

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



ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL PARA  
EL BAO-TiO<sub>2</sub>, UTILIZADO COMO ELEMENTO  
DIELECTRICO EN UN CAPACITOR

POR

ROSA MARIA TORRES LUEVANO

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA MECANICA, CON ESPECIALIDAD  
EN TERMICA Y FLUIDOS

CIUDAD UNIVERSITARIA

ABRIL DEL 2002



TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2002  
.T6



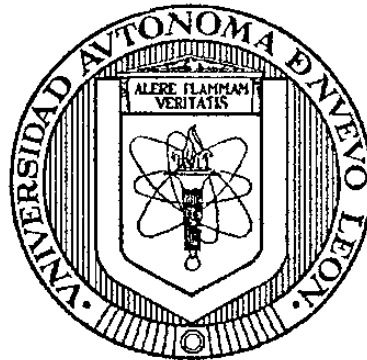
1020147518

1/2

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL PARA EL BAO-TIO<sub>2</sub>, UTILIZADO COMO  
ELEMENTO DIELECTRICO EN UN CAPACITOR

POR

ROSA MARÍA TORRES LUÉVANO

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA  
MECANICA, CON ESPECIALIDAD EN TERMICA Y FLUIDOS,

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2002

970 973

TH  
25853  
.M2  
FIME  
2002  
.T6

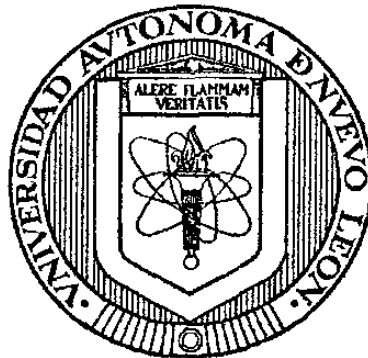


FONDO  
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL PARA EL  $\text{BaO} \cdot \text{TiO}_2$ , UTILIZADO COMO  
ELEMENTO DIELECTRICO EN UN CAPACITOR

POR

ROSA MARÍA TORRES LUÉVANO

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
MECÁNICA, CON ESPECIALIDAD EN TÉRMICA Y FLUIDOS


CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2002



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis *"Envejecimiento artificial para el BaO-TiO<sub>2</sub>, utilizado como elemento dieléctrico en un capacitor"* realizada por la Ing. Rosa María Torres Luévano sea aceptada como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Térmica y Fluidos.

Comité de tesis



---

Asesor  
M. en C. Jesús Garza Paz



---

Coasesor  
M. en C. Roberto Villarreal Garza



---

Coasesor  
M. en C. Jorge A. Aldaco Castañeda



---

Vo. Bo.  
M. en C. Roberto Villarreal Garza  
División de Estudios de Post-Grado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Abril del 2001.



# **DEDICATORIA**

***A MI PAREJA***

# AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida.

A mis Padres, que me dieron el ser.

A mi Pareja, por todo su amor.

A los Catedráticos que me transmitieron sus conocimientos, así como, el apoyo y la amistad que me brindaron dentro y fuera del aula.

Al M. en C. Roberto Villarreal, por su gran enseñanza, apoyo incondicional y sabías palabras de aliento.

A mis Amigos, por haberme apoyado en todo momento, a demás de darme sus consejos y palabras de aliento.

Gracias!

# ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
I INTRODUCCIÓN	1
II MATERIALES CERÁMICOS	2
II.1 Tipo de Materiales	2
II.1.a Metales	2
II.1.b Polímeros	3
II.1.c Cerámicos	5
II.2 Clasificación de los Materiales Cerámicos	6
II.3 El Titanato de Bario: $Ba_2TiO_3$	8
III ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL	10
III.1 Tratamientos Térmicos	10
III.2 Clasificación de los Tratamientos Térmicos	10
III.3 Tipos de Envejecimiento	11
IV CAPACITANCIA	13
IV.1 Propiedades Eléctricas	13
IV.2 Capacitor y Capacitancia	14

<b>V EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>16</b>
<b>V.1 Descripción del Problema</b>	<b>16</b>
<b>V.2 Hipótesis</b>	<b>16</b>
<b>V.3 Antecedentes</b>	<b>17</b>
<b>V.4 Diseño de Experimentos</b>	<b>17</b>
<b>VI ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>19</b>
<b>VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>20</b>
<b>VII.1 Conclusiones</b>	<b>20</b>
<b>VII.2 Recomendaciones</b>	<b>20</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>21</b>
<b>Caracterización del Calor Específico versus la Temperatura</b>	<b>22</b>
<b>Caracterización de Capacitancia</b>	<b>23</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>24</b>

# INTRODUCCIÓN

El envejecimiento artificial es un tratamiento térmico que típicamente se utiliza para reducir los tiempos que un envejecimiento natural tendría.

Sin embargo, este tratamiento térmico es utilizado, en forma típica, para metales como el aluminio o el níquel, difícilmente se tiene alguna aplicación en el campo de los materiales cerámicos.

El estudio de esta tesis pretende comprobar que se puede tener una aplicación práctica de este tratamiento térmico en los cerámicos. El material que se seleccionó para este análisis es el titanato de bario, aprovechando una de sus propiedades de mayor aplicación y estudio que es la capacitancia.

En la observancia de esta característica eléctrica, se podrá determinar el impacto que el envejecimiento artificial puede llegar a tener en el titanato de bario.



# MATERIALES CERÁMICOS

## II.1 Tipo de Materiales

En forma clásica, se definen a los materiales como sustancias en las cuales se puede llevar a cabo un proceso o diseño; los cuales se clasifican en:

- *Metales*
- *Polímeros*
- *Cerámicos*

### II.1.a Metales

Son aquellos materiales que tienen como enlace atómico el metálico. A diferencia de los otros tipos de materiales, sus propiedades más comunes muestran valores altos en su conductividad térmica, conductividad eléctrica, resistencia mecánica, elasticidad, ductilidad así como resistencia al impacto, entre otras. Las aleaciones, soluciones sólidas entre metales, tienen como finalidad mejorar ciertas propiedades, acorde a su requerimiento.

### **II.1.b Polímeros**

Este tipo de materiales se caracteriza por sus uniones de tipo covalente entre sus átomos, las cuales difícilmente llegan a formar estructuras cristalinas. Como una consecuencia de lo anterior, se da la formación de largas cadenas (estructuras moleculares), a partir de moléculas orgánicas de menor peso molecular, obtenidas a partir de minerales (como el petróleo), o bien como transformación de productos agrícolas, a lo largo de un proceso denominado polimerización. Sus propiedades más características son: baja densidad, alto peso molecular, buena resistencia a la corrosión, baja conductividad eléctrica, baja resistencia a la tensión, baja conductividad térmica, y sobre todo, alta plasticidad, por lo que es común que se les denomine en forma genérica plásticos.

Los polímeros se clasifican de diversas maneras. Sus caracterizaciones más comunes son:

#### **1. Por mecanismos de polimerización**

- *de adición*; los cuales se producen uniendo covalentemente las moléculas, formando cadenas que pueden tener miles de elementos moleculares en su longitud.
- *de condensación*; se producen cuando se unen dos o más tipos de moléculas mediante una reacción química que libera un producto colateral (en muchos de los casos agua).

## 2. Por estructura del polímero

- *Lineal*; los cuales tienen largas cadenas, formadas por miles de meros.
- *Red*; en donde se forman estructuras reticulares tridimensionales, producto de un enlace cruzado que implica una reacción de adición, o de condensación.

## 3. Por comportamiento del polímero

- *Termoplásticos*; son aquellos polímeros que se comportan de forma plástica a elevadas temperaturas, en los cuales no se modifican radicalmente sus enlaces en los cambios de temperatura; en la mayoría de los casos son lineales.
- *Termoestables*; Polímeros de red formados por una reacción de condensación (no son reprocesables a causa de la salida de parte de las moléculas).
- *Elastómeros*: tienen la capacidad de deformarse elásticamente en alto grado (alcanzando algunos hasta 700% de su elongación original), sin cambiar permanentemente su forma.

### **II.1.c Cerámicos:**

Las moléculas de los materiales cerámicos se componen por elementos metálicos y no-metálicos; dichos elementos forman enlaces iónicos principalmente (salvo algunas excepciones covalentes); teniendo capacidad para llegar a formar estructuras complejas.

Sus características físicas son: alta dureza, fragilidad, baja conductividad térmica y eléctrica, elevado punto de fusión, baja densidad, alta resistencia a la compresión, así como estabilidad química y térmica.

Existen diferentes maneras de clasificar a los materiales cerámicos. A continuación se presentan algunas propuestas:

a) Por su aplicación:

- Cerámicos electrónicos.
- Cerámicos ópticos.
- Cerámicos magnéticos.
- Cerámicos estructurales.

b) Por distinción de su composición química:

- Cerámicos óxidos simples.
- Cerámicos óxidos compuestos.
- Cerámicos no-óxidos.

c) Por la estructura atómica:

- cristalina
- vítreos amorfos

Este trabajo toma como referencia la clasificación acorde a su composición química: óxidos y no-óxidos (sales).

## II.2 Clasificación de los Materiales Cerámicos

Los cerámicos no-óxidos comprenden, principalmente, los siguientes grupos:

<i>Elementos Puros</i>	El carbón en la forma de grafito y diamante.
<i>Nitruros</i>	AlN, BN, SiN
<i>Carburos</i>	B <sub>4</sub> C, SiC, TiC, WC
<i>Boruros</i>	TiB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub>
<i>Selenuros</i>	ZnSe
<i>Silicatos</i>	MoSi <sub>2</sub>
<i>Sialos</i>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> con Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<i>Syalons</i>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> con Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>



Los *cerámicos óxidos* son aquellos materiales cerámicos donde la presencia del no-metal en el enlace iónico es justamente el oxígeno. A su vez, este tipo de materiales se clasifica en *óxidos simples* y *óxidos compuestos*.

Entre los óxidos simples destaca el  $\text{SiO}_2$ , debido a su abundancia en la naturaleza. Otros óxidos simples que se encuentran en menor proporción son:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{UO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , entre otros. Las propiedades de los óxidos simples pueden ser modificadas por aditivos, dando lugar a lo que se denomina como cerámico óxido compuesto.

Como una consecuencia de que  $\text{SiO}_2$  es abundante, los aditivos a esta molécula serán entonces los de mayor importancia para la formación de óxidos compuestos, los cuales se les denomina *silicatos*. Existen otro tipo de óxidos compuestos de menor uso como los boratos, carbonatos, oxalatos, nitratos, titanatos, y demás. Entre dichos cerámicos, se encuentran los de aplicación electrónica; de los cuales figuran:

- 1) Para Sustratos:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ,  $\text{BeO}$  y  $\text{AlN}$ ;
- 2) Para Capacitores:  $\text{BaTiO}_3$ ;
- 3) Para actuadores y transductores: Titanato de Zirconia y Plomo ( $\text{PZT}$ ), Nitruro de plomo-magnesio ( $\text{PMN}$ ), Nitruro de titanio de magnesio y plomo ( $\text{PMTN}$ );
- 4) Para Varistores: Materiales con base de  $\text{ZnO}$ ;
- 5) Para Sensores de  $\text{O}_2$ : Cerámicos con base de  $\text{ZrO}_2$ ;
- 6) Para Sensores de temperatura:  $\text{NiO}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; y
- 7) Para empaquetados o dispositivos: una variedad de materiales vítreos.

### II.3 El Titanato de Bario: BaTiO<sub>3</sub>

El BaTiO<sub>3</sub>, es un material cerámico óxido compuesto, dado por la unión eutéctica de dos óxidos simples: BaO y TiO<sub>2</sub>.

Siendo este cerámico un óxido compuesto, es un caso interesante de análisis, ya que presenta, para la fase sólida, un número sumamente grande de transformaciones de estado estable. La fase que presenta a temperaturas más bajas, esto es, de 0°K hasta 173°K (-100°C) es romboédrica; a esta temperatura tiene presencia la primer transformación de fase a ortorrómbica; la siguiente transformación ocurre a 273°K (0°C), donde el titanato de bario presenta estabilidad en forma tetragonal; para la temperatura de 395°K (122°C) el material forma cúbico simple; y finalmente, a una temperatura de 1733°K (1460°C) ocurre en el cerámico la última transformación, formando la estructura cúbica centrada en las caras. La fase sólida se transforma a líquida a una temperatura 1889°K (1616°C).

Una de las propiedades más interesantes del titanato de bario es el calor específico, ya que muestra la forma en que se da la rapidez de calentamiento y enfriamiento. Básicamente, el calor específico a presión constante muestra el siguiente comportamiento:

$$C_{p(T)} = 135 \text{ Joules/mol} - 32.5 \text{ Joules/mol} e^{-\left(\frac{T-298^\circ K}{235^\circ K}\right)}$$

En forma anexa se presenta la curva característica de comportamiento para el titanato de bario.

Una de sus propiedades de mayor interés es su constante dieléctrica, de la que en el siguiente capítulo se hondará con mayor profundidad. A partir que se descubrió en el titanato de bario una constante dieléctrica alta, de hecho, la más alta entre los materiales, su uso como parte fundamental en un capacitor comenzó; la cual puede ser activada y controlada durante un gran intervalo de temperatura. Además, dicho material es considerado como piezoeléctrico. Debido a lo anterior, se ha convertido en uno de los materiales comúnmente utilizados hoy en día en el área electrónica.

# ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL

## III.1 Tratamientos Térmicos

El tratamiento térmico es un proceso mediante el cual se modifican las propiedades físicas de un material al someterlo a cambios de temperatura.

## III.2 Clasificación de los Tratamientos Térmicos

Los tratamientos térmicos se clasifican acorde su alteración en el material: superficiales o totales.

Los tratamientos térmicos superficiales se caracterizan por afectar las propiedades en las fronteras del material. Entre los más importantes destacan el cementado, carburado, nitrurado y galvanizado, por mencionar sólo algunos de los más importantes.

Los tratamientos térmicos totales son aquellos procesos donde se modifica todo el material, a partir de su estructura cristalina. Este proceso puede consistir en el mejoramiento nuevo de alguna propiedad, o bien, el recuperar condiciones anteriores a alguna distorsión.

Entre los tratamientos térmicos de mejora, el más representativo de este grupo es el templado.

Para los tratamientos térmicos, donde se busca como objetivo el recuperar, parcial o totalmente, las propiedades de un material se tienen el recocido, el normalizado y el envejecimiento, como exponentes más característicos.

Dentro de este último grupo, el envejecimiento puede darse de dos maneras: natural o artificial.

### **III.3 Tipos de Envejecimiento**

Como ya mencionó en apartado anterior, el envejecimiento es un tratamiento térmico mediante el cual se recuperan las condiciones físicas.

Una vez que un material se somete a un tratamiento térmico donde se alteran sus características físicas, como en el templado, el material atraviesa por un estado metaestable, donde éste no aparenta un cambio físico significativo en el tiempo para el corto plazo; pero para periodos de observación de mayor duración, dichas características que aparentemente son fijas, se muestran en su variabilidad.

El envejecimiento termina cuando el material completa su ciclo de estabilización, de manera que ya no presenta cambios en el tiempo.

El tratamiento térmico de envejecimiento puede darse de dos formas: natural o artificial.



El envejecimiento natural se da a condiciones ambientales, de manera que el cambio en sus propiedades no se afecta con otra intervención térmica.

A diferencia del envejecimiento natural, el envejecimiento artificial basa su operación en el hecho de que la difusión de la masa tiene como función a la temperatura; ante lo cual, se incrementa este valor hasta un punto que no afecte en una nueva recristalización del material, de manera que se pierda la estructura obtenida con un tratamiento térmico previo.

De esta manera, el envejecimiento artificial acelera el mecanismo de la difusión, teniendo ahora tiempos más cortos para el abatimiento de la metaestabilidad.

## CAPACITANCIA

Las propiedades físicas de un material pueden clasificarse acorde al proceso para el cual éste va a ser utilizado. Debido a esto, las propiedades físicas pueden ser de tipo térmica, eléctrica, mecánica, hidráulica, entre otras.

### IV.1 Propiedades Eléctricas

Los materiales poseen tres características desde el punto de vista eléctrico: resistividad, permeabilidad e inductancia.

La resistividad eléctrica es una medida de su oposición para el transporte de electrones ante una diferencia de potencial.

La resistencia es el dispositivo mediante el cual se dispone de esta propiedad. La manera de determinar el valor de una resistencia es la siguiente:

$$R = \rho \frac{A}{L}$$

donde, **R** es el valor de la resistencia ( $\Omega$ ),  $\rho$  es la resistividad del material ( $\Omega/m$ ), **A** es el área transversal al flujo de electrones ( $m^2$ ) y **L** es la longitud de avance para el flujo (m).

La inductancia de un material es la capacidad que posee éste para convertir la energía de tipo eléctrica, a una energía de tipo electromagnética.

La permeabilidad eléctrica es la característica que posee un material para almacenar energía, desde este punto de vista.

#### IV.2 Capacitor y Capacitancia

El dispositivo físico que se utiliza para aprovechar la permeabilidad eléctrica es el capacitor, y la forma en que es llevado a cabo es la capacitancia.

Un capacitor consta de un par de placas paralelas, separadas una cierta distancia, con un material de alta resistividad entre ambas placas; de manera que restringe el flujo de electrones entre ellas. A dicho material se le conoce como dieléctrico.

La capacitancia en uno de estos dispositivos se determina de la siguiente manera:

$$C = \epsilon \frac{A}{L}$$

donde C representa la capacitancia del dispositivo (Faradays),  $\epsilon$  es la permeabilidad del material (Faradays/m), A es el área de las placas ( $m^2$ ) y L es la distancia que separa ambas placas(m).

El caso donde la permeabilidad es más baja debe de ser justamente donde hay ausencia de material (vacío), el cual posee una permeabilidad de  $8.8562 \times 10^{-12}$  Fa/m.

La razón entre la permeabilidad de un material  $\epsilon$ , cualesquiera que éste sea, y la permeabilidad del vacío  $\epsilon_0$  se conoce como la constante dieléctrica,  $K$ .

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

El aire es el material de constante dieléctrica más baja, con un valor de 1.0006; mientras que el titanato de bario, o alguna de sus dopaciones con estaño, aluminio, hierro, o plomo; superan el valor de 2000.

# EXPERIMENTACIÓN

## V.1 Descripción del Problema

Como parte de la manufactura de capacitores en base a titanato de bario como material dieléctrico, se tienen que evaluar sus condiciones de operación eléctricas más importantes: resistencia y capacitancia. Esto anterior para obtener el aseguramiento del valor real de dichas propiedades.

Dado que al aplicar una diferencia de potencial y medir el comportamiento del material, en éste incurren incrementos puntuales de temperatura que modifican la estructura cristalina, es necesario el recurrir a un tratamiento térmico que recupere las condiciones operacionales normales que poseía el capacitor.

Una vez que el tratamiento térmico es llevado a cabo, se tiene un tiempo de estabilización o reposo, donde el material recupera sus condiciones normales. En dicho tiempo ocurre un envejecimiento de tipo natural.

## V.2 Hipótesis

La hipótesis de dicha tesis es la siguiente:

*El Envejecimiento Artificial disminuye el Tiempo de Reposo*



### **V.3 Antecedentes**

El tiempo de reposo necesario para llevar a cabo el envejecimiento natural en el tipo de capacitores a experimentar es de diez horas. Esto llevado a cabo a condiciones de presión atmosférica y temperatura de cuarto controlada a 25°C.

Previo al reposo, el material se somete durante un periodo de 90 minutos a 150°C, para después enfriarse a las condiciones de cuarto antes descritas.

A la temperatura de 122°C, el titanato de bario cambia su estructura cristalina de tetragonal a cúbica simple, por encima de esta temperatura. Los 90 minutos son el período de tiempo para su homogenización.

### **V.4 Diseño de Experimentos**

Se toman 8 lotes de un capacitor cuyo valor nominal de capacitancia es de 100 nanofaradios ( $\pm 5$  nFa). Cada prueba monitoreada consta de 50 fichas, para los diferentes lotes.

El primer muestreo se realizó antes del inicio de las pruebas, evaluando condiciones iniciales.

El siguiente muestreo fue realizado después del equipo de medición Palomar 3300, donde se sometió el capacitor a pruebas de capacitancia, resistencia eléctrica [nominal (50volts) y flash (200volts)], así como su factor de disipación (DF).

El posterior muestreo fue realizado después de una prueba de resistencia eléctrica, de mayor resolución, en un equipo de medición ADAM tester.

Los capacitores pasan al horno donde se someten a 150°C durante una y media horas.

Una vez que los capacitores se encuentran fuera del horno, se dividieron en dos secciones, donde una parte prosiguió con el envejecimiento natural (25°C durante 10 hrs.), mientras que la otra sección se introdujo a otro horno para llevar a cabo el envejecimiento artificial.

El envejecimiento artificial efectuado consistió en mantener las fichas en otro horno a 110°C, temperatura inferior a la de transformación de fase.

Se toman muestras, en ambos casos, de 50 fichas; dándose un monitoreo durante 4 horas, por períodos de 15 minutos.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

No se encontró un comportamiento distinto entre los 8 grupos monitoreados; además, entre los capacitores que fueron sometidos al envejecimiento natural, así como al artificial, tampoco se identificó diferencia alguna.

Debido a lo anterior, se agrupó el comportamiento para este dieléctrico en el gráfico que se presenta en el anexo (pag. 23).

Como se puede apreciar en el gráfico, la media distribucional ( $\bar{A}$ ) decrece conforme avanzan las pruebas eléctricas, y aumenta al normalizarse. Posterior al horno se estabiliza en una y media horas, considerando exclusivamente este parámetro.

Analizando la distribución normal, acorde al criterio de 6 sigma (3 veces la desviación estándar para cada extremo de la media), en el cual tiene un criterio de 3.4 ppm, considera un comportamiento normal a partir de la primera hora.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## VI.1 Conclusiones

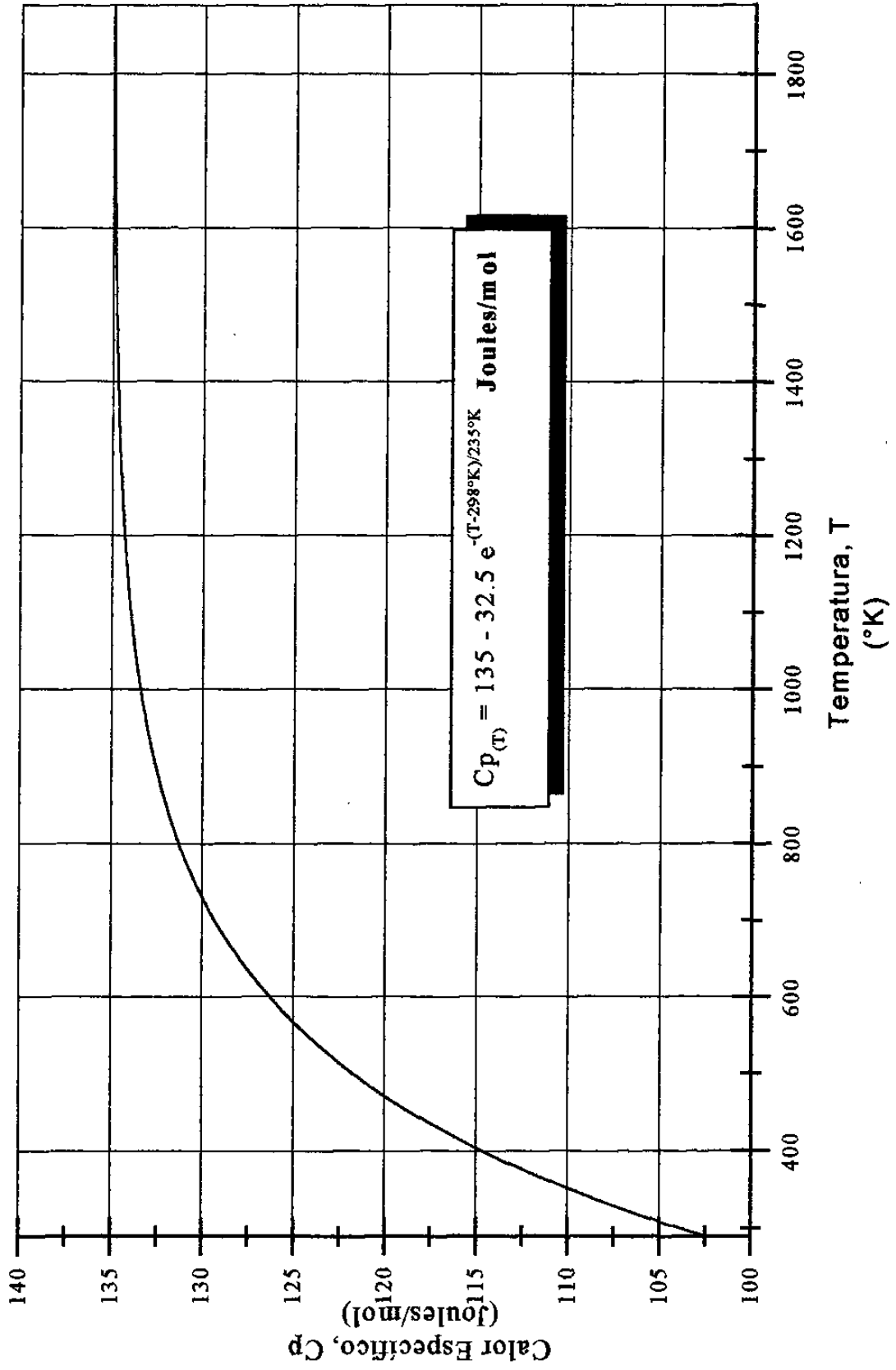
- El tiempo necesario para el reposo del dieléctrico de estudio es suficiente en 1½ horas.
- La rapidez difusional de la recristalización no muestra cambio dentro de la primer hora de estudio, ya sea con envejecimiento natural o artificial.

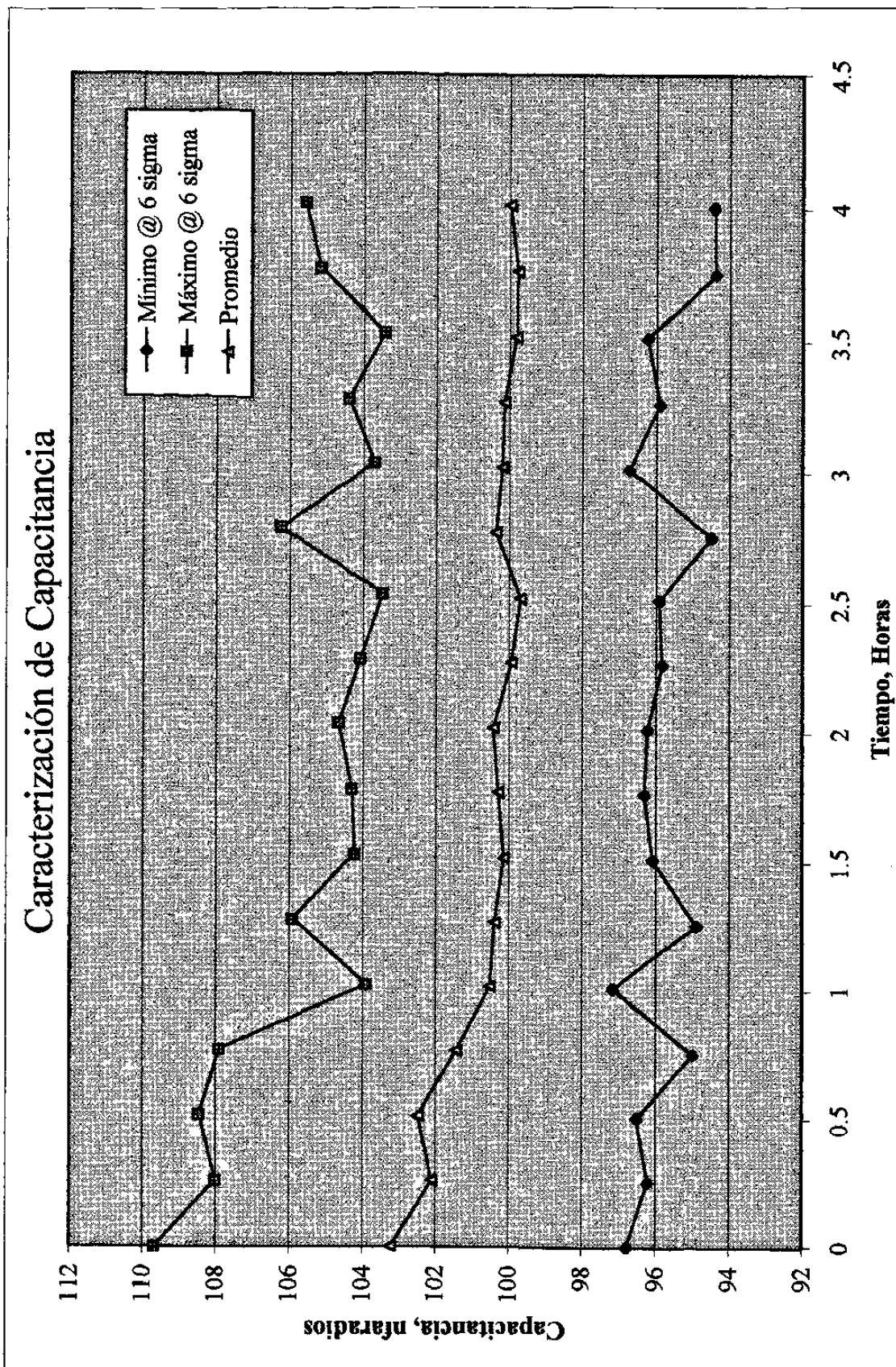
## VI.2 Recomendaciones

- Evaluar el enfriamiento, cambiando el medio para éste; esto es, en lugar de enfriarlo al aire del ambiente, puede ser en agua, aceite, o cualesquier otro medio.
- Utilizar este análisis de envejecimiento como base para el estudio de nuevos productos dieléctricos

## **ANEXOS**

# Caracterización del Calor Específico versus la Temperatura





## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dietrich Munz & Theo Fett, *Ceramics*, Springer-Verlag, 1998.
2. Samuel J. Schneider, *Engineered Materials Handbook, Volume 4, Ceramics and Glasses*, ASM International, 1991.
3. Harvey E. White, *Física Moderna, Volumen 1*, UTEHA, 1982.
4. W. David Kingery, *Physical Ceramics, Principles for Ceramic Science and Engineering*, JW & S inc., 1997.



