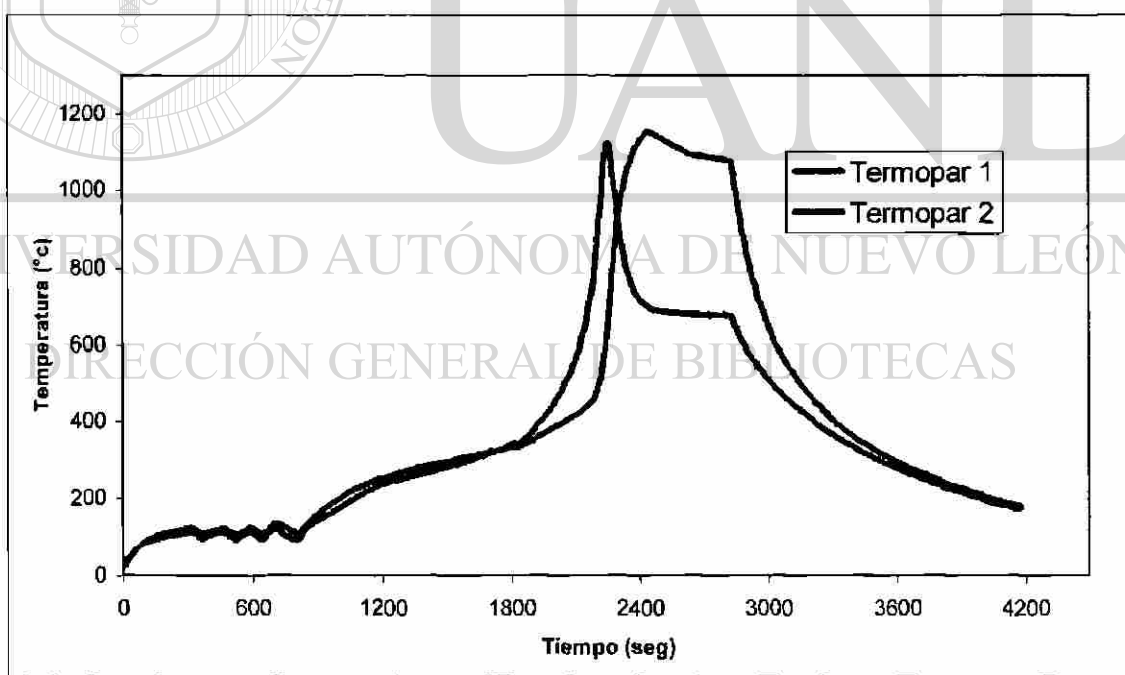


Figura 6.3. Perfil térmico experimental de la muestra calentada a 680 watts

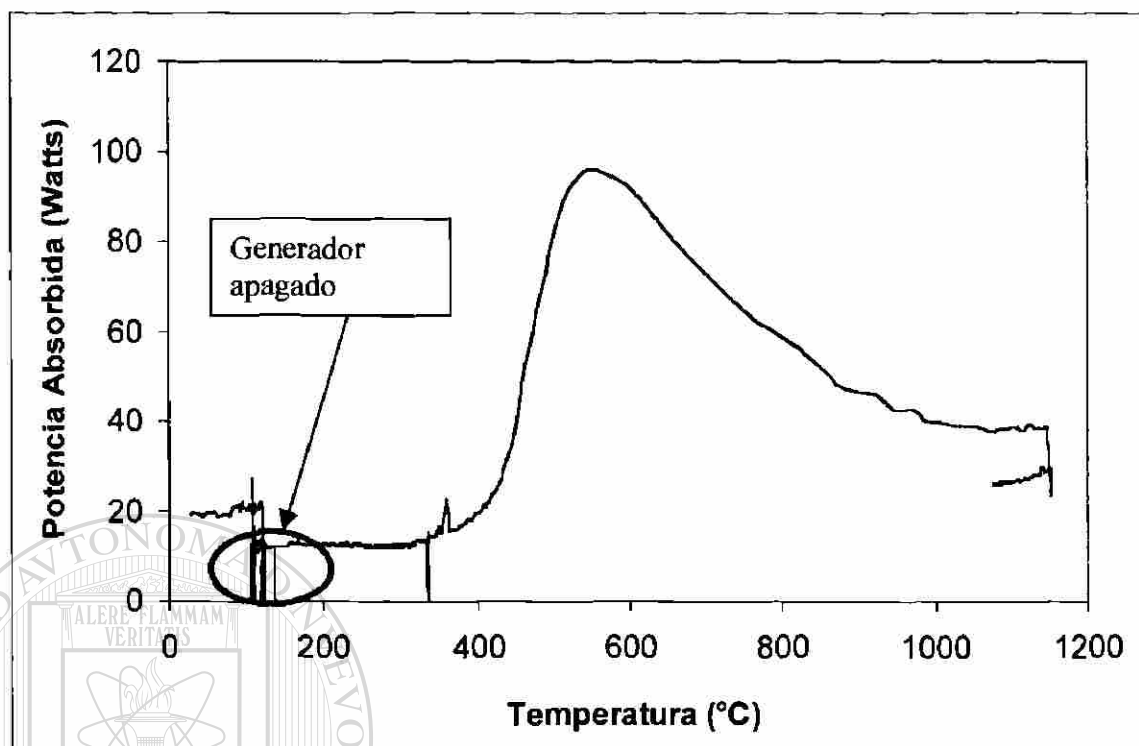


Figura 6.4. Potencia absorbida de la muestra a 680 Watts. Experimental

6.1.2 Obtención de propiedades dieléctricas

A partir de estos datos experimentales, se puede obtener información para estimar el valor de las propiedades dieléctricas del material. Los valores experimentales de ϵ'' se muestran en la Figura 6.5. Este valor fue estimado a partir de la onda estacionaria durante el calentamiento de la muestra en el cuál se registraron simultáneamente la temperatura y la magnitud del campo eléctrico [6].

Los valores que se reportan en la literatura para ϵ' de la alúmina varían entre 5 y 10 [17]. Dado que $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$; esta variación hace que $\tan \delta$ varíe entre uno y tres ordenes de magnitud. Además es necesario considerar que la estimación de ϵ'' (que por cierto no es el objetivo de este trabajo), se hace a

partir del análisis de la onda suponiendo temperatura uniforme en la muestra, obtenida a partir del promedio de las lecturas de los termopares. Esta situación aunada al hecho de que el material se encuentra en polvo, hace muy difícil determinar el valor de esta propiedad. Sin embargo, el contar con un modelo valuado en su parte física y el tener resultados experimentales hace posible estimar el valor de $\tan \delta$ a partir del modelo.

Para esto se requiere que el modelo reproduzca inicialmente el comportamiento térmico del sistema, lo que significa que la descripción matemática del modelo físico es correcto y luego ajustar los valores de $\tan \delta$ que también deben seguir un comportamiento coherente con las observaciones experimentales a diferentes temperaturas.

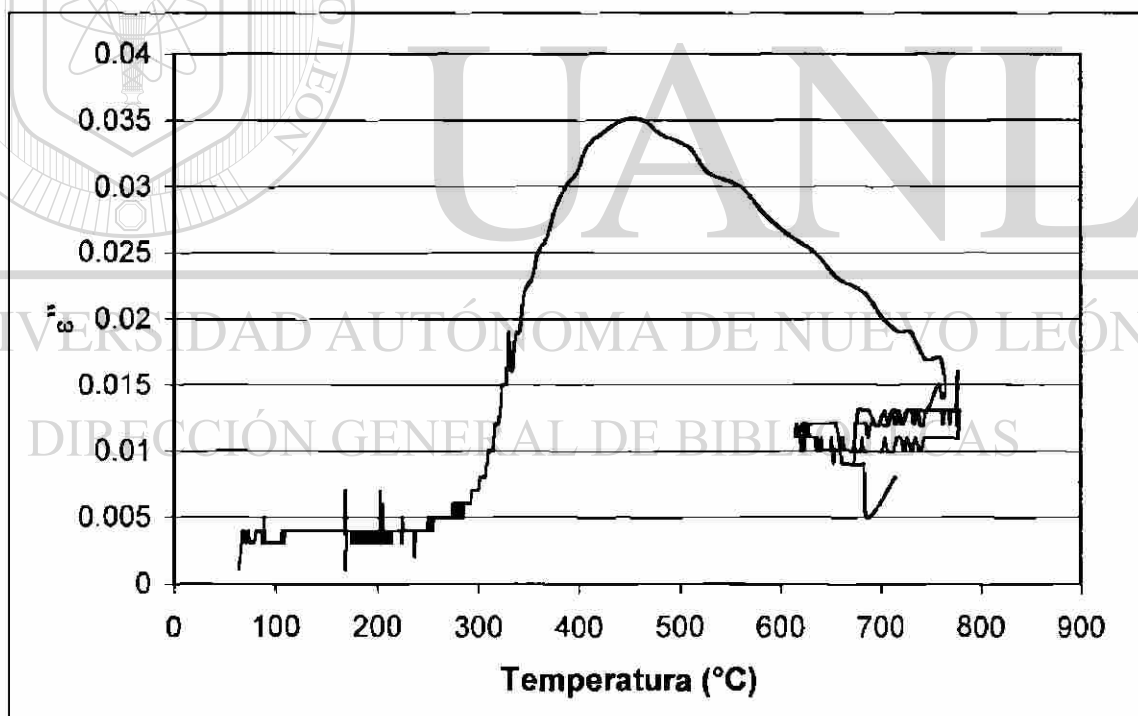


Figura 6.5. Valores experimentales de ϵ''

Para calcular los valores de $\tan \delta$, se utiliza la ecuación 18. Los valores de ϵ' se encuentran entre 5 y 10 para este material [16]. Con estos valores de $\tan \delta$, se puede realizar el análisis por elemento finito y hacer una comparación entre el modelo experimental y el modelo teórico.

6.2 Modelo de elemento finito

6.2.1 Guía vacía

Este modelo se utiliza como referencia para saber si los resultados obtenidos con en software concuerdan los obtenidos analíticamente.

Primeramente, la Figura 6.6 muestra la distribución del campo eléctrico a través de la guía de onda. Se puede observar la distribución senoidal de la misma. Esta distribución es igual para cualquier potencia aplicada, lo que varía es la magnitud del campo eléctrico.

Para los valores de campo eléctrico, se realizó el cálculo analítico para 470 y 680 Watts. La comparación de resultados respecto al modelo de elemento finito se muestra en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Magnitud de campo eléctrico en la guía

Potencia aplicada (Watts)	Campo eléctrico máximo (V/m)		Dif. %
	Analítico	Elemento finito	
470	21133	22225	4.9
680	25419	26733	4.9

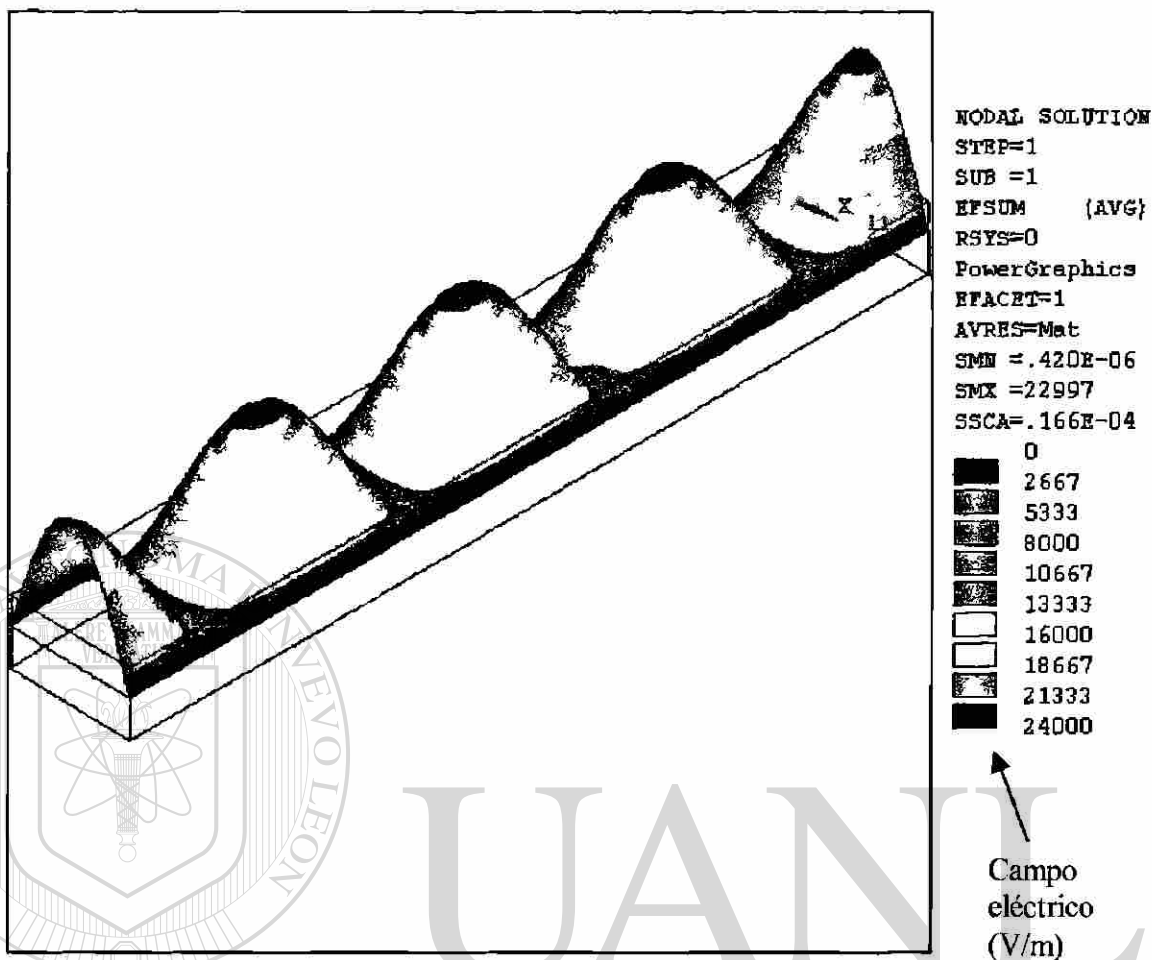


Figura 6.6. Distribución del campo eléctrico en la guía vacía (470 W)

Por otra parte, la longitud de onda dentro de la guía concuerda con la calculada analíticamente.

La Figura 6.7 muestra la distribución del campo eléctrico dentro de la guía y el valor de la longitud de onda dentro de la misma. Los cálculos del campo eléctrico y longitud de onda se encuentran en el anexo 2.

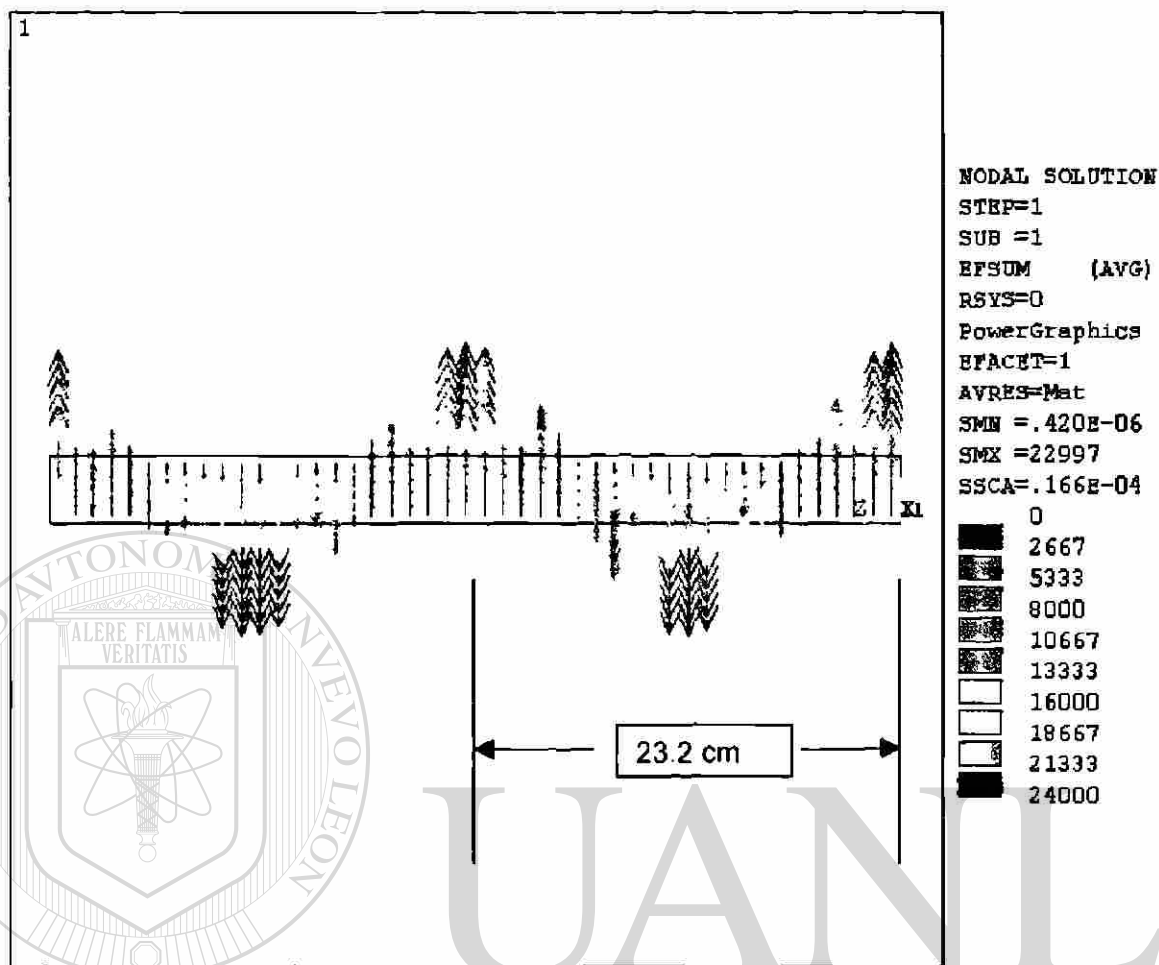


Figura 6.7. Longitud de onda del campo eléctrico en la guía

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

6.2.2 Campo eléctrico en la guía con muestra y termopares

La distribución del campo eléctrico en la guía para una potencia de 470 watts con la muestra dentro de la misma se muestra en las figura 6.8.

Se puede observar que la magnitud del campo eléctrico se aproxima a valores de la misma magnitud para la guía sola. Lo que significa que se puede considerar que la onda es estacionaria y que el análisis de ésta es válido.

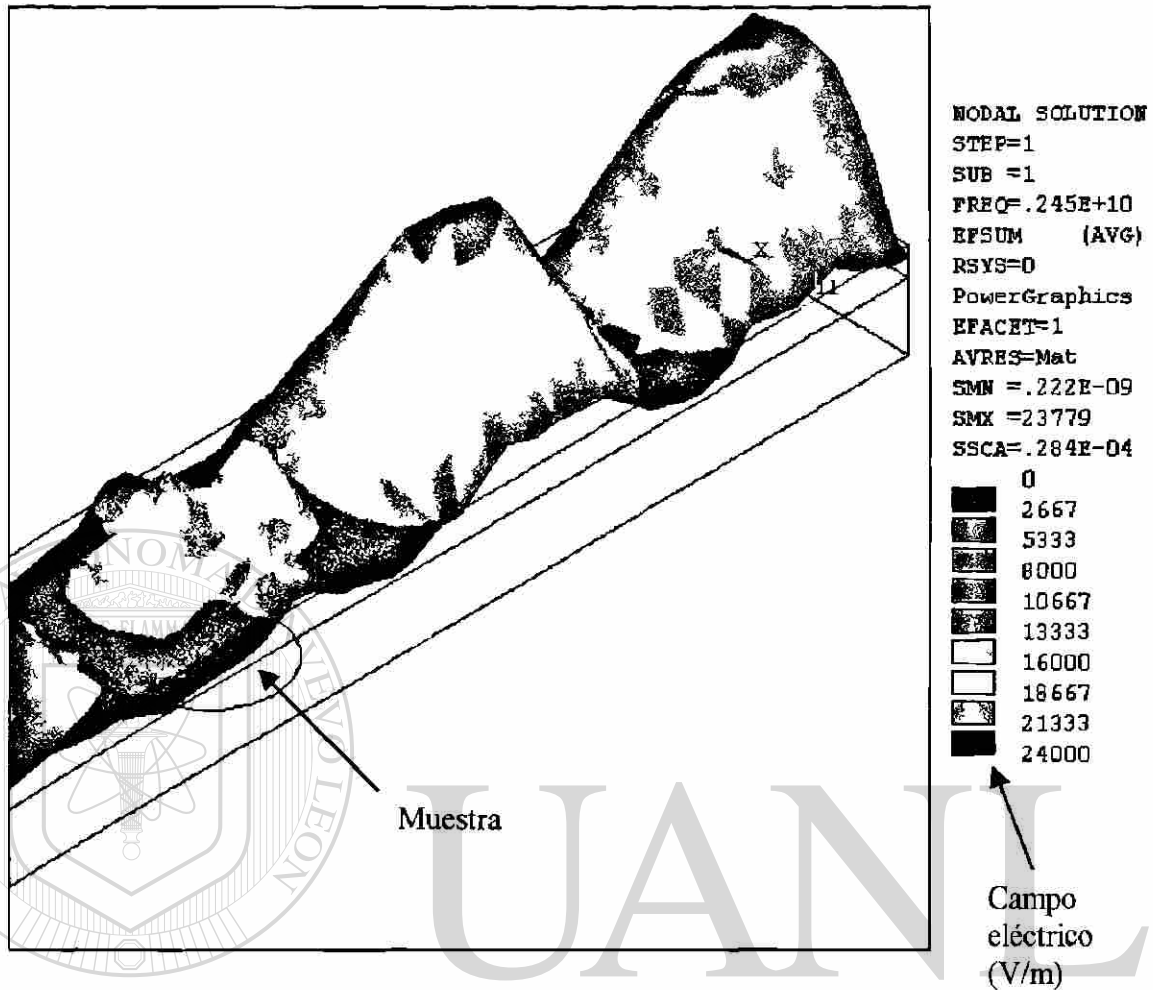
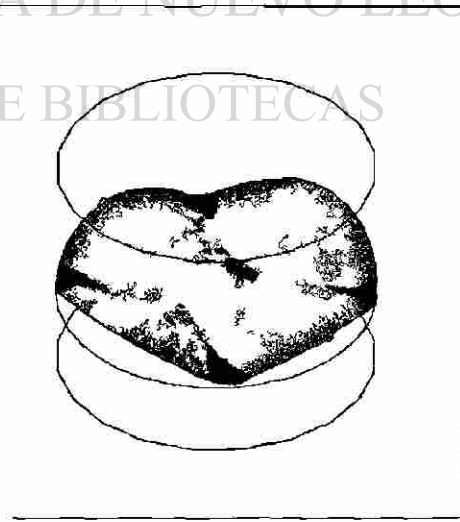
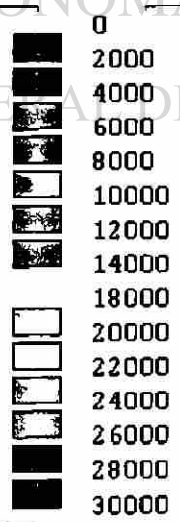
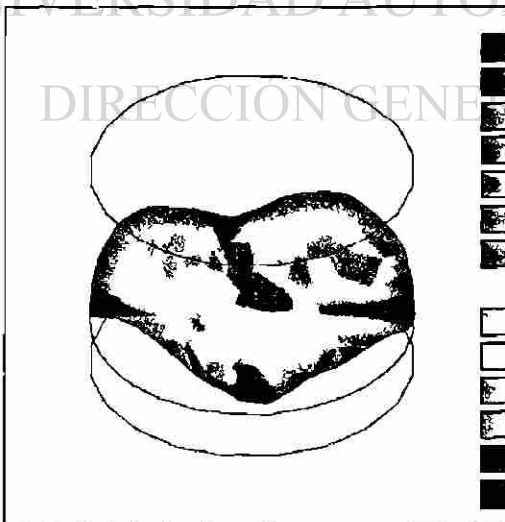
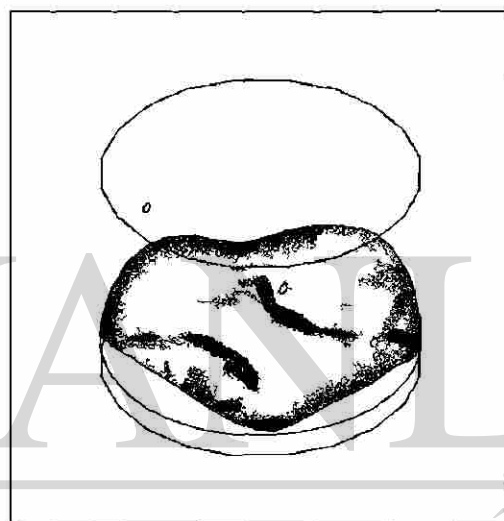
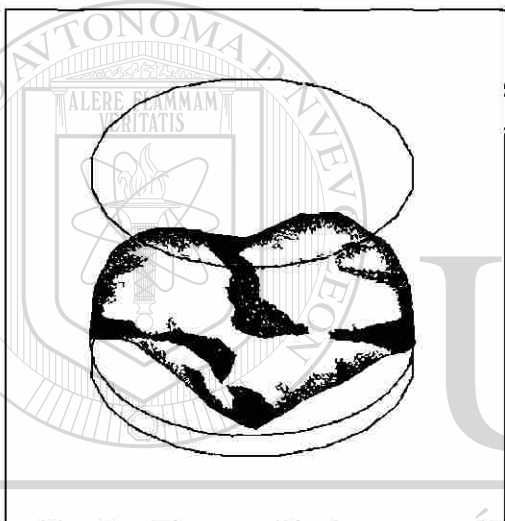
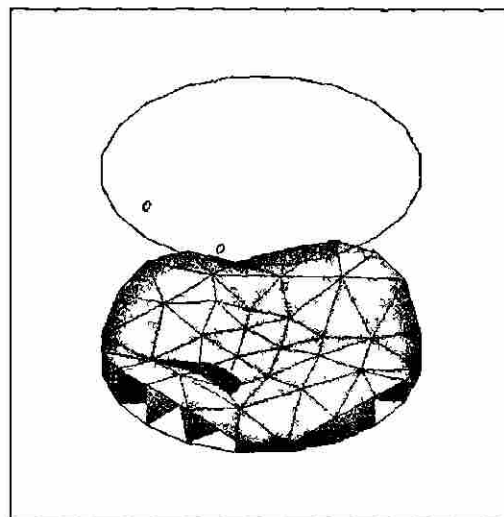
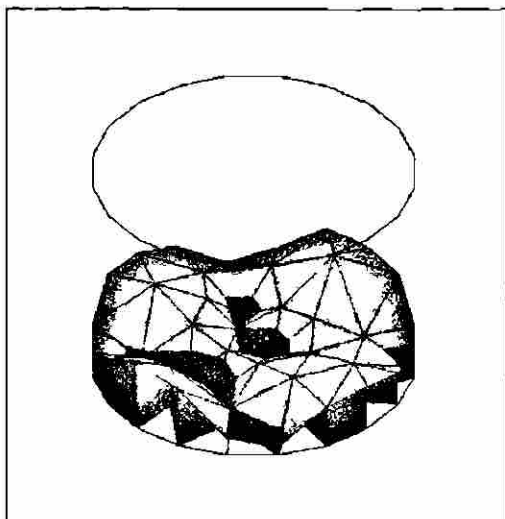


Figura 6.8. Distribución del campo eléctrico dentro de la guía con muestra (470 W).

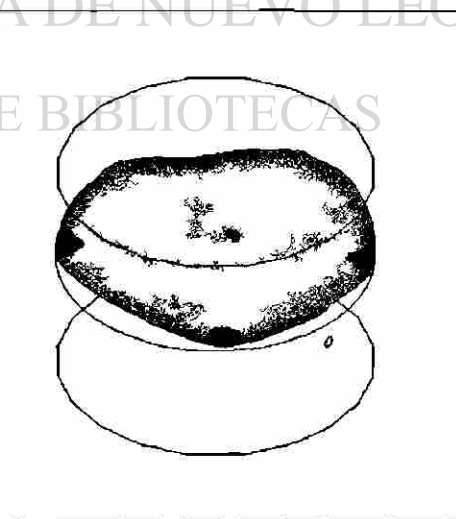
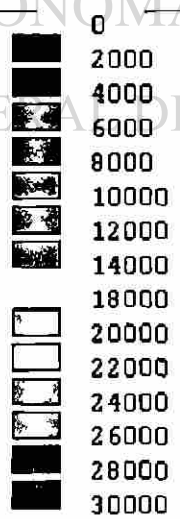
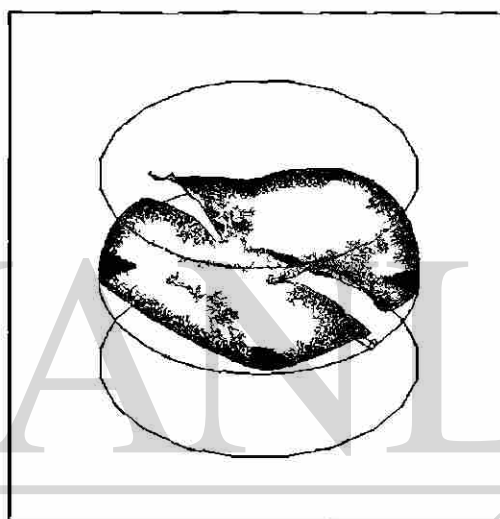
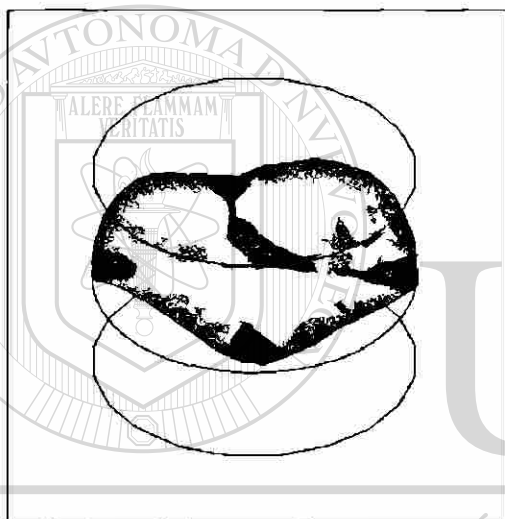
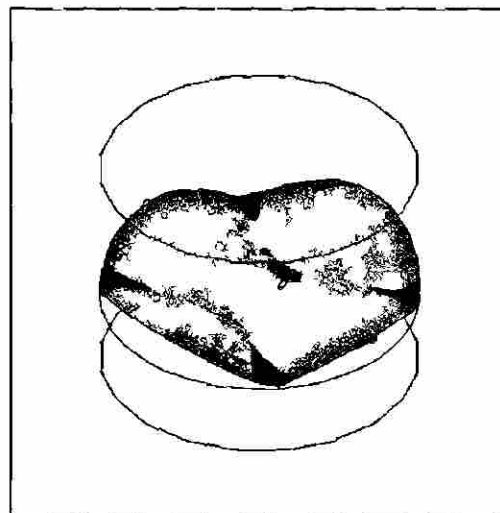
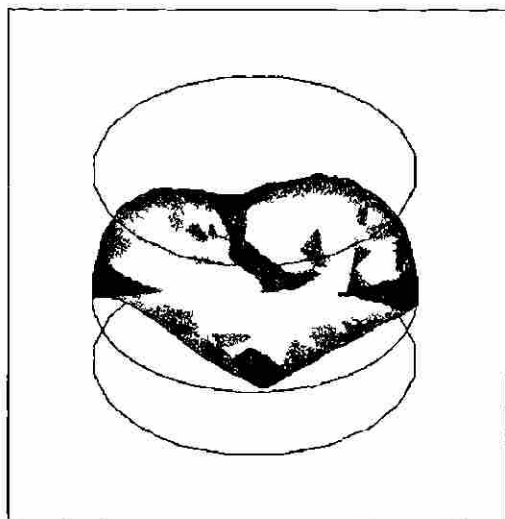
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Para tener una idea clara del como afectan los termopares en la distribución del campo eléctrico, se muestra una secuencia de la distribución del campo eléctrico a través de la muestra en las dos condiciones analizadas: a) sin termopares, b) con termopares. Este análisis corresponde a la muestra expuesta a 470 Watts. (Figura 6.9)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
ALERE PERAMAM
VERITATIS
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

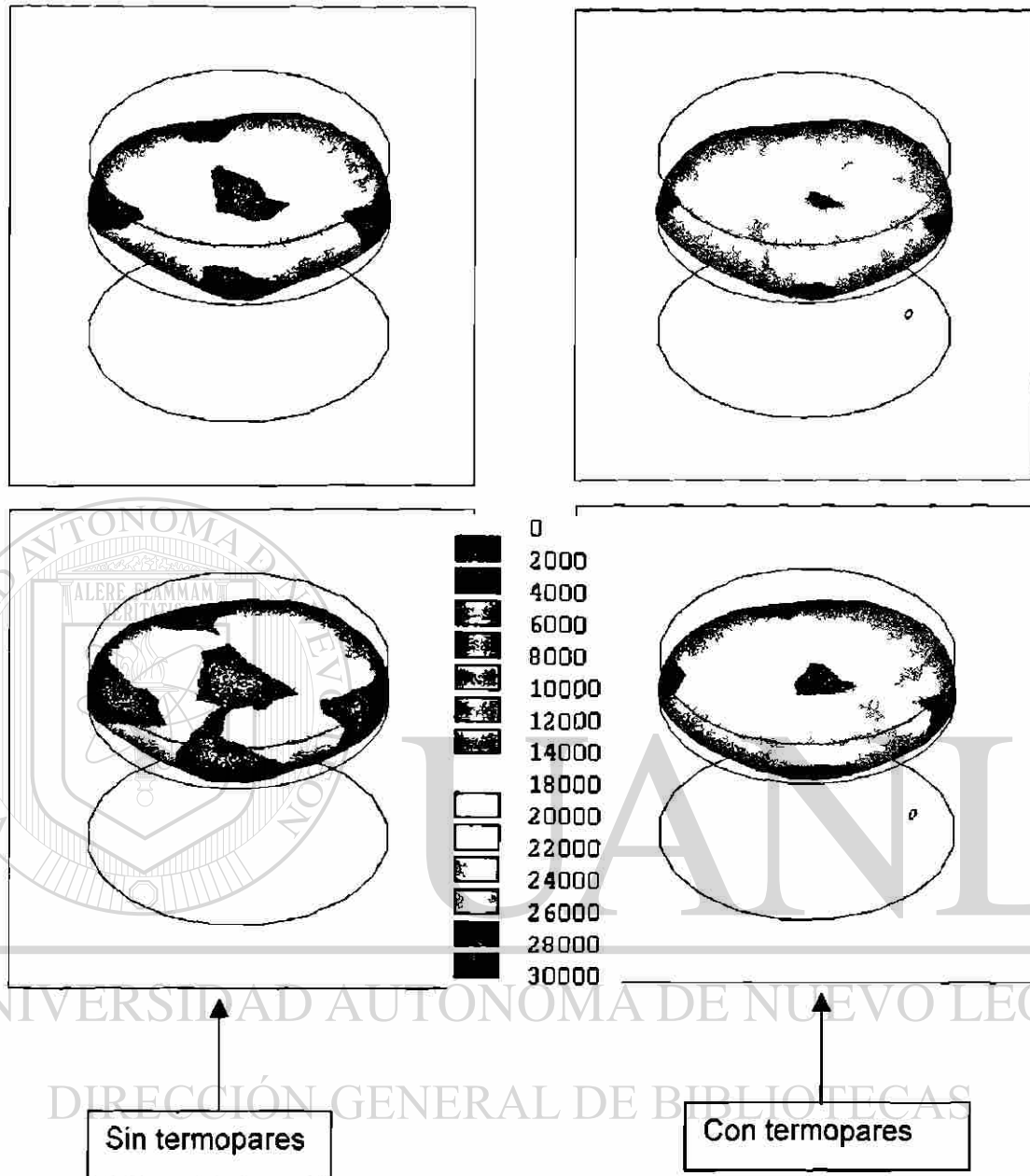


Figura 6.9 . Distribución del campo eléctrico en la muestra. Modelo de elemento finito

La columna izquierda es del modelo sin termopares, la columna derecha para el modelo con termopares. La Banda de colores, representa la magnitud del campo eléctrico en V/m.

De acuerdo a la secuencia de la Figura 6.9, se puede notar que la presencia de termopares no afecta significativamente la magnitud y distribución del campo eléctrico. Aparentemente se aprecia que éste aumenta en la interfase. La mayor distorsión solo se presenta en una sección localizada cerca de los termopares (Figura 6.10), pero sin producir autocalentamiento.

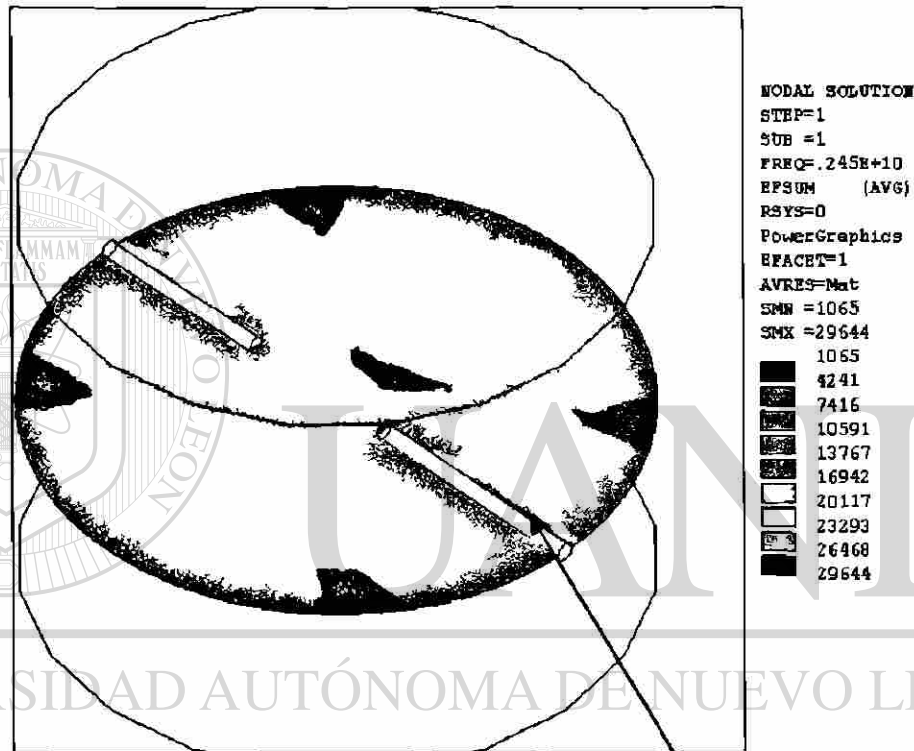


Figura 6.10. Campo eléctrico en la interfase del los termopares con la muestra. La flecha indica la mayor magnitud del campo eléctrico

La mejor forma de demostrar lo anterior es comparar la potencia absorbida por la muestra en ambas condiciones: sin termopares y con termopares.

6.2.3 Potencia absorbida

Para el cálculo de la potencia absorbida, se utiliza un macro en el programa que puede calcular la potencia absorbida por un material dieléctrico en presencia de un campo eléctrico. La forma de calcular la potencia absorbida es utilizando la ecuación 1 en cada elemento y posteriormente se calcula el valor final sumando la potencia absorbida de cada elemento individual.

La ventaja de esto, es que se puede ver la “distribución” de la energía absorbida en toda la muestra y no solo el valor total. (Figura 6.11).

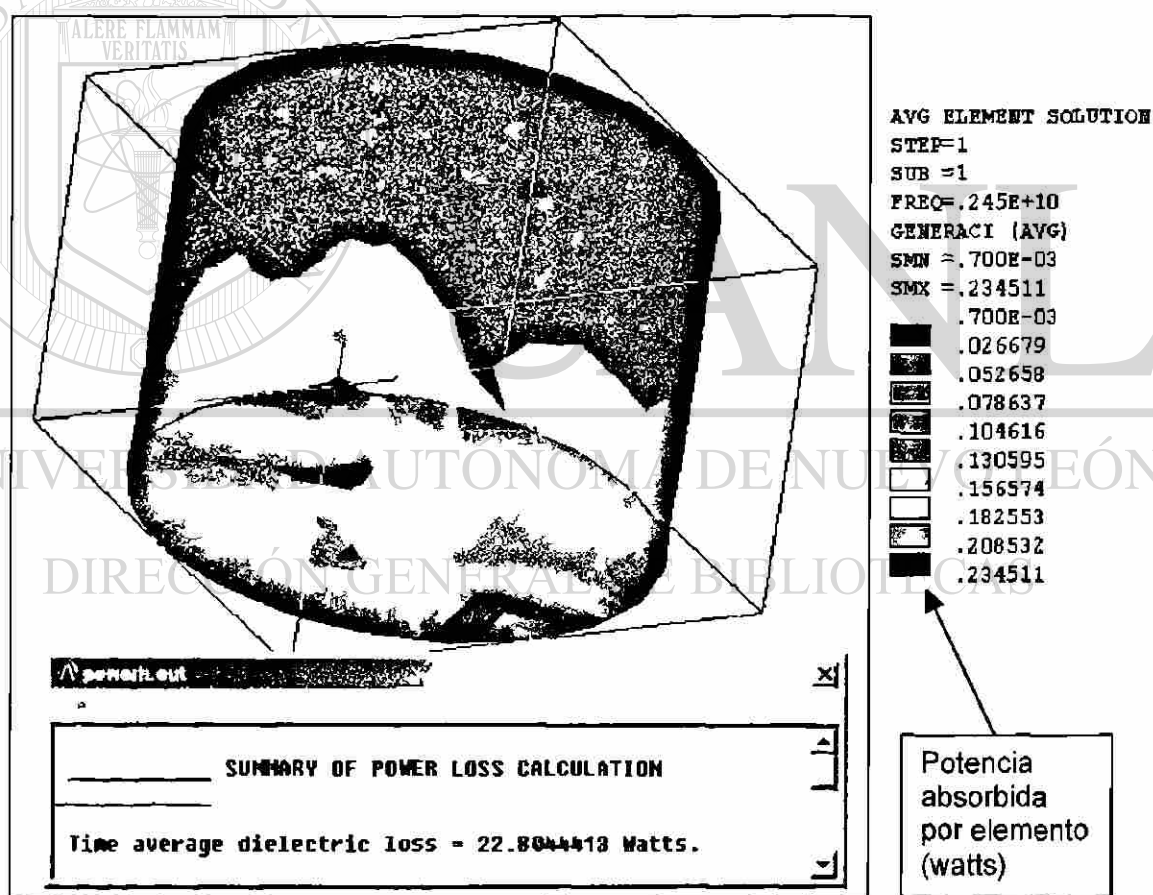


Figura 6.11. Potencia absorbida por la muestra

La figura 6.12, muestra una gráfica donde se comparan las diferentes potencias absorbidas para los análisis: sin y con termopares. Los valores de δ son los mismos para los dos análisis.

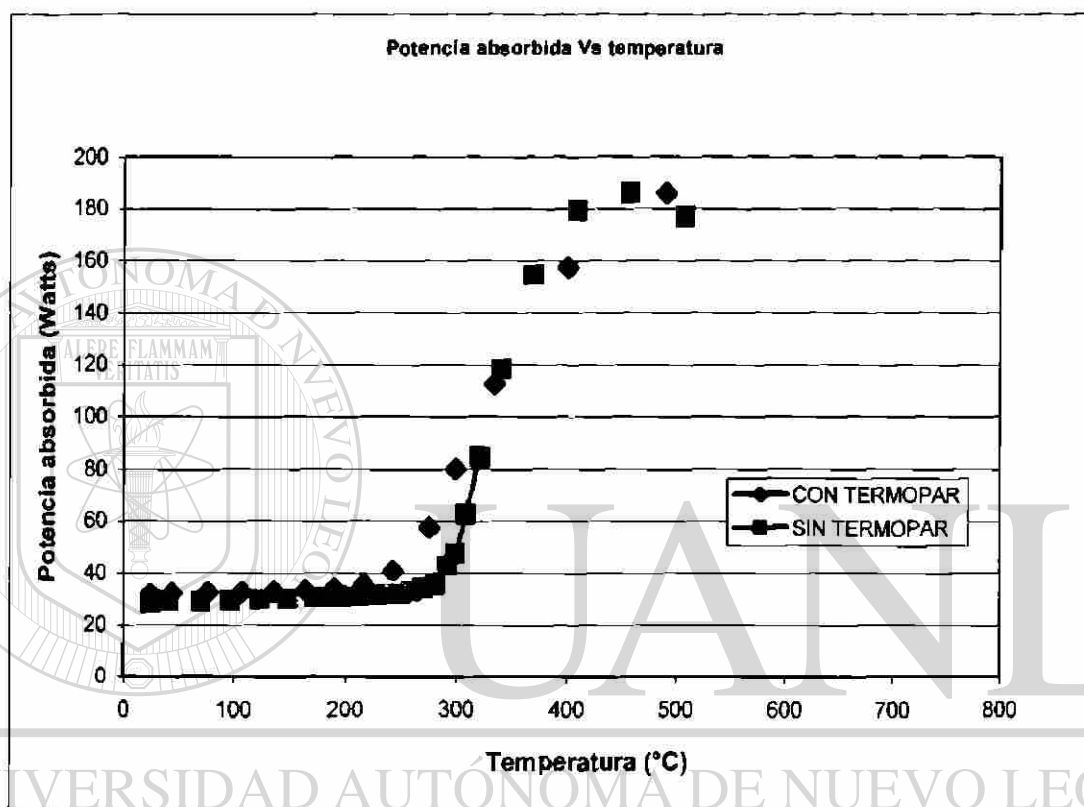


Figura 6.12. Potencias absorbidas

De la grafica anterior, el error calculado al inicio del calentamiento, es decir, antes de que la muestra se vuelva absorbente es de aproximadamente del 6 al 8%. Esto quiere decir que el análisis sin termopar es una muy buena aproximación del modelo real si consideramos que las propiedades del material no cambian con la temperatura. Este argumento justificaria la tendencia a no incluir este efecto en los análisis.

Sin embargo, dado que $\tan \delta$ depende de la temperatura, la consideración de los termopares influye con el momento en que se presenta corrimiento térmico (aumento exponencial de la temperatura) como se puede ver en el rango de los 250 a 330 °C ,en que la muestra con termopares absorbe potencia un poco más rápido.

6.2.4 Temperaturas alcanzadas

El perfil de calentamiento depende de la potencia absorbida debido a la magnitud del campo eléctrico y de las propiedades del material.

Para poder realizar una comparación, primero se hizo un análisis con las propiedades dieléctricas obtenidas a partir de los experimentos (Figura 6.5). Posteriormente se realizó un ajuste de dichos valores para tratar de ajustar al perfil de calentamiento.

La figuras 6.13 y 6.14 muestran el perfil térmico de una muestra a 470 watts. Se puede observar que el perfil térmico corresponde a la distribución del campo eléctrico (Figura 6.8) y potencia absorbida (Figura 6.11). Esto corrobora la veracidad del modelo, ya que se está modelando en forma completa el campo eléctrico. A diferencia de otros modelos, en los cuales éste se supone constante dentro de la muestra ya que normalmente esta técnica se utiliza para muestras pequeñas o con un perfil definido teóricamente.

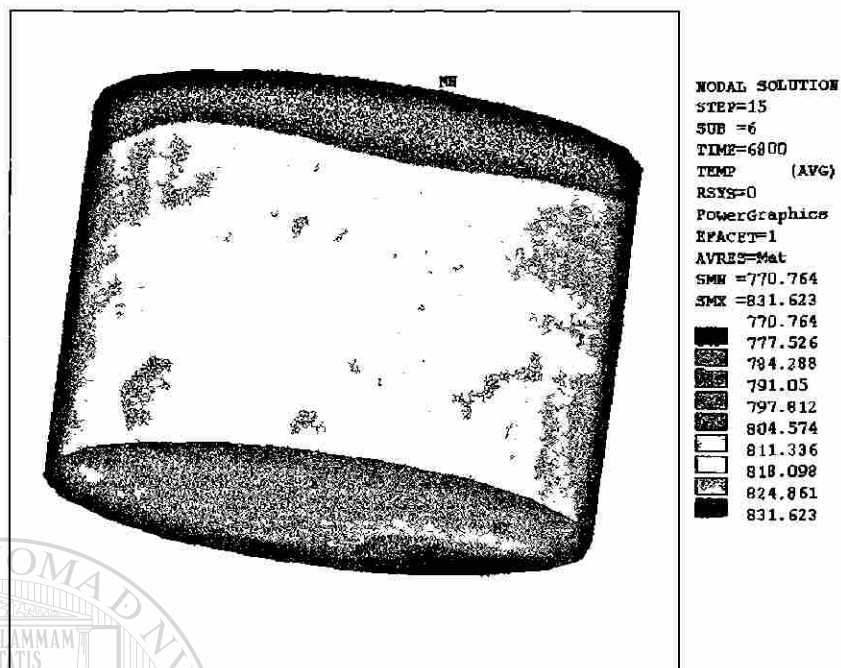


Figura 6.13. Distribución de temperaturas en la muestra sin termopares

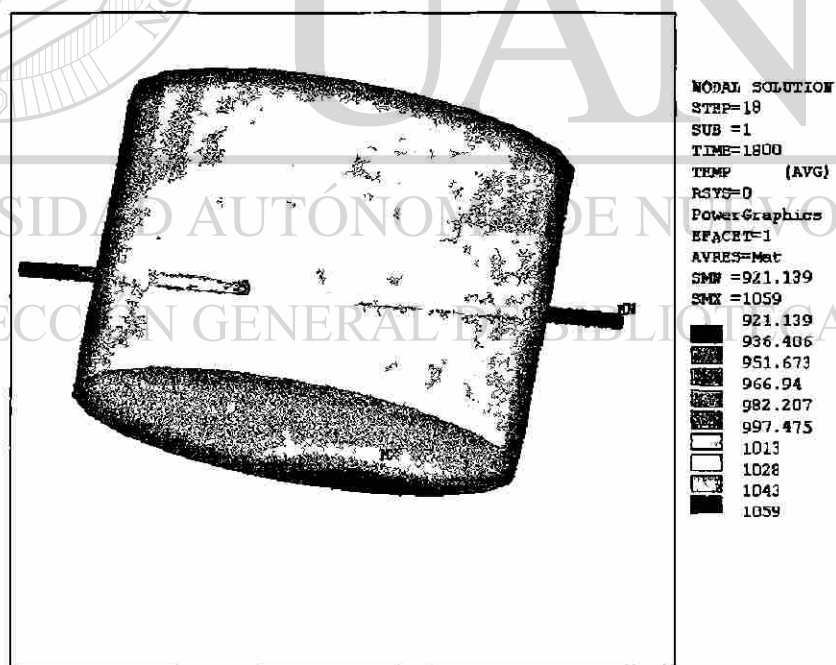


Figura 6.14 Distribución de temperaturas en la muestra con termopares

La figura 6.15 muestra el perfil térmico de la muestra calentada a 470 Watts. Las diferentes curvas muestran diferentes perfiles de calentamiento, las cuales se comparan con los datos experimentales. Estos perfiles de calentamiento corresponden a diferentes curvas de $\tan \delta$ para la alúmina buscando el valor óptimo que se ajuste a la curva de calentamiento experimental. Los valores ajustado se presentan la tabla 6.2.

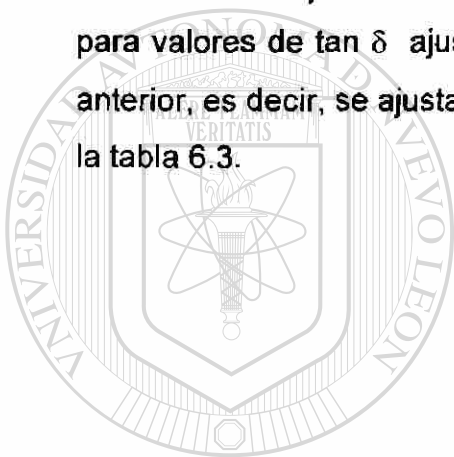
Tabla 6.2. Valores de $\tan \delta$ para análisis a 470 watts

	A	B	C	D
Temperatura	Tan δ	Tan δ	Tan δ	Tan δ
25	0.004	0.0032	0.0028	0.0024
250	0.004	0.0032	0.0028	0.0024
280	0.005	0.004	0.0035	0.003
300	0.007	0.0056	0.0049	0.0042
321	0.013	0.0104	0.0091	0.0078
326	0.015	0.012	0.0105	0.009
340	0.019	0.0152	0.0133	0.0114
345	0.022	0.0176	0.0154	0.0132
359	0.025	0.02	0.0175	0.015
374	0.028	0.0224	0.0196	0.0168
386	0.03	0.024	0.021	0.018
408	0.033	0.0264	0.0231	0.0198
422	0.034	0.0272	0.0238	0.0204
443	0.035	0.028	0.0245	0.021
462	0.035	0.028	0.0245	0.021
480	0.034	0.0272	0.0238	0.0204
500	0.033	0.0264	0.0231	0.0198
560	0.03	0.024	0.021	0.018
600	0.026	0.0208	0.0182	0.0156
700	0.02	0.016	0.014	0.012
800	0.013	0.0104	0.0091	0.0078
900	0.01	0.008	0.007	0.006
1000	0.007	0.0056	0.0049	0.0042
1100	0.005	0.004	0.0035	0.003

Los valores experimentales se obtuvieron en los termopares 1 y 2, representados con E y F respectivamente

Se puede ver que el perfil de calentamiento se aproxima al perfil experimental conforme aumenta el valor de $\tan \delta$. Para todos los casos, se tomaron las temperaturas en los puntos de mayor temperatura.

Se calentó la muestra a una potencia mayor, es de esperar que la rapidez de calentamiento será mayor. Esto se muestra en las figura 6.16, la cual muestra el perfil de calentamiento para la muestra calentada a 680 Watts, para valores de $\tan \delta$ ajustados. Se procedió de igual manera que en el caso anterior, es decir, se ajustaron los valores de $\tan \delta$. Los valores se presentan en la tabla 6.3.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Tabla 6.3. Valores de $\tan \delta$ para análisis a 680 watts.

	A	B	C	D	E
Temp.	Tan δ	Tan δ	Tan δ	Tan δ	Tan δ
25	0.0056	0.004	0.0032	0.0028	0.0024
250	0.0056	0.004	0.0032	0.0028	0.0024
280	0.007	0.005	0.004	0.0035	0.003
300	0.0098	0.007	0.0056	0.0049	0.0042
321	0.0182	0.013	0.0104	0.0091	0.0078
326	0.021	0.015	0.012	0.0105	0.009
340	0.0266	0.019	0.0152	0.0133	0.0114
345	0.0308	0.022	0.0176	0.0154	0.0132
359	0.035	0.025	0.02	0.0175	0.015
374	0.0392	0.028	0.0224	0.0196	0.0168
386	0.042	0.03	0.024	0.021	0.018
408	0.0462	0.033	0.0264	0.0231	0.0198
422	0.0476	0.034	0.0272	0.0238	0.0204
443	0.049	0.035	0.028	0.0245	0.021
462	0.049	0.035	0.028	0.0245	0.021
480	0.0476	0.034	0.0272	0.0238	0.0204
500	0.0462	0.033	0.0264	0.0231	0.0198
560	0.042	0.03	0.024	0.021	0.018
600	0.0364	0.026	0.0208	0.0182	0.0156
700	0.028	0.02	0.016	0.014	0.012
800	0.0182	0.013	0.0104	0.0091	0.0078
900	0.014	0.01	0.008	0.007	0.006
1000	0.0098	0.007	0.0056	0.0049	0.0042
1100	0.007	0.005	0.004	0.0035	0.003

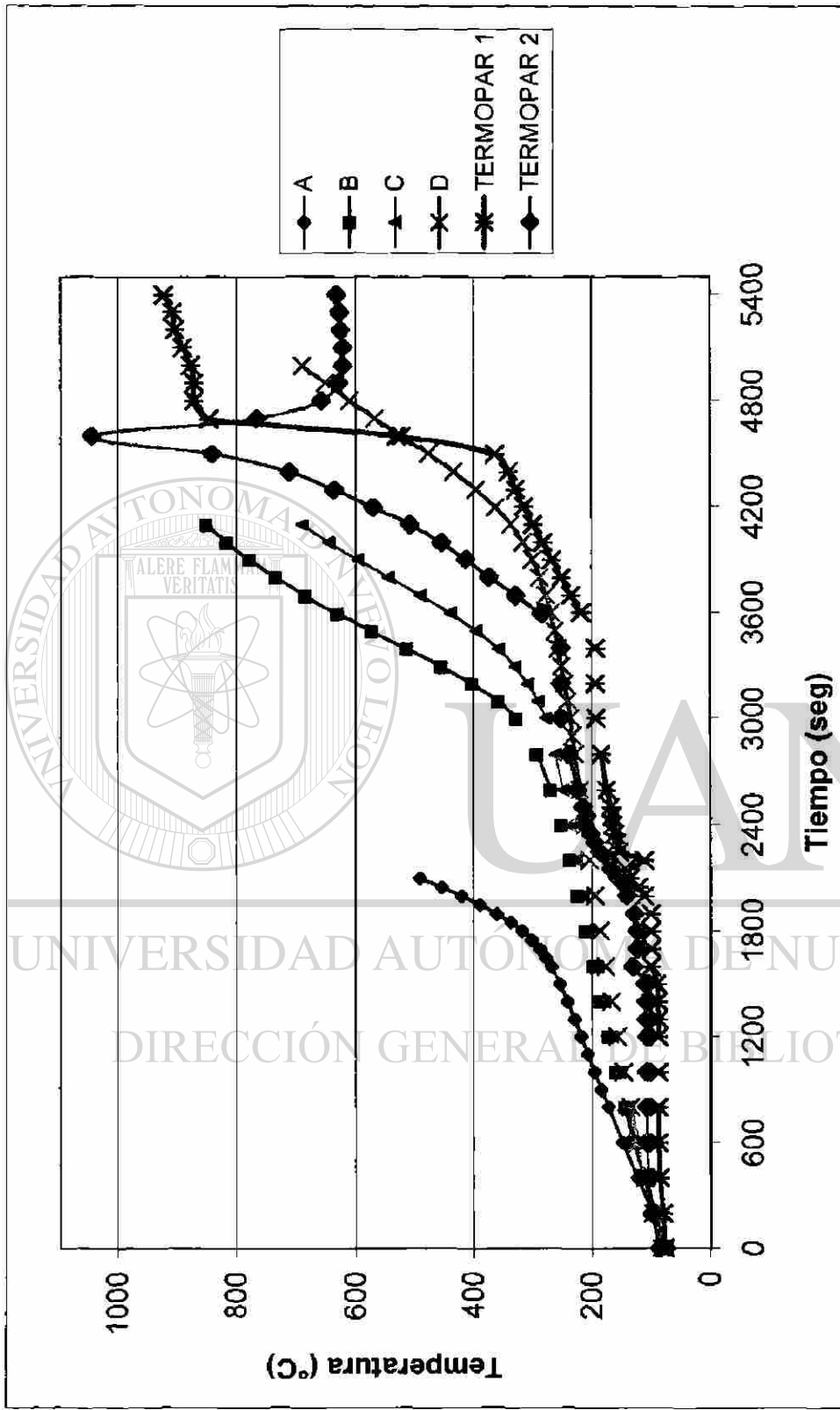


Figura 6.15 Perfiles térmicos a diferentes valores de $\tan \delta$ y comparación con experimental (470Watts)

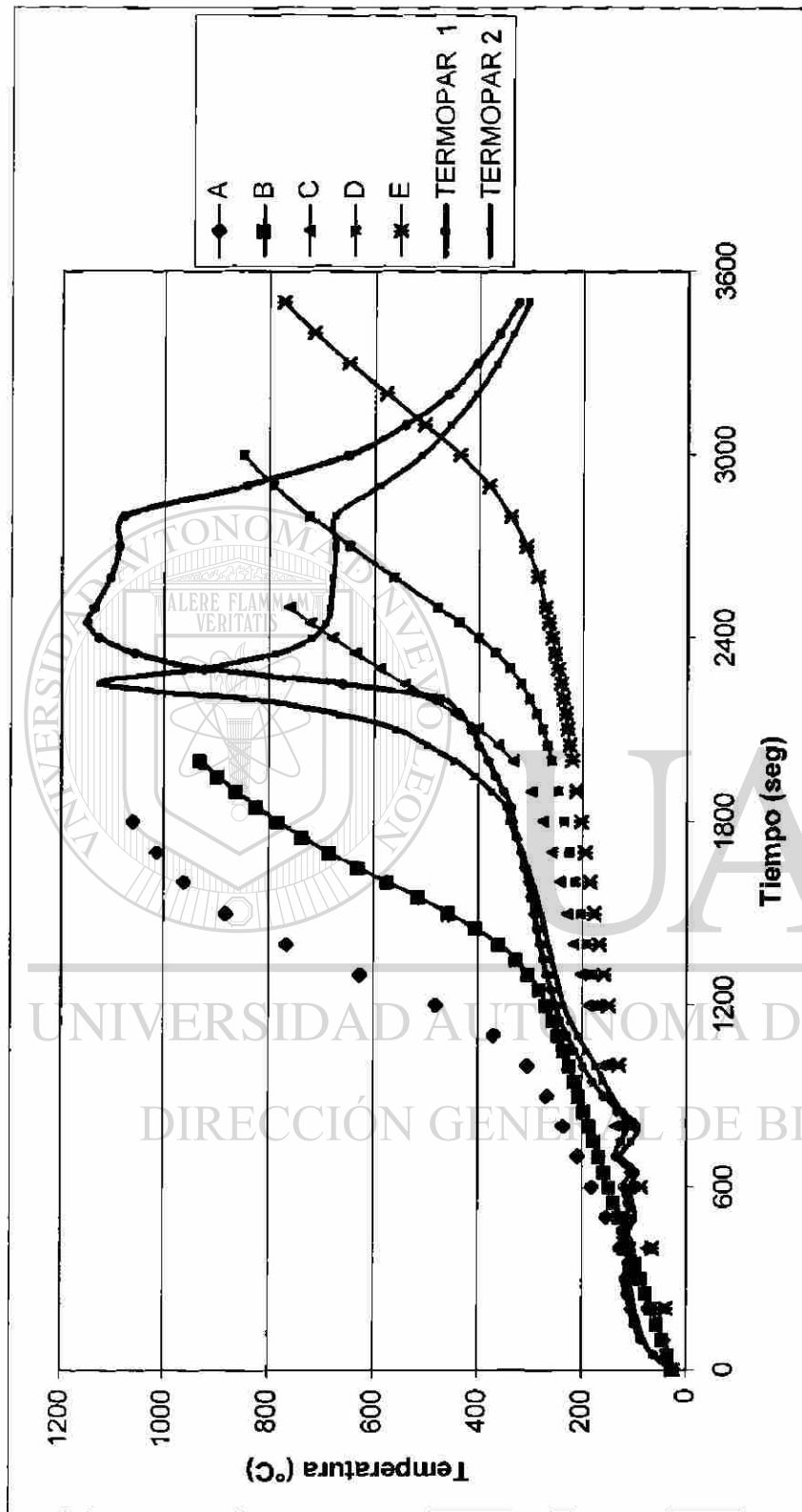


Figura 6.16 Perfiles térmicos a diferentes valores de $\tan \delta$ y comparación con experimental (680 Watts)

Los valores experimentales son en los termopares 1 y 2, representados con F y G respectivamente

Surge aquí una observación importante, porque parece que $\tan \delta$ depende también de la potencia empleada, lo cual no es posible. Esta falla aparente tiene una explicación simple.

La medición de temperatura en los termopares también puede variar debido a la posición de los mismos. En primer lugar, la muestra no es lo suficientemente pequeña para considerar que el campo eléctrico es uniforme a través de la misma, y en segundo lugar, la masa va decreciendo al acercarse al centro de la muestra en forma cuadrática. Esto provocaría zonas de calentamiento con perfiles térmicos.

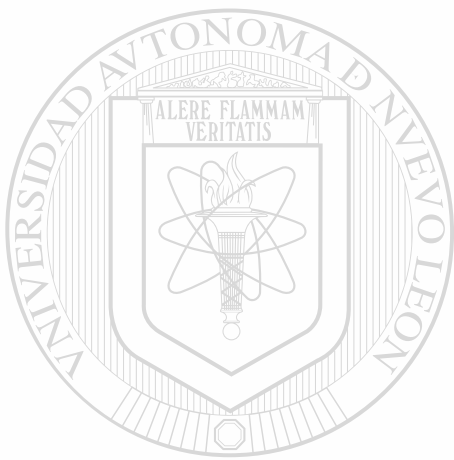
En el modelo de elemento finito, se consideró a los termopares con una geometría simplificada y se consideró que estaban perfectamente aislado de la guía de onda, de tal forma que no funcione como una antena y extraiga energía de la misma.

Otro factor que se pueden considerar en dicha variación es la porosidad de la muestra, ya que los datos reportados son para la alúmina sólida. En nuestro modelo de elemento finito no se realizó dicha consideración, es decir, se consideró el volumen de alúmina como un sólido. Esto afecta principalmente en el volumen de material presente, el cual, si consideramos la porosidad sería menor y por lo tanto la masa a calentar también. Esto reduciría la potencia necesaria para calentar dicha muestra.

Según la literatura disponible, los valores de $\tan \delta$ reportados, varían entre 1 y 3 ordenes de magnitud sobre los valores utilizados en este análisis. En base a lo anterior, nuestro modelo que se ajusta más a los datos experimentales, no supera el orden de magnitud, oscila entre 8 y 10 veces el

valor experimental (1 orden de magnitud). Esto quiere decir que los perfiles de calentamiento del análisis por elemento finito son aceptables.

De esto podemos deducir que el modelo es bueno en cuanto a procedimiento, condiciones de frontera y propiedades de materiales utilizado. Además, nos puede dar más información al respecto de lo que sucede dentro de la muestra.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

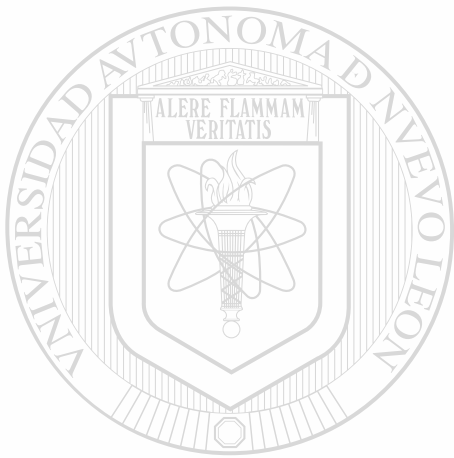
De acuerdo a los resultados experimentales y de análisis por elemento finito, podemos concluir lo siguiente:

- ◆ El campo eléctrico dentro de la muestra no es constante, por lo que los modelos simplificados, los cuales suponen un campo eléctrico conocido o constante son un aproximación que solamente es válido en muestras pequeñas. En este caso el modelo realizado calcula el campo eléctrico dentro de la muestra y determina la distribución del mismo, dando como resultado un análisis que permite incorporar elementos tales como los termopares o muestras mayores en las que existen perfiles térmicos.
- ◆ A diferencia de otro tipo de análisis, se logró modelar el efecto de los termopares en la guía de onda en el análisis electromagnético y se confirma la validez que tienen las hipótesis en las que se asegura que termopares perpendiculares al campo eléctrico pueden ser utilizados y además se justifica su grado de interferencia.
- ◆ Se puede utilizar la técnica de elemento finito como complemento del análisis experimental para estimar las propiedades dieléctricas del material a partir de perfiles térmicos conocidos.

- ◆ **El autocalentamiento no es significativo**

Se recomienda hacer el análisis en materiales sólidos (sin poros) tanto en forma experimental como por elemento finito para evitar la contribución de los poros.

Además es conveniente completar el análisis térmico incluyendo efectos de radiación para lograr un modelo mucho más completo.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



BIBLIOGRAFÍA

1. Willard H. Sutton, Microwave Processing of ceramics-an overview. MRS Symposium Proceedings, volume 269, pp. 3-5. Microwave Processing of Materials, (1992).
2. Xiaofeng Wu, Experimental and theoretical study of microwaver heating of thermay runaway material. PhD. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, USA. 2002.
3. Collin, Foundations for Microwave Engineering. Editorial Mc Graw-Hill, p.p.2
4. Andrei V. Gaponov- Grekhov, Victor L. Granatstein, Applications of High-Power Microwave. De. Artech House, INC. U.S.A., p.p 323.
5. Mario Alberto González Garza, Obtención de Espinel $MgAl_2O_4$ utilizando microondas como fuente de energía. Tesis de maestría, UANL, México 1996.
6. J.A. Aguilar, J.A. Pearce, Measurement of dielectric properties of alumina at high temperature while exposed to microwaves, British Ceramics Transactions, Vol. 102, No. 2, pp 52-56, 2003.
7. Mikel J. White, Magdy F. Iskander, and Hal. D. Kimrey, Development of a multigrid FDTD code for three-dimensional simulation of large microwave

- sintering experiments. MRS Symposium Proceedings, volume 430, pp. 325-340 (1996)
8. H.W. Jackson, M. Barmatz, and P. Wagner, Transient temperature distributions in a cylinder heated by microwaves. MRS Symposium Proceedings, volume 430, pp. 571-577 (1996)
 9. Zhenlong Huang, Magdy F. Iskander, James Tucker, and Hal D. Kimrey, FDTD modelling of realistic microwave sintering experiments. MRS Symposium Proceedings, volume 347, pp. 331-345 (1994)
 10. Patrick Fisher, Numerical simulation of microwave sintering of zinc oxide. M.Sc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, U.S.A. 1997.
 11. William H. Hayt, Teoría Electromagnética, 5ta. Ed. McGraw-Hill 1991
 12. Rodolfo Neri Vela, Líneas de transmisión, McGraw-Hill, 1999
-
13. K. C. Gupta, Microondas, Editorial Limusa, 1983.
 14. Aguilar, M. Gonzalez and I. Gomez, Microwaves as an Energy Source for producing Magnesia-Alumina Spinel. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, Vol.32, No.2 (1997).
 15. Juan A. Aguilar, Procesamiento de materiales por medio de microondas en la FIME, Revista Ingenierías, FIME, UANL, Vol. IV, No. 13, Octubre-Diciembre 2001.

16. P. Risman, Terminology and notation of microwave power and electromagnetic energy. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol.26, No.4 (1991).
17. <http://www.2450mhz.com/Depths2450.pdf>, penetration depths at 2450 Mhz.
18. Wesphal: *Tables of Dielectric Materials. Volume IX*, Laboratory of Insulation Research, MIT, Cambridge, Massachusetts, 1975.
19. Saeed Moaveni, *Finite Element Analysis. Theory and application with ANSYS*. Prentice Hall, 1999.
20. ANSYS, *Theory Manual*, S.A.S. I.P. Inc. (1999)
21. O.C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, *El método de los elementos finitos*, V.2. , 4 ed., McGraw-Hill, 1995
22. A.S.M., *Engineered materials handbook*, Vol. 4, *Ceramics and Glasses*, 1991.
23. J.P. Holman, *Transferencia de calor*, 8ª Ed., McGraw-Hill, 1998.

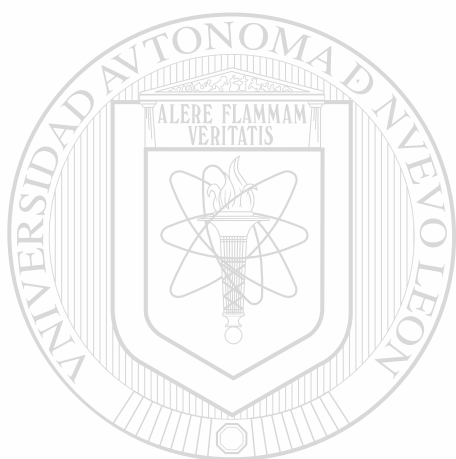
LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Espectro Electromagnético mostrando la sección que corresponde a las microondas.	8
Figura 2.2. Onda electromagnética	9
Figura 2.3. Guía de onda rectangular	10
Figura 2.4. Distribución del campo eléctrico en una guía rectangular en el modo TE_{10} . a) Vista lateral, b) Vista frontal	12
Figura 2.5. Distribución del campo eléctrico para una guía de onda rectangular en el modo TE_{10} . Vista Isométrica	13
Figura 2.6. Distribución del campo magnético para una guía de onda rectangular en el modo TE_{10} : a) Vista Isométrica; b) Vista superior	13
Figura 3.1. Penetración de las microondas a diferentes valores de $\tan \delta$ y constante dieléctrica ϵ'	22
Figura 3.2. Dependencia de $\tan \delta$ respecto a la temperatura para una muestra de alúmina expuesta a 3.6 GHz	23
Figura 4.1. Dominio de análisis para fenómenos electromagnéticos	29
Figura 5.1. Equipo experimental	33
Figura 5.2. Arreglo experimental	36
Figura 5.3. Campo eléctrico en la muestra	37
Figura 5.4. Guía de onda y crisol	37
Figura 5.5. Posición de los termopares para la medición de temperatura	38
Figura 5.6. Modelo de aire y crisol. Se muestran las paredes metálicas del interior de la guía	40
Figura 5.7. Condiciones de frontera para el modelo electromagnético	40
Figura 5.8. Malla para el modelo. a) Guía, b) Cilindro	41
Figura 5.9. Modelo con termopares	42
Figura 5.10. Condiciones de frontera del modelo térmico	43
Figura 5.11. Conductividad térmica de la Alúmina	43

Figura 5.12. Proceso iterativo de solución del modelo acoplado	45
Figura 6.1. Perfil térmico experimental de la muestra calentada a 470 watts	47
Figura 6.2. Potencia absorbida de las muestra a 470 Watts	48
Figura 6.3. Perfil térmico experimental de la muestra calentada a 680 watts	48
Figura 6.4. Potencia absorbida de la muestra a 680 Watts. Experimental	49
Figura 6.5. Valores experimentales de ϵ''	50
Figura 6.6. Distribución del campo eléctrico en la guía vacía (470W)	52
Figura 6.7. Longitud de onda del campo eléctrico en la guía	53
Figura 6.8. Distribución del campo eléctrico dentro de la guía con muestra (470W)	54
Figura 6.9. Distribución del campo eléctrico en la muestra. Modelo de elemento finito	57
Figura 6.10. Campo eléctrico en la interfase del los termopares con la muestra.	58
Figura 6.11. Potencia absorbida por la muestra	59
Figura 6.12. Potencias absorbidas	60
Figura 6.13. Distribución de temperaturas en la muestra sin termopares	62
Figura 6.14 Distribución de temperaturas en la muestra con termopares	62
Figura 6.15 Perfiles térmicos a diferentes valores de $\tan \delta$ y comparación con experimental (470Watts)	66
Figura 6.16 Perfiles térmicos a diferentes valores de $\tan \delta$ y comparación con experimental (680 Watts)	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Guías de onda estándares	15
Tabla 6.1 Magnitud del campo eléctrico en la guía	51
Tabla 6.2 Valores de $\tan \delta$ para análisis a 470 watts	63
Tabla 6.3 Valores de $\tan \delta$ para análisis a 680 watts	65

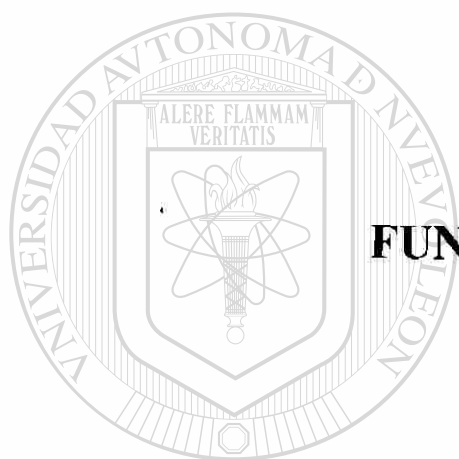


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



ANEXO I

FUNCIONES DE FORMA

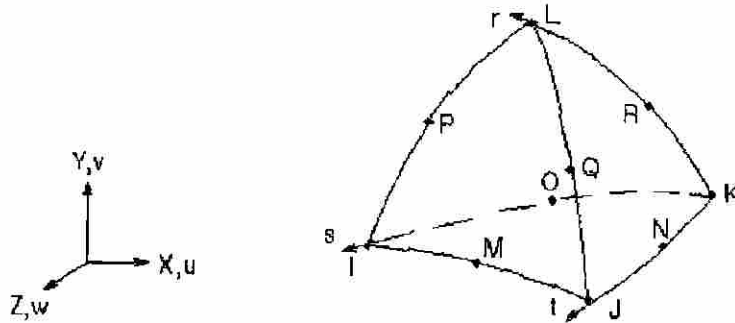
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

FUNCIONES DE FORMA PARA ELEMENTO TETRAEDRO DE 10 NODOS.



Funciones de forma geométricas:

$$u = u_I(2L_1 - 1)L_1 + u_J(2L_2 - 1)L_2 + u_K(2L_3 - 1)L_3 + u_L(2L_4 - 1)L_4 + 4(u_M L_1 L_2 + u_N L_2 L_3 + u_O L_1 L_3 + u_P L_1 L_4 + u_Q L_2 L_4 + u_R L_3 L_4)$$

$$v = v_I[2L_1 - 1]L_1 \dots \quad \text{análogo a } u$$

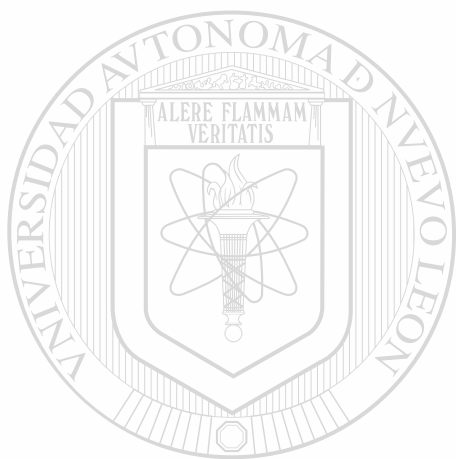
$$w = w_I[2L_1 - 1]L_1 \dots \quad \text{análogo a } u$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Vector de funciones de forma de la solución:

$$W_{ij} = L_i \nabla L_j - L_j \nabla L_i \quad i, j = I, J, K, L \quad i \neq j$$

L_j = coordenadas del volumen



ANEXO II

CÁLCULOS

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CÁLCULO DE LA MAGNITUD DEL CAMPO ELÉCTRICO EN GUÍA WR284.

Datos de la guía de onda:

$$a = 0.072 \text{ m}$$

$$b = 0.036 \text{ m}$$

$$f = 2.45 \text{ GHz}$$

dieléctrico = aire

$$v \approx c = 3 \times 10^8 \text{ m/seg}$$

Cálculo número de modos TE_{mn} presentes en la guía.

$$f_{c_{mn}} = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (1)$$

****Frecuencia de corte para el modo mn****

Para el modo TE_{10} tenemos:

$$m=1, n=0$$

$$f_{10} = \frac{3 \times 10^8}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{0.072}\right)^2} = 1.97 \text{ Ghz.}$$

Para el modo TE_{01} tenemos

$$m=0, n=1$$

$$f_{01} = \frac{3 \times 10^8}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{0.036}\right)^2} = 4.16 \text{ Ghz}$$

como el sistema se está excitando a 2.45 Ghz, solo existe el modo TE_{10} en la guía.

Para el cálculo de la longitud de onda tenemos:

$$\beta_{10} = \frac{2\pi}{v} \sqrt{(f^2 - f_{c_{mn}}^2)} \quad (2)$$

f= frecuencia de la guía

f_{c_{mn}}= frecuencia de corte del modo mn

$$\beta_{10} = \frac{2\pi}{3 \times 10^8} \sqrt{(2.45^2 - 1.97^2)} = 30 \text{ Rad/m}$$

$$\lambda_{10} = \frac{2\pi}{\beta_{10}} = \frac{2\pi}{30} = 0.209 \text{ m}$$

$$\lambda_{10} = 21.9 \text{ cm}$$

Cálculo de la magnitud del campo eléctrico.

$$E_y = -\frac{\omega\mu}{\beta} H_x \quad (3)$$

$$H_x = \frac{jA_0\beta a}{\pi} \text{sen}\left(\frac{\pi}{a}x\right) \quad (4)$$

$$H_z = A_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \quad (5)$$

sustituyendo (4) en (3)

$$E_{y_{\max}} = -\frac{\omega\mu}{\beta} \frac{jA_0\beta a}{\pi} \text{sen}\left(\frac{\pi}{a}x\right) \quad (6)$$

el valor máximo de E_y es:

$$E_{y_{\max}} = \frac{A_0 a \omega \mu}{\pi} \quad (7)$$

La potencia esta dada por:

$$P = \left(\frac{\omega \mu \beta A_0^2 a^2}{2\pi^2} \right) \left(\frac{ab}{2} \right) \quad (8)$$

Despejando A_0 de (7) tenemos:

$$A_0 = \frac{E_{y\max} \pi}{a \omega \mu} \quad (9)$$

sustituyendo (9) en (8) y simplificando tenemos:

$$P = A_0^2 \left(\frac{\omega \mu \beta a^2}{2\pi^2} \right) \left(\frac{ab}{2} \right)$$

$$P = \left(\frac{E_{y\max} \pi}{a \omega \mu} \right)^2 \left(\frac{\omega \mu \beta a^2}{2\pi^2} \right) \left(\frac{ab}{2} \right)$$

$$P = \left(\frac{ab \beta}{4 \omega \mu} \right) (E_{y\max})^2$$

Para nuestra guía tenemos:

$$a = 0.072 \text{ m}$$

$$b = 0.036 \text{ m}$$

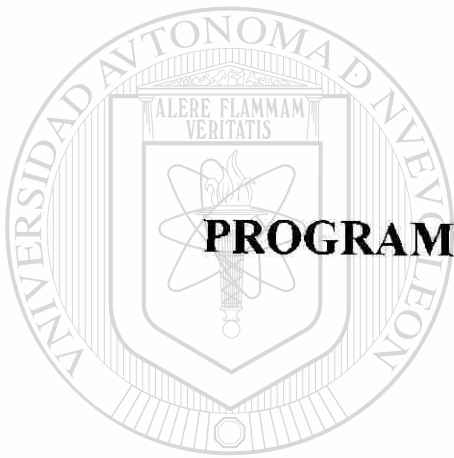
$$\beta_{10} = 30 \text{ rad/m}$$

$$\omega = (2\pi) (2.45 \times 10^9)$$

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7}$$

Resultados:

	470 watts	680Watts
$E_{y\max}$	21,133 V/m	25,419 V/m



ANEXO III

PROGRAMAS DE ELEMENTO FINITO

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

MODELO ELECTROMAGNÉTICO

```

!*
!*Modelo sin conductividad de termopares
!*
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,1
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/PREP7
!*
ET,1,HF119
BLOCK,0,.072,0,.036,0,.464,
wpstyle,0.05,.01,-.1,.1,0.003,0.0,,5
WPSTYLE,,,,,,,,,1
wpro,,90.000000,
CYL4,.036,0,.025
!LPLLOT
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,7
VEXT,P51X,,0,.035,0,,,,
wpro,,-90.000000,
wpro,90.000000,,
wpro,-90.000000,,
wpro,90.000000,,
wplane,-1,0,0,0,.612E-16,1,0,-1,.612E-16,0
wplane,-1,0,0,0,.707107,.180E-16,.707107,-.5,.707107,.5
wplane,-1,0,0,0,.306E-16,1,.306E-16,-1,.433E-16,-.155E-06
wpro,,90.000000,
WPCSYS,-1,0
wplane,-1,-.035355,0,.035355,.964645,0,.035355,-.035355,1,.035355
wplane,-1,.020413,-.040825,.020412,1.02,-.040825,.020412,.020413,.959175,.020412
WPCSYS,-1,0
wpro,90.000000,,
wpro,90.000000,,
WPCSYS,-1,0
wpro,,,90.000000
CYL4,0,0,.00079
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,13
VEXT,P51X,,0,,-.018,,,,
VDELE, 3
!LPLLOT

```

```

FLST,2,3,4,ORDE,3
FITEM,2,33
FITEM,2,-34
FITEM,2,36
LDELE,P51X, , ,1
FLST,2,3,5,ORDE,3
FITEM,2,13
FITEM,2,16
FITEM,2,-17
ADELE,P51X, , ,1
! L PLOT
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,15
FITEM,2,18
ADELE,P51X, , ,1
! L PLOT
CYL4,0,0,.00079
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,13
VEXT,P51X, , ,-.018,0,0,,,,
! L PLOT
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,13
VEXT,P51X, , ,.009,0,0,,,,
FLST,3,2,6,ORDE,2
FITEM,3,3
FITEM,3,-4
VGEN, ,P51X, , ,0,.016,0, , ,1
GPLOT
FLST,2,4,4,ORDE,2
FITEM,2,29
FITEM,2,-32
LDELE,P51X, , ,1
ADELE, 14, , ,1
FINISH
/PREP7
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,3
FITEM,2,-4
VDELE,P51X, , ,1
CYL4,0,0,.00079
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,13
VEXT,P51X, , ,.027,0,0,,,,
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,3
VGEN, ,P51X, , ,0,0.016,0, , ,1
CYL4,.072,0,.00079
ADELE, 19, , ,1
CYL4,0,0,.00079
FLST,2,1,5,ORDE,1

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS


```

FITEM,2,19
VEXT,P51X, , ,0.031,0,0,,,
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,4
VGEN, ,P51X, , ,.041,0.016,0, , ,1
WPCSYS,-1,0
WPSTYLE,,,,,,,,,0
FLST,3,3,6,ORDE,2
FITEM,3,2
FITEM,3,-4
VGEN,2,P51X, , , ,.232, ,0
FINISH
/FILNAM,tp
!*
/PREP7
VSBV, , 1, 5
! L PLOT
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,2
VGEN,2,P51X, , , ,.0.232, ,0
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,8
FLST,3,2,6,ORDE,2
FITEM,3,6
FITEM,3,-7
VSBV,P51X,P51X
VSEL,S, , , 5
ALLSEL,ALL
VSEL,S, , , 9
ALLSEL,ALL
FLST,3,2,6,ORDE,2
FITEM,3,3
FITEM,3,-4
VGEN, ,P51X, , ,0,0.232, , ,1
VDELE, , 2, , ,1
GPLOT
FINISH
/PREP7
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 9
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!* AIRE
UIMP,1,ENTH, , , ,
UIMP,1,HF, , , ,
UIMP,1,QRATE, , , ,
UIMP,1,VISC, , , ,
UIMP,1,SONC, , , ,
UIMP,1,MURX, , , ,1,
UIMP,1,MGXX, , , ,

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

```

UIMP,1,RSVX, , , ,
UIMP,1,PERX, , , 1,
UIMP,1,LSST, , , ,
!* ALUMINA
UIMP,2,ENTH, , , ,
UIMP,2,HF, , , ,
UIMP,2,QRATE, , , ,
UIMP,2,VISC, , , ,
UIMP,2,SONC, , , ,
UIMP,2,MURX, , , 1,
UIMP,2,MGXX, , , ,
UIMP,2,RSVX, , , ,
UIMP,2,PERX, , , 10,
UIMP,2,LSST, , , .004,
!* TANGENTE DELTA DE ALUMINA EN FUNCION DE TEMPERATURA
MPTEMP,1,25,180,270,300,321,326
MPTEMP,7,340,345,359,374,386,408
MPTEMP,13,422,443,462,480,500,560
MPTEMP,19,600,700,800,900,1000,1100
MPDATA,LSST,2,1,0.004,0.0045,0.005,0.007,0.013,0.015
MPDATA,LSST,2,7,0.019,0.022,0.025,0.028,0.03,0.033
MPDATA,LSST,2,13,0.034,0.035,0.035,0.034,0.033,0.03
MPDATA,LSST,2,19,0.026,0.02,0.013,0.01,0.007,0.005
!*
UIMP,3,ENTH, , , ,
UIMP,3,HF, , , ,
UIMP,3,QRATE, , , ,
UIMP,3,VISC, , , ,
UIMP,3,SONC, , , ,
UIMP,3,MURX, , , 1,
UIMP,3,MGXX, , , ,
UIMP,3,RSVX, , , ,0.000000097,
UIMP,3,PERX, , , 10,
UIMP,3,LSST, , , ,
FINISH
/POST1
FINISH
/PREP7
NUMMRG,ALL, , ,
! SAVE, tp.db,
FLST,5,12,4,ORDE,6
FITEM,5,37
FITEM,5,-44
FITEM,5,107
FITEM,5,109
FITEM,5,111
FITEM,5,-112
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
!*
CM,_Y1,LINE

```

```

CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,2,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
!*

```

```

FLST,5,12,4,ORDE,10
FITEM,5,45
FITEM,5,-48
FITEM,5,105
FITEM,5,-106
FITEM,5,108
FITEM,5,110
FITEM,5,125
FITEM,5,-126
FITEM,5,128
FITEM,5,130
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
!*

```

```

CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,,0.003,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
!*

```

```

FLST,5,12,4,ORDE,6
FITEM,5,25
FITEM,5,-32
FITEM,5,99
FITEM,5,101
FITEM,5,103
FITEM,5,-104
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
!*

```

```

CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,2,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
!*

```

```

FLST,5,12,4,ORDE,10
FITEM,5,33
FITEM,5,-36
FITEM,5,97
FITEM,5,-98
FITEM,5,100
FITEM,5,102
FITEM,5,117
FITEM,5,-118
FITEM,5,120

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

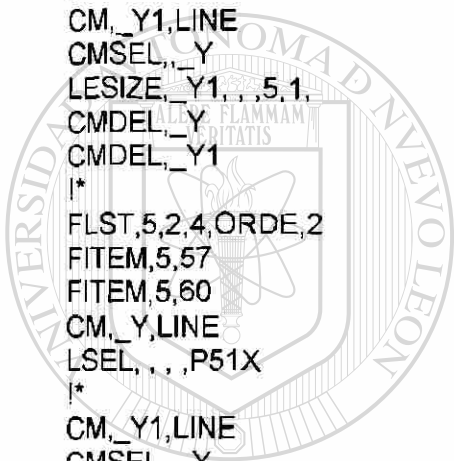
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

```

FITEM,5,122
CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,.003,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
!*
FLST,5,8,4,ORDE,2
FITEM,5,49
FITEM,5,-56
CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,5,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,57
FITEM,5,60
CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
FLST,5,4,4,ORDE,2
FITEM,5,113
FITEM,5,-116
CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,5,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,57
FITEM,5,60
CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,10,1,

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CMDEL,_Y
 CMDEL,_Y1
 !*
 FLST,5,4,4,ORDE,4
 FITEM,5,1
 FITEM,5,3
 FITEM,5,6
 FITEM,5,8
 CM,_Y,LINE
 LSEL,,,P51X

!*
 CM,_Y1,LINE
 CMSEL,,_Y
 LESIZE,_Y1,,,10,1,
 CMDEL,_Y
 CMDEL,_Y1

!*
 FLST,5,4,4,ORDE,4
 FITEM,5,2
 FITEM,5,4
 FITEM,5,-5
 FITEM,5,7
 CM,_Y,LINE
 LSEL,,,P51X

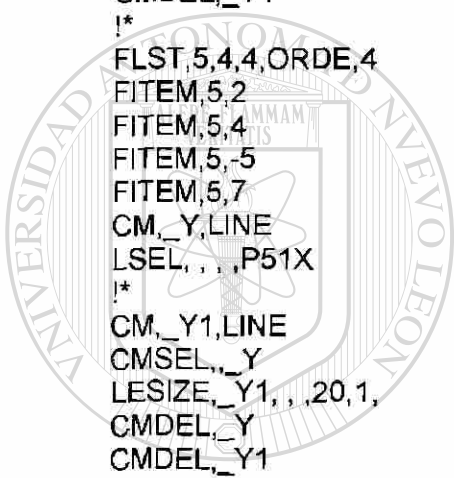
!*
 CM,_Y1,LINE
 CMSEL,,_Y
 LESIZE,_Y1,,,20,1,
 CMDEL,_Y
 CMDEL,_Y1

!*
 FLST,5,4,4,ORDE,2
 FITEM,5,9
 FITEM,5,-12
 CM,_Y,LINE
 LSEL,,,P51X

!*
 CM,_Y1,LINE
 CMSEL,,_Y
 LESIZE,_Y1,,,20,1,
 CMDEL,_Y
 CMDEL,_Y1

!*
 MSHAPE,1,3D
 MSHKEY,0

!*
 FLST,5,4,6,ORDE,3
 FITEM,5,3
 FITEM,5,-5
 FITEM,5,9
 CM,_Y,VOLU



UANL

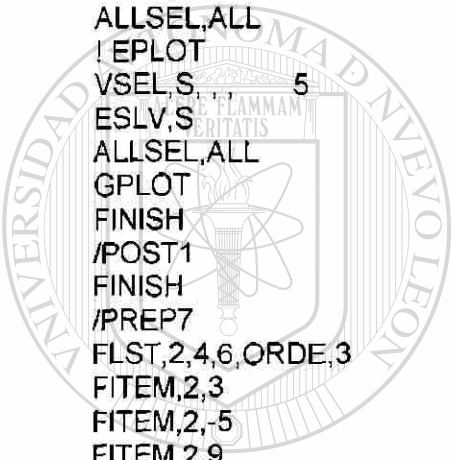
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



```

VSEL, , , P51X
CM, _Y1, VOLU
CHKMSH, 'VOLU'
CMSEL, S, _Y
!*
VMESH, _Y1
!*
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
CMDEL, _Y2
!*
FLST, 5, 2, 6, ORDE, 2
FITEM, 5, 3
FITEM, 5, -4
VSEL, S, , , P51X
ESLV, S
ALLSEL, ALL
! EPLOT
VSEL, S, , , 5
ESLV, S
ALLSEL, ALL
GPLOT
FINISH
/POST1
FINISH
/PREP7
FLST, 2, 4, 6, ORDE, 3
FITEM, 2, 3
FITEM, 2, -5
FITEM, 2, 9
VCLEAR, P51X
! LPLOT
FLST, 5, 12, 4, ORDE, 10
FITEM, 5, 45
FITEM, 5, -48
FITEM, 5, 105
FITEM, 5, -106
FITEM, 5, 108
FITEM, 5, 110
FITEM, 5, 125
FITEM, 5, -126
FITEM, 5, 128
FITEM, 5, 130
CM, _Y, LINE
LSEL, , , P51X
!*
CM, _Y1, LINE
CMSEL, , _Y
LESIZE, _Y1, 0.006, , , 1,
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

```

!*
FLST,5,12,4,ORDE,10
FITEM,5,33
FITEM,5,-36
FITEM,5,97
FITEM,5,-98
FITEM,5,100
FITEM,5,102
FITEM,5,117
FITEM,5,-118
FITEM,5,120
FITEM,5,122
CM,_Y,LINE
LSEL, , , P51X

```

```

!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL, , _Y
LESIZE,_Y1,0.006, , , 1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1

```

```

!*
FLST,5,8,4,ORDE,2
FITEM,5,49
FITEM,5,-56
CM,_Y,LINE
LSEL, , , P51X

```

```

!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL, , _Y
LESIZE,_Y1, , , 4,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1

```

```

!*
FLST,5,8,4,ORDE,2
FITEM,5,49
FITEM,5,-56
CM,_Y,LINE
LSEL, , , P51X

```

```

!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL, , _Y
LESIZE,_Y1, , , 5,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1

```

```

!*
!/AUTO, 1
!/REP
FLST,5,4,4,ORDE,4
FITEM,5,2
FITEM,5,4
FITEM,5,-5

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

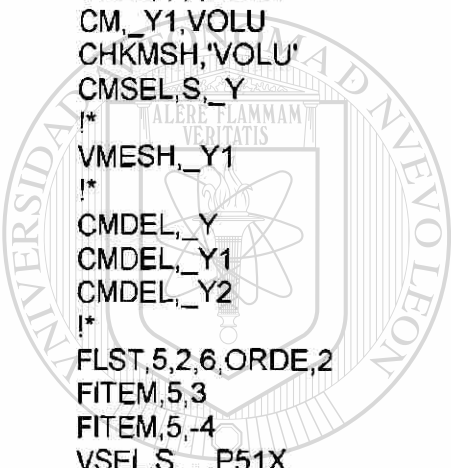
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

```

FITEM,5,7
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,Y
LESIZE,_Y1,,,10,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
!*
FLST,5,4,6,ORDE,3
FITEM,5,3
FITEM,5,-5
FITEM,5,9
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
CMDEL,_Y2
!*
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,3
FITEM,5,-4
VSEL,S,,,P51X
ESLV,S
ALLSEL,ALL
!VPLOT
VSEL,S,,,5
ESLV,S
ALLSEL,ALL
GPLOT
/UI,MESH,OFF
FINISH
/SOLU
CS,11,0,18730,17481,17522,1,1,
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,72
FITEM,2,-73
DA,P51X,AX,0,0
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,4
DA,P51X,AX,0,0
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,3
FITEM,2,43

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

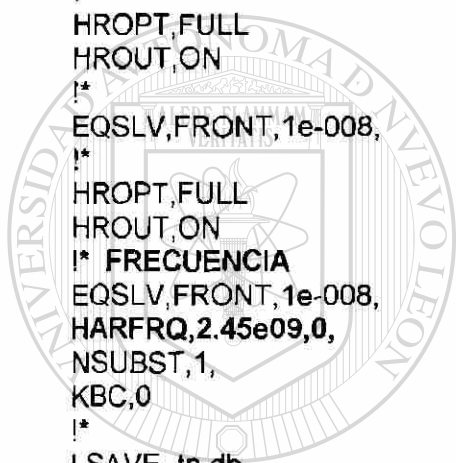


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS


```

DA,P51X,AX,0,0
! /VIEW, 1 ,1,1,1
! /ANG, 1
! /REP,FAST
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
!*DEFINICIÓN DE TUPO DE GUÍA Y POTENCIA
SFA,P51X,,PORT,1
PORTOPT,1,TE10,11,.072,.036, ,0,470,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,2
SFA,P51X,,PORT,2
PORTOPT,2,TE10,11,0.072,0.036, ,0, ,
!*
ANTYPE,3
!*
HROPT,FULL
HROUT,ON
!*
EQSLV,FRONT,1e-008,
!*
HROPT,FULL
HROUT,ON
!* FRECUENCIA
EQSLV,FRONT,1e-008,
HARFRQ,2.45e09,0,
NSUBST,1,
KBC,0
!*
! SAVE, tp,db,
! /STAT,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
POWERH
FINISH
/PREP7
!*
FINISH
!*
!* Postprocesamiento
!*
POWERH
ANCUT,10,0.5, ,0.1,0,0.1,17481,17520,17918
ANCUT,10,0.5, ,0.1,0,0.1,17481,17487,17522
ANCUT,10,0.5, ,0.1,0,0.1,17482,17898,17918
ANCUT,10,0.5, ,0.1,0,0.1,17898,17918,18284
ANCUT,10,0.5, ,0.1E-01,0,0.1,17898,17918,18269
VSEL,S, , , 5
ESLV,S
! elist,all,,0,0

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

```

ALLSEL,ALL
GPLOT
FINISH
!*
!* Modelo con conductividad en paredes de termopar
!*Continuar del pRograma anterior
!*
!*
/PREP7
FLST,2,4,6,ORDE,3
FITEM,2,3
FITEM,2,-5
FITEM,2,9
VCLEAR,P51X
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,3
FITEM,5,-4
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 3,, 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,,, 5
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 2,, 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,,, 9
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 1,, 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,4,6,ORDE,3

```



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

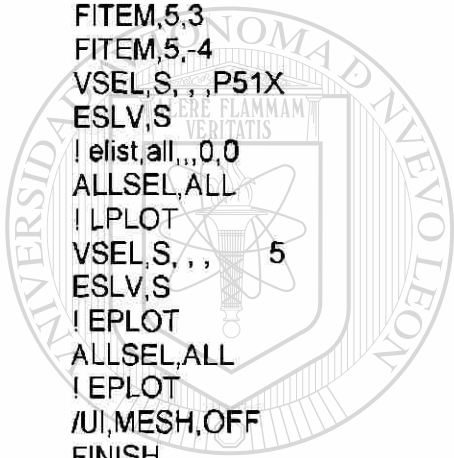
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

```

FITEM,5,3
FITEM,5,-5
FITEM,5,9
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
CMDEL,_Y2
!*
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,3
FITEM,5,-4
VSEL,S,,,P51X
ESLV,S
!elist,all,,,0,0
ALLSEL,ALL
!LPLOT
VSEL,S,,,5
ESLV,S
!EPLOT
ALLSEL,ALL
!EPLOT
/UI,MESH,OFF
FINISH
/SOLU
FLST,2,13,5,ORDE,6
FITEM,2,14
FITEM,2,-18
FITEM,2,48
FITEM,2,-51
FITEM,2,60
FITEM,2,-63
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,51
FLST,2,13,5,ORDE,6
FITEM,2,14
FITEM,2,-18
FITEM,2,48
FITEM,2,-51
FITEM,2,60
FITEM,2,-63
!*CONDUCTIVIDAD EN PAREDES DEL TERMOPAR
SFA,P51X, ,SHLD,1.03e07,1,
FLST,2,13,5,ORDE,7
FITEM,2,19

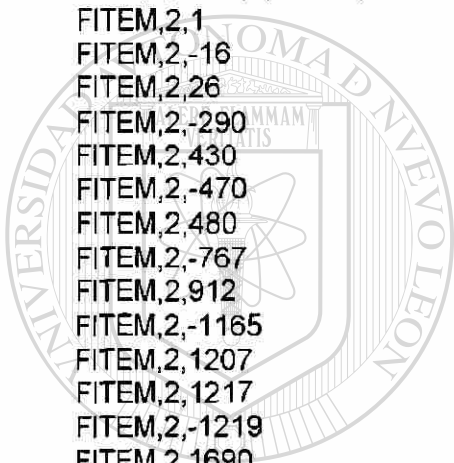
```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

FITEM,2,21
 FITEM,2,-24
 FITEM,2,52
 FITEM,2,-55
 FITEM,2,64
 FITEM,2,-67
 FLST,2,13,5,ORDE,7
 FITEM,2,19
 FITEM,2,21
 FITEM,2,-24
 FITEM,2,52
 FITEM,2,-55
 FITEM,2,64
 FITEM,2,-67
SFA,P51X, ,SHLD,10300000,1,
 FLST,2,1170,1,ORDE,23
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-16
 FITEM,2,26
 FITEM,2,-290
 FITEM,2,430
 FITEM,2,-470
 FITEM,2,480
 FITEM,2,-767
 FITEM,2,912
 FITEM,2,-1165
 FITEM,2,1207
 FITEM,2,1217
 FITEM,2,-1219
 FITEM,2,1690
 FITEM,2,-1696
 FITEM,2,3313
 FITEM,2,-3415
 FITEM,2,17406
 FITEM,2,-17480
 FITEM,2,17877
 FITEM,2,-17897
 FITEM,2,18625
 FITEM,2,-18720
SF,P51X,SHLD,1.03e07,1,
 ALLSEL,ALL
 FINISH
 !*
 /SOLU
 !/STAT,SOLU
 SOLVE
 !*



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



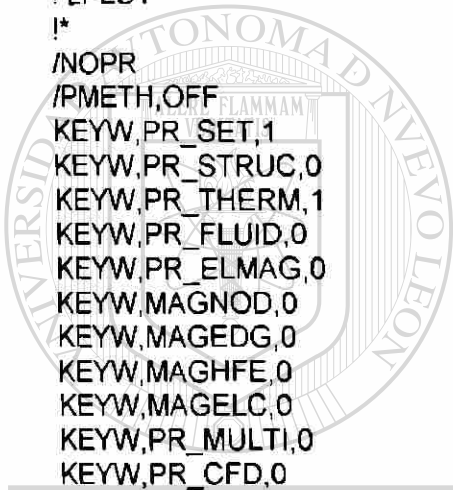
ASOCIACIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

MODELO TÉRMICO

```

!*
!*comenzar abriendo el archivo del modelo electromagnético
RESUME,electrico,db,,0
FINISH
/FILNAM,TERMICO
/POST1
FINISH
/PREP7
FLST,2,4,6,ORDE,3
FITEM,2,3
FITEM,2,-5
FITEM,2,9
VCLEAR,P51X
! L PLOT
!*
/NOPR
/PMETH,OFF
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,1
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
ETDEL,1
!*
ET,1,SOLID87
!*
!*
UIMP,1,DENS,, ,2750,
UIMP,1,KXX,, ,30,
UIMP,1,C,, ,1000,
UIMP,1,ENTH,, , ,
UIMP,1,HF,, , ,
UIMP,1,EMIS,, , ,
UIMP,1,QRATE,, , ,
UIMP,1,VISC,, , ,
UIMP,1,SONC,, , ,
UIMP,1,RSVX,, , ,
!*
!*
UIMP,2,DENS,, ,2750,
UIMP,2,KXX,, , ,

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UIMP,2,C, , , 1000,
 UIMP,2,ENTH, , , ,
 UIMP,2,HF, , , ,
 UIMP,2,EMIS, , , ,
 UIMP,2,QRATE, , , ,
 UIMP,2,VISC, , , ,
 UIMP,2,SONC, , , ,
 UIMP,2,RSVX, , , ,

!*

MPTEMP,1,25,100,300,500,700,900,
MPTEMP,7,1100,1300,1500,
MPDATA,KXX,2,1,36,28.9,16.3,10.5,7.5,6.3,
MPDATA,KXX,2,7,5.85,5.85,5.44,

!*

UIMP,3,DENS, , , 7850,
 UIMP,3,KXX, , , 68,
 UIMP,3,C, , , 450,
 UIMP,3,ENTH, , , ,
 UIMP,3,HF, , , ,
 UIMP,3,EMIS, , , ,
 UIMP,3,QRATE, , , ,
 UIMP,3,VISC, , , ,
 UIMP,3,SONC, , , ,
 UIMP,3,RSVX, , , 9.7e-008,

!*

CM,_Y,VOLU
 VSEL, , , 5
 CM,_Y1,VOLU
 CMSEL,S,_Y

!*

CMSEL,S,_Y1
 VATT, 2, , 1, 0
 CMSEL,S,_Y
 CMDELE,_Y
 CMDELE,_Y1

!*DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

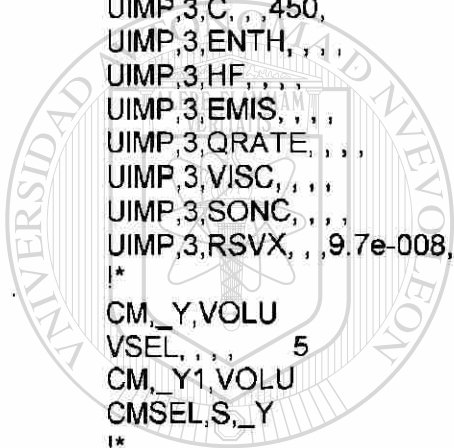
FLST,5,2,6,ORDE,2
 FITEM,5,3
 FITEM,5,-4
 CM,_Y,VOLU
 VSEL, , , P51X
 CM,_Y1,VOLU
 CMSEL,S,_Y

!*

CMSEL,S,_Y1
 VATT, 3, , 1, 0
 CMSEL,S,_Y
 CMDELE,_Y
 CMDELE,_Y1

!*

CM,_Y,VOLU



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

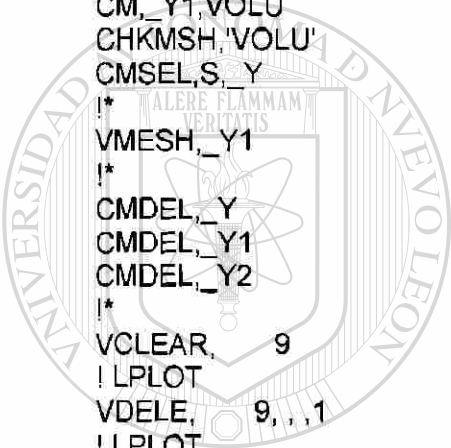


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

```

VSEL,,, 9
CM,_Y1,VOLU
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
VATT, 1,, 1, 0
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,4,6,ORDE,3
FITEM,5,3
FITEM,5,-5
FITEM,5,9
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
CMDEL,_Y2
!*
VCLEAR, 9
! L PLOT
VDELE, 9,,1
! L PLOT
FINISH
/SOLU
!*
ANTYPE,4
!*
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
!*
NLGEOM,0
SSTIF,0
NROPT,AUTO, ,
EQLV,FRONT, ,0,
PREC,0
TOFFST,0,
!*
LSCLEAR,ALL
LSCLEAR,ALL
FLST,2,17405,1,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-17405
IC,P51X,TEMP,25,

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



BIBLIOTECA GENERAL DE BIBLIOTECAS

```

VSEL,S,, 5
ASLV,S
! APLOT
FLST,2,6,5,ORDE,4
FITEM,2,3
FITEM,2,25
FITEM,2,56
FITEM,2,-59
/GO
!*
SFA,P51X,1,CONV,6,25
ALLSEL,ALL
! L PLOT
! /REP
ALLSEL,ALL
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,3
FITEM,5,-4
VSEL,S,,P51X
ESLV,S
FLST,5,2,6,ORDE,2
FITEM,5,3
FITEM,5,-4
VSEL,S,,P51X
ASLV,S
NSLA,S,1
! APLOT
NSEL,S,LOC,X,0,0.018
! NPLOT
ALLSEL,ALL
! L PLOT
VSEL,S,, 3
ASLV,S
NSLA,S,1
! NPLOT
NSEL,S,LOC,X,0,0.018
! NPLOT
NSEL,U,LOC,X,0.018,0.072
! NPLOT
NSEL,U,LOC,X,0,0.010
! NPLOT
ALLSEL,ALL
NSEL,U,LOC,X,0,0.018
! NPLOT
NSEL,S,LOC,X,0,0.018
! NPLOT
FINISH
/REP7
KDISTANCE, 19, 23
VSEL,S,, 3
ASLV,S

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

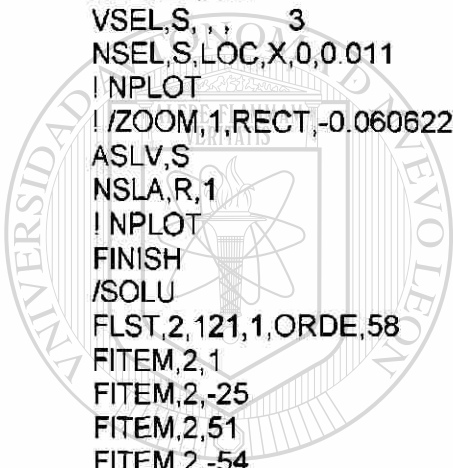
®

SECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS


```

NSLA,S,1
! NPLOT
NSEL,S,LOC,X,0,0.011
NSEL,A,EXT
ALLSEL,ALL
VSEL,R,, , 3
ASLV,R
NSLA,R,1
! NPLOT
NSEL,A,LOC,X,0,0.011
! NPLOT
NSLA,A,1
! NPLOT
ALLSEL,ALL
ALLSEL,ALL
ALLSEL,ALL
VSEL,S,, , 3
NSEL,S,LOC,X,0,0.011
! NPLOT
! /ZOOM,1,RECT,-0.060622,0.232065,0.768933,-0.390257
ASLV,S
NSLA,R,1
! NPLOT
FINISH
/SOLU
FLST,2,121,1,ORDE,58
FITEM,2,1
FITEM,2,-25
FITEM,2,51
FITEM,2,-54
FITEM,2,60
FITEM,2,-63
FITEM,2,72
FITEM,2,-74
FITEM,2,76
FITEM,2,78
FITEM,2,87
FITEM,2,-94
FITEM,2,102
FITEM,2,-104
FITEM,2,111
FITEM,2,114
FITEM,2,-115
FITEM,2,118
FITEM,2,120
FITEM,2,-123
FITEM,2,132
FITEM,2,-134
FITEM,2,136
FITEM,2,138
FITEM,2,147

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FITEM,2,-154
 FITEM,2,162
 FITEM,2,-164
 FITEM,2,171
 FITEM,2,174
 FITEM,2,-175
 FITEM,2,178
 FITEM,2,180
 FITEM,2,-183
 FITEM,2,192
 FITEM,2,-194
 FITEM,2,196
 FITEM,2,198
 FITEM,2,207
 FITEM,2,-214
 FITEM,2,222
 FITEM,2,-224
 FITEM,2,231
 FITEM,2,234
 FITEM,2,-235
 FITEM,2,238
 FITEM,2,243
 FITEM,2,-245
 FITEM,2,247
 FITEM,2,249
 FITEM,2,258
 FITEM,2,-265
 FITEM,2,273
 FITEM,2,-275
 FITEM,2,282
 FITEM,2,285
 FITEM,2,-286
 FITEM,2,289
 /GO
 !*
 SF,P51X,CONV,6,25
 ALLSEL,ALL
 ! /AUTO, 1
 VSEL,R, , , 4
 NSLV,R,1
 ! NPLLOT
 NSEL,R,LOC,X,0.041,0.072
 ! NPLLOT
 NSEL,S,LOC,X,0.041,0.072
 ! NPLLOT
 FINISH
 /PREP7
 VSEL,S, , , 4
 NSLV,S,1
 ! NPLLOT
 NSEL,S,LOC,X,0.061,0.072



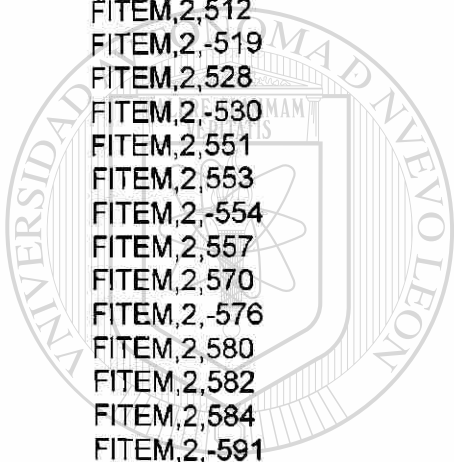
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

SECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

```
! NPLOT
ASLV,S
!/ZOOM,1,RECT,0.015484,0.163587,0.921145,-0.515829
NSLA,R,1
! NPLOT
FINISH
/SOLU
FLST,2,121,1,ORDE,52
FITEM,2,455
FITEM,2,-479
FITEM,2,487
FITEM,2,-490
FITEM,2,498
FITEM,2,-504
FITEM,2,508
FITEM,2,510
FITEM,2,512
FITEM,2,-519
FITEM,2,528
FITEM,2,-530
FITEM,2,551
FITEM,2,553
FITEM,2,-554
FITEM,2,557
FITEM,2,570
FITEM,2,-576
FITEM,2,580
FITEM,2,582
FITEM,2,584
FITEM,2,-591
FITEM,2,600
FITEM,2,-602
FITEM,2,623
FITEM,2,625
FITEM,2,-626
FITEM,2,629
FITEM,2,642
FITEM,2,-648
FITEM,2,652
FITEM,2,654
FITEM,2,656
FITEM,2,-663
FITEM,2,672
FITEM,2,-674
FITEM,2,695
FITEM,2,697
FITEM,2,-698
FITEM,2,701
FITEM,2,707
FITEM,2,-709
FITEM,2,713
```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



```

FITEM,2,715
FITEM,2,717
FITEM,2,-724
FITEM,2,733
FITEM,2,-735
FITEM,2,756
FITEM,2,758
FITEM,2,-759
FITEM,2,762
/GO
!*
SF,P51X,CONV,6,25
ALLSEL,ALL
! L PLOT
! /AUTO, 1
! /REP
!*
ANTYPE,4
FLST,2,17405,1,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-17405
IC,P51X,TEMP,25,
! SFALI, ALL
! SFLIS, ALL
!*
!* GENERACIÓN DE CALOR A PARTIR DE MODELO ELECTROMAGNÉTICO
!*
LDREAD,HGEN,,, ,0,electrico,rmg,
!*
! OUTPR,BASIC,ALL,
!*
OUTRES,BASIC,ALL
!*
TIME,100 !*Tiempo para el análisis transitorio !*
AUTOTS,0
NSUBST,5,0,0,0
KBC,0
!*
TSRES,ERASE
! /STAT,SOLU
SOLVE !* Resolver !*
FINISH

```

ITERACIONES

```

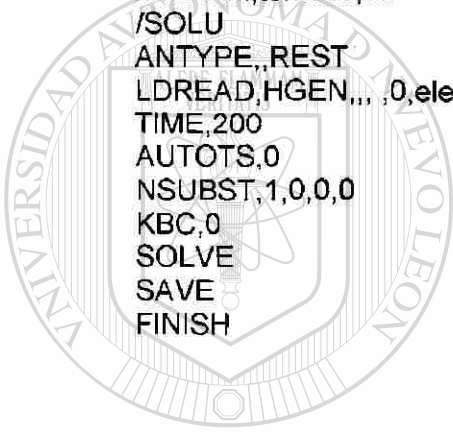
!*Leer archivo de modelo electromagnético realizar análisis
FINISH
/input,start55,ans ,d:\ANSYS\docu\,,,,,,1
RESUME,electrico,db,,0
ERASE
GPLOT
/FILNAM,electrico
/SOLU
!*se toman las temperaturas en los nodos a partir del analisis térmico
!*
ldread,temp,last,,,termico,rth
solve
save,electrico,db
finish
!*
!*
!* se lee al archivo del modelo térmico
!* tiempo 100 seg
!*100
FINISH
/input,start55,ans ,d:\ANSYS\docu\,,,,,,1
RESUME,termico,db
ERASE
GPLOT
/FILNAM,termico,db
/SOLU
ANTYPE,,REST
!* GENERACIÓN DE CALOR A PARTIR DE MODELO ELECTROMAGNÉTICO
!*
LDREAD,HGEN,,, ,0,electrico,rmg,
!*
!*se resuelve para un tiempo t
!*
TIME,100
AUTOTS,0
NSUBST,1,0,0,0
KBC,0
SOLVE
SAVE
FINISH
!*
!*
!*Se realizan los dos pasos anteriores hasta llegar el tiempo t deado en !*intervalos
controlados con el comando time
FINISH
/input,start55,ans ,d:\ANSYS\docu\,,,,,,1
RESUME,electrico,db,,0
ERASE
GPLOT

```

```

/FILNAM, electrico
/SOLU
ldread,temp,last,,, termico,rth
solve
save, electrico,db
finish
!*
!*
!*
!* Tiempo 200 seg
!*200
FINISH
/input,start55,ans ,d:\ANSYS\docu\,,,,,,1
RESUME, termico,db
ERASE
GPLOT
/FILNAM, termico,db
/SOLU
ANTYPE,,REST
LDREAD,HGEN,,, ,0, electrico,rmg,
TIME,200
AUTOTS,0
NSUBST,1,0,0,0
KBC,0
SOLVE
SAVE
FINISH

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

El Ing. Pedro López Cruz nació en Cuernavaca, Morelos el 03 de Marzo de 1974. Es hijo de Pedro López de la Paz y María Baltazar Cruz Alemán.

Realizó sus estudios de Licenciatura en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde se graduó con mención honorífica en febrero de 1997 como Ingeniero Mecánico Electricista.

Ha trabajado como catedrático de la misma desde febrero de 1997 a la fecha en el departamento de Análisis mecánico; anteriormente Departamento de Dinámica

Trabajó como Ingeniero de Producto para la empresa Máquinas para Mercados S.A. de C.V.

Fue ganador del premio Tecnos Nuevo León en 1999.

Las áreas de experiencia del Ing. López son el Diseño asistido por computadora y Analisis por Elemento Finito.

Actualmente trabaja en la Universidad Tecnológica Santa Catarina como profesor de tiempo completo.

