



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**

Instituto Tecnológico de Cd. Victoria

**“ESTUDIO DE CONFIABILIDAD DE LOS CAPACITORES DE TANTALIO PARA LA FAMILIA T491A, MEDIANTE PRUEBAS DE TEMPERATURA, VOLTAJE Y CORRIENTE”**

**TESIS**

Para obtener el grado de

Maestría Profesionalizante en Ingeniería Industrial

En la Especialidad de Mejoramiento de los Sistemas de Calidad

Presenta:

**ING. TADEO HILARIO POSADAS GARCÍA**

Número de Control

G-17380852

Director de Tesis

**DR. RICARDO DANIEL LÓPEZ GARCÍA**

Cd. Victoria, Tam.

17 de Diciembre del 2019



Blvd. Emilio Portes Gil No. 1301 Pte. A.P. 175 C.P. 87010 Cd. Victoria, Tam.

Tels. 01 (834) 153 2000, e-mail: [informacion@itvictoria.edu.mx](mailto:informacion@itvictoria.edu.mx) , [www.itvictoria.edu.mx](http://www.itvictoria.edu.mx)



“Verdad, Honestidad y Servicio”

Cd. Victoria, Tam., a 03 de diciembre de 2019  
**AREA:** División de Estudios de Posgrado e Inv.  
**OFICIO:** DEPI-244/2019  
**ASUNTO:** Autorización de impresión de Tesis.

**C. ING. TADEO HILARIO POSADAS GARCIA**  
**P R E S E N T E.-**

De acuerdo con el fallo emitido por la COMISIÓN REVISORA de su trabajo recepcional de tesis de grado, Maestría en Ingeniería Industrial, integrada por: **PRESIDENTE:** C. DR. RICARDO DANIEL LÓPEZ GARCÍA, **CODIRECTOR:** DR. JOSÉ DE JESÚS NAVAR CHAIDÉZ, **SECRETARIA:** C. DRA. ADRIANA MEXICANO SANTOYO, **VOCAL:** C. M.G.A. IVAN GARZA GREAVES, **VOCAL SUPLENTE:** C. DR. MARCO AURELIO JIMENEZ GÓMEZ, y considerando que llena los requisitos establecidos en el instructivo de Procedimientos para titulación, se **AUTORIZA** la impresión de su trabajo recepcional titulado:

**“ESTUDIO DE CONFIABILIDAD DE LOS CAPACITORES DE TANTALIO PARA LA FAMILIA T491, MEDIANTE PRUEBAS DE TEMPERATURA VOLTAJE Y CORRIENTE”**

Lo anterior para su conocimiento y efectos consiguientes.

**ATENTAMENTE**  
*“Verdad, Honestidad y Servicio”*



**DR. AUSENCIO AZUARA DOMÍNGUEZ**  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN.

C. p. Anhwa



**INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE CD. VICTORIA**  
DEPARTAMENTO DE  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



## **Agradecimientos**

Agradezco al Tecnológico Nacional de Ciudad Victoria por las oportunidades que me brindaron en numerosas ocasiones, cuando pensé en algún momento que podría llegar a ser imposible siquiera a ver iniciado esta travesía.

Quiero dar un agradecimiento muy especial a mis maestros MC. Ivan Garza, Dra. Adriana Mexicano, Dr. Ricardo López, Dr. Marco Aurelio y el Dr. Jesús Navar y compañeros de generación Ing. Carolina Molano, Ing. Rene Ramírez e Ing. Gerardo Huerta por los consejos que me dieron y sobre todo por el apoyo que recibí de parte de cada uno en algunos momentos difíciles por los que pase, también agradezco al Conacyt y a la planta de Kemet de Ciudad Victoria por el apoyo recibido.

## **Dedicatoria**

Este trabajo se lo quiero dedicar a mis padres y muy en especial a mi padre que aunque lamentablemente ya no está físicamente conmigo, aun lo llevo en mi mente y mi corazón. Alguien sencillo y de buen corazón, siempre con una sonrisa y siempre ahí para mí, que a pesar de muchas circunstancias, siempre tuve su apoyo para salir adelante. Gracias a él y a mi madre que nunca me han dejado solo, he podido lograr todo lo que me he propuesto. Este esfuerzo se los dedico a ustedes, mis padres, Emilia Garcia y Telesforo Posadas.

## Contenido

Resumen .....	1
1.- INTRODUCCIÓN.....	2
1.1.-Antecedentes .....	2
1.2.- Planteamiento del problema .....	5
1.3.- Hipótesis .....	7
1.4.- Justificación .....	7
1.5.- Objetivo general .....	7
1.5.1.- Objetivos específicos.....	7
2.- Marco teórico .....	8
2.1.- Capacitores electrolíticos .....	8
2.1.1.- Interpretación física .....	8
2.1.2.- Definición y nomenclatura .....	11
2.1.3.- Relación entre voltaje y corriente .....	11
2.2.- Tipos de capacitores electrolíticos .....	12
2.2.1.- Capacitores de cerámica.....	13
2.2.2.- Capacitores de Aluminio.....	14
2.2.3.- Capacitores para caso de estudio .....	14
2.3.- Capacitores de Ta .....	14
2.4.- Procesos de fabricación de los capacitores de Ta .....	16
2.4.1.- Manufactura de Ánodos .....	16
2.4.2.- Montaje Superficial .....	19
2.5.- Mediciones y pruebas a los capacitores .....	22
2.6.- Normas empleadas .....	22
2.7.- Marco referencial .....	22
2.8.- Capacitores de Ta (caso de estudio) .....	24
3.- Metodología experimental .....	27
3.1.- Introducción .....	27
3.2.- Obtención del material para su estudio.....	27
3.3.- Tratamientos térmicos .....	28
3.4.- Preparación metalográfica.....	28
3.5.- Caracterización mediante microscopía óptica (MO) .....	29

3.6.- Caracterización mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) .....	29
3.7.- Análisis térmico diferencial (DTA) .....	30
3.8.- Simulación mediante K-SIM .....	30
3.9.- Pruebas de Estabilidad térmica .....	30
3.10.- Pruebas de ruptura de Voltaje .....	32
4.- Resultados .....	34
4.1.- Análisis de estabilidad térmica.....	34
4.2.- Análisis de Pruebas de ruptura de Voltaje .....	38
4.3.- Caracterización microestructural .....	41
4.4.- Análisis térmico .....	45
5.- Conclusiones .....	47
6.- Bibliografía.....	49

## Índice de tablas

Tabla I Escala de medición de capacitores .....	2
Tabla II Descripción del número de parte de los capacitores .....	6
Tabla III Resultados promedio de evaluaciones de LKG a diferentes rangos de temperatura ..	34
Tabla IV Promedio de resultados de evaluación de ESR a diferentes rangos de temperatura ..	35
Tabla V Cantidad de capacitores probados y los voltajes a los que fallaron .....	39

## Índice de Figuras

Figura 1.1.- Estructura del Capacitor de Tantalio .....	3
Figura 2.1.- Representación de un capacitor descargado y uno cargado .....	9
Figura 2.2.- Circuito abierto con capacitor descargado .....	9
Figura 2.3.- Circulación de las cargas positivas y negativas en un circuito.....	10
Figura 2.4.- Circuito con capacitor cargado.....	11
Figura 2.5.- Rangos de capacitancia, frecuencia y voltaje de los capacitores AEC, TEC y MLCC .....	12
Figura 2.6.- Relación entre ESR y Rizo de voltaje.....	13
Figura 2.7.- Construcción de un capacitor de Tantalio .....	15
Figura 2.8.- Ánodos sinterizados y unidos a barra de aluminio para transporte durante el proceso.....	17
Figura 2.9.- Capacitor seccionado mostrando las capas del pentóxido de tantalio y dióxido de manganeso .....	18
Figura 2.10.- Ánodos ensamblados en una barra de aluminio y un esqueleto.....	20
Figura 2.11.- Capacitores moldeados .....	21
Figura 2.12.- Diagrama a bloques del proceso de fabricación de capacitores de Tantalio.....	21
Figura 3.1.- Diagrama de flujo para la preparación de muestras y realización de pruebas.....	27
Figura 3.2.- Imagen de dimensiones de capacitores terminados.....	29
Figura 3.3.- Capacitor seccionado.....	30
Figura 3.4.- Diagrama de interconexión del equipo de medición de Estabilidad térmica .....	31
Figura 3.5.- Diseño experimental de los ciclos de temperatura a los que fueron sometidas las piezas .....	32
Figura 4.1.- Gráfica de promedios de LKG a diferentes rangos de temperatura.....	34
Figura 4.2.- Gráfica de ESR a diferentes rangos de temperatura.....	36
Figura 4.3.- Gráfica de voltaje al que se destruyeron los capacitores en la prueba de SSST ....	40

Figura 4.4.- Estructura interna de los capacitores de Ta estudiados .....	42
Figura 4.5.- Formación de capas sobre el ánodo de Ta .....	43
Figura 4.6.- Espectrograma por EDAX de la estructura interna de los capacitores .....	44
a.- ánodo de Ta .....	44
b.- Compuestos en el dieléctrico.....	44
c.- Capa de AG.....	44
d.- última capa del capacitor .....	44
Figura 4.7.- Análisis térmico diferencial (DTA) de un capacitor de Ta con proceso terminado ..	46

## Resumen

La presente investigación está enfocada en analizar la confiabilidad en el desempeño de los capacitores electrolíticos de tantalio de acuerdo a especificaciones de catálogo bajo las normas internacionales EIA 535BAAC para capacitores de tipo T491A con capacitancia y voltaje de 47  $\mu\text{F}$ , 6 V respectivamente. Este tipo de capacitores son ampliamente empleados en la industria automotriz y telecomunicaciones, utilizado principalmente en componentes de control los cuales pueden estar sujetos a cambios continuos de temperatura y/o voltaje.

Debido a lo anterior, en la presente investigación se utilizaron rangos de temperatura entre  $-55^{\circ}\text{C}$  y  $125^{\circ}\text{C}$ , para evaluar el comportamiento de los capacitores de Ta, las cuales son temperaturas especificadas por los clientes para el funcionamiento de sus productos. Por otra parte, el incremento en el voltaje fue evaluado desde los 0 V hasta 30 V. Los resultados fueron obtenidos experimentalmente, mediante pruebas *in situ*, así como de microscopia electrónica de barrido (MEB) utilizadas para determinar las fases, la medición de las capas de recubrimientos y la composición química de los compuestos o fases presentes en la microestructura del capacitor, el análisis térmico diferencial (DTA) se utilizó para determinar la cinética de transformación a altas temperaturas y determinar las reacciones endotérmicas y exotérmicas presentes. De los resultados obtenidos se puede mencionar que a pesar de que este tipo de capacitores es para uso comercial, mantienen un alto estándar de calidad muy alto en su desempeño bajo las condiciones extremas de temperatura y voltaje utilizadas.

El estudio que se realizará en Kemet, responde a quejas de clientes de los últimos 3 años, donde se han presentado pérdidas cercanas a los 5 millones de pesos. Por lo que el presente trabajo, mostrará un panorama general del grado de confiabilidad de este tipo de capacitores.

## 1.- Introducción

### 1.1.- Antecedentes

Un capacitor es un elemento que está formado por dos placas, que a su vez están separadas por un material aislante llamado dieléctrico y tiene la capacidad de almacenar carga eléctrica, la cual es positiva en una de sus placas y negativa en la otra. La característica que tiene un capacitor para almacenar carga se llama capacitancia. Es decir, es la capacidad que tiene un elemento para almacenar carga entre sus placas a una diferencia de potencial (voltaje) dado entre sus terminales [1]. La unidad de medida que se utiliza para medir la capacitancia en un capacitor es el "faradio" (F). Las unidades de medida más comunes que se utilizan son picofaradio, nano faradio, microfaradio, mili faradio.

**Tabla I Escala de medición de capacitancia.**

picofaradio = pF	= 1 x 10 <sup>-12</sup> F. = 0.000000000001 F.
nano Faradio = nF.	= 1 x 10 <sup>-9</sup> F. = 0.000000001 F.
microfaradio = μF.	= 1 x 10 <sup>-6</sup> F. = 0.000001 F.
mili Faradio = mF.	= 1 x 10 <sup>-3</sup> F. = 0.001 F.

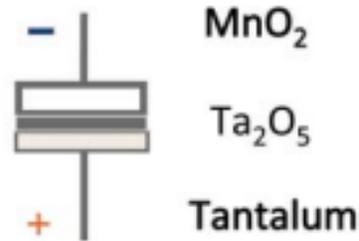
La fórmula para calcular la capacitancia de un capacitor de acuerdo a su construcción física esta descrita en la ecuación 1.1.

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

**Ec.1.1**

Dónde:  $\epsilon$ = permisividad del material dieléctrico (F/m),  $A$ = área de cualquiera de las 2 placas ( $m^2$ ),  $d$ = distancia entre placas ( $m$ ).

La Figura 1.1, muestra la estructura simbólica de cómo está compuesto un capacitor.



**Figura 1.1 Estructura del Capacitor de Tantalio. [2]**

Partiendo de la definición de la capacitancia se podrá deducir la relación que existe entre el voltaje y la corriente en un capacitor.

De acuerdo a la definición, la capacitancia es igual a la mostrada en la ecuación 1.2:

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{Ec.1.2}$$

Dónde:  $C$  = capacitancia del capacitor (faradios),  $Q$  = carga almacenada (coulomb),  $V$  = voltaje en las terminales del capacitor (volts).

Algunas razones comunes de fallas en la electrónica son los contaminantes ambientales y las condiciones como la temperatura y la humedad, junto con otras fallas derivadas de la vibración, el rizo de voltaje (diferencia de potencial entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo de la forma de onda de la salida de voltaje DC del capacitor) restante después de rectificar una señal de corriente continua) y la sobretensión. Muchas pruebas de confiabilidad tradicionales buscan simular el entorno de uso de un componente. Y debido a que este tipo de pruebas requieren mucho tiempo de proceso, por lo anterior las pruebas aceleradas se hacen necesarias. Las pruebas aceleradas significan la pronta aparición de fallas en los capacitores con el único propósito de cuantificar las características de vida útil del producto en condiciones normales de

uso. En las pruebas aceleradas las condiciones de prueba se intensifican para reducir el tiempo requerido para obtener un efecto debilitador similar al resultado de las condiciones normales de servicio.

Existen capacitores para una gran diversidad de aplicaciones, los más comunes o mejor conocidos en el mercado son los utilizados en la industria de las telecomunicaciones, electrónica, telefonía celular, convertidores de corriente DC/DC, desacoplamiento y filtrado en industria automotriz; están también los que manejan un Serie de Resistencia Equivalente Baja (Low ESR) debido a que son muy utilizados en la industria automotriz y de telecomunicaciones pero con una mayor capacitancia gracias a su bajo ESR, además se utilizan para el control de unidades que requieren de una alta capacidad de risis(componente de corriente alterna que queda después de rectificar una señal) de corriente, están también los que están diseñados para soportar temperaturas mayores a los 125 °C, los de alta fiabilidad, con alta eficiencia volumétrica los de fusible que ofrecen una protección contra fallas de cortos circuitos, los de uso automotriz con baja fuga de corriente y los de usos especiales como la industria aeroespacial, como aviones y cohetes o transbordadores espaciales, incluso para equipos de excavación, en la milicia en sus tanques, aviones, helicópteros, etc.. Algunas de las principales industrias a nivel mundial que utilizan este tipo de capacitores son Bosch, Flextronics, Huawei, TRW, Nasa y Militares.

La gran demanda industrial de capacitores de tantalio miniaturizados ha determinado el resurgimiento de la metalurgia extractiva del tantalio y la puesta punto de métodos de separación niobio-tántalo basados en la extracción con disolventes orgánicos como la butilisobutilcetona. La reducción a tantalio metálico al estado de polvo de la calidad exigida en los capacitores de tantalio se consigue mediante reducción de  $K_2TaF_7$  con sodio metálico en un horno eléctrico, en unas condiciones específicas y con un control muy fino de las variables que afectan al proceso. Sin embargo, hay que dejar claro que los capacitores de tantalio son componentes electrónicos que

en la actualidad son muy estables a las variaciones de temperatura y presentan una gran fiabilidad incluso en ambientes severos [3].

## **1.2.- Planteamiento del problema**

El problema se centra en una empresa dedicada a la fabricación de capacitores electrónicos de tantalio (Ta) mediante un proceso electrolítico, los capacitores son utilizados en la industria de las telecomunicaciones, automotriz, la aeroespacial, industrial, militar. La empresa Kemet produce más de 3,000,000 de piezas diarias, para diferentes clientes como Bosch, TRW, Huawei, Tokin, Apple, NASA, NOKIA, Arrow Electronics, Digi-Key, Continental y Flextronic. Uno de los capacitores que fabrica esta empresa es del tipo T491A, el cual es un capacitor comercial muy pequeño que se fabrica en esta empresa, y tiene gran volumen en pedidos superando los 4,000,000 de piezas por año.

En los últimos 3 años este tipo de capacitor ha presentado algunas fallas durante su funcionamiento en equipos ya con el cliente y se han originado quejas que han requerido atención.

Las fallas más frecuentes de los capacitores manufacturados en Kemet planta Cd. Victoria se dan en un 80% el rompimiento del dieléctrico y el otro 20% está distribuido en fallas de circuito abierto, pruebas físicas y de empaque, además de algunas quejas no clasificadas. Por tal motivo, el presente trabajo está diseñado para evaluar la confiabilidad de este tipo de capacitores bajo pruebas extremas de temperatura, amperaje y voltaje. En la Tabla II, se describen las características físicas y eléctricas que debe tener un capacitor de acuerdo al número de parte [4].

**Tabla II.- Descripción del número de parte de los capacitores.**

T	491	A	476	M	006	A	T	
Clase de capacitor	Serie	Tamaño	Capacitancia Código pF	Tolerancia	Voltaje Nominal	Tasa de falla/diseño	Terminación	Empaquetado (C-SPEC)
T= Tantalio	Industrial	A, B, C, D, E, M, S, T, U, V, W, X	Los dos primeros dígitos representan cifras significativas. El tercer dígito especifica el número de ceros.	K = ±10% M = ±20%	2R5 = 2.5 003 = 3 004 = 4 006 = 6.3 010 = 10 016 = 16 020 = 20 025 = 25 035 = 35 050 = 50	A = N/A	T = 100% Mate estañado (Sn) enchapado H = Soldadura estándar encubierta (SnPb 5% Pb mínimo) G = Dorado (A, B, C, D, X solamente) N = No magnético 100% estaño (Sn) M = No magnético (SnPb)	En blanco = 7" carrete 7280 = 13" carrete

### **1.3.- Hipótesis**

Someter a los capacitores de número de parte T491A fabricado en Kemet a pruebas de temperatura y voltaje fuera de rango, determinará el nivel de eficiencia y calidad del producto, asegurando a los clientes que este tipo de capacitor cumple las características eléctricas requeridas.

### **1.4.- Justificación**

Para Kemet es importante conocer la calidad de los productos que produce, ya que da la confianza de que sus clientes estarán satisfechos y tendrá los argumentos para poder decir qué tan confiable es su producto al momento de enfrentar alguna queja de cliente por algún problema de cualquier tipo. Los estudios de confiabilidad son importantes para toda empresa ya que permiten conocer debilidades para poder reforzar y encontrar áreas de oportunidad para mejorar y hacer las cosas cada vez con mejor calidad y eficiencia.

### **1.5.- Objetivo general**

Analizar la confiabilidad de los capacitores de tantalio en diferentes rangos de temperatura y voltaje.

#### **1.5.1.- Objetivos específicos**

- Evaluar el crecimiento del Yield (la eficiencia o también la menor cantidad de piezas perdidas en el proceso) de los capacitores T491A476M006 en los últimos 3 años.
- Realizar pruebas de voltaje desde 0 hasta 30 volts.
- Realizar pruebas a diferentes temperaturas desde -55° hasta 125°.
- Analizar las características microestructurales de los capacitores bajo las diferentes pruebas realizadas.
- Analizar el efecto de los ciclos térmicos de temperatura en los capacitores.
- Definir el porcentaje de confiabilidad de los capacitores T491A476M006AT.

## **2.- Marco Teórico**

### **2.1.- Capacitores electrolíticos**

Los capacitores difieren de otros tipos de dispositivos de almacenamiento de energía en que son dispositivos eléctricos pasivos que almacenan pequeñas cantidades de energía eléctrica, a diferencia del dispositivo electroquímico que produce energía, como baterías y pilas de combustible. El rango de energía varía desde múltiples horas de teravatios mantenidas para las partes posteriores en compuestos químicos, hasta vatios-horas mantenidas en capacitores por solo un segundo [1].

Las características del capacitor determinan su uso en diferentes aplicaciones. Los capacitores electrolíticos que utilizan aluminio, tantalio o niobio, se han desarrollado en los últimos 120 años y se utilizan en tarjetas madre de computadoras y fuentes de alimentación más grandes con capacitancia que varía de 1  $\mu\text{F}$  a 2.7 F. Las especificaciones requieren una temperatura mínima de operación de  $-55^\circ\text{C}$  hasta una temperatura máxima de operación de  $125^\circ\text{C}$ , con un porcentaje de variación en la capacitancia de  $\pm 15\%$  en ese rango de temperatura. Con estos parámetros en su lugar, el trabajo se enfoca en producir una gama de materiales para satisfacer estos requisitos.

#### **2.1.1 Interpretación física**

Como ya se ha mencionado los capacitores son elementos compuestos por dos placas, que al mismo tiempo están separadas por un material aislante llamado dieléctrico, que tiene la capacidad de almacenar carga eléctrica, la cual es positiva en una de sus placas y negativa en la otra.

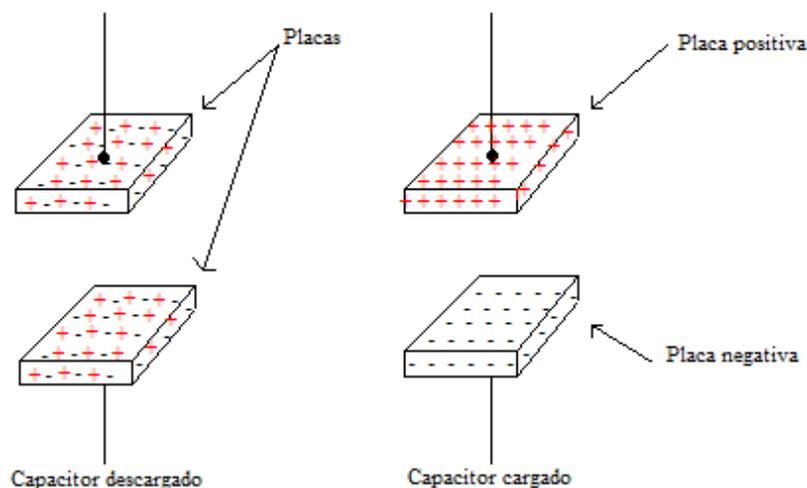


Figura 2.1 Representación de un capacitor descargado y uno cargado [1].

Ahora se puede observar ¿Cómo es que se logra almacenar carga en un capacitor? Para comprender este fenómeno se analizara un circuito compuesto por una fuente de corriente directa, un interruptor, un resistor y un capacitor. Supóngase que el capacitor se encuentra inicialmente descargado, tal como se muestra en la Figura 2.2, donde no circula carga por la red, ya que no existe una trayectoria cerrada que permita el flujo de cargas. También se puede ver que las placas del capacitor se encuentran neutralizadas ya que tienen la misma cantidad de carga positiva que negativa.

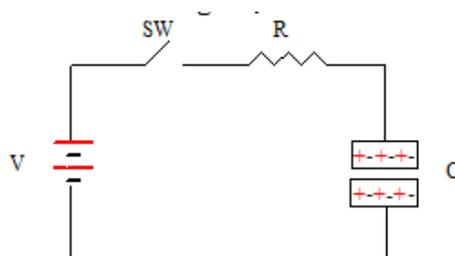
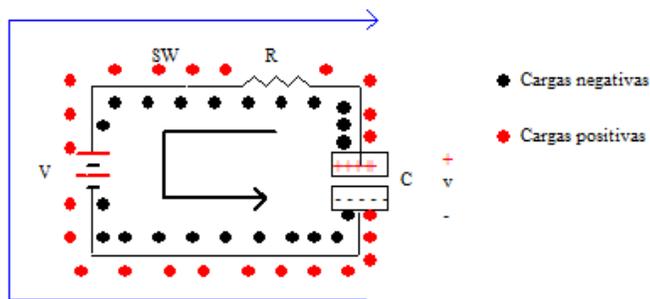


Figura 2.2. Circuito abierto con capacitor descargado [1].

Cuando se cierra el interruptor, las “cargas positivas” de la placa superior del capacitor son repelidas por las terminal positiva de la batería (según la ley de Coulomb) y las cargas negativas de esa misma placa son atraídas por la terminal positiva de la batería, la cual a través de un procesos químico las deposita en la terminal negativa de la batería y posteriormente las repele a la placa inferior del capacitor. En forma similar se comportan las cargas que se encuentran inicialmente en la placa inferior del capacitor, es decir las cargas negativas son repelidas por la terminal negativa de la batería y las cargas positivas son atraídas por esta terminal, las cuales pasan a través de la batería y se depositan en la terminal positiva de la misma, para que posteriormente sean repelidas hacia la placa superior del capacitor, tal como se muestra en la Figura 2.3.



*Figura 2.3. Circulación de las cargas positivas y negativas en un circuito [1].*

El flujo de cargas (corriente) va a continuar hasta que la diferencia de potencial en las placas sea igual al voltaje de la batería (es decir la diferencia de potencial en las terminales del resistor sea igual a “cero”, por lo tanto no circula corriente a través de él). Es por esto, que se dice que un capacitor una vez que se encuentra cargado se comporta como un circuito abierto (no circula corriente) y esto sucede normalmente cuando el capacitor es alimentado por una fuente de corriente directa, tal como se muestra en la Figura 2.4.

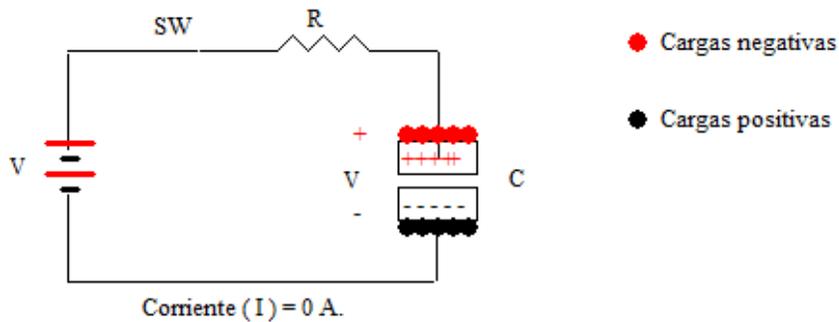


Figura 2.4. Circuito con capacitor cargado [1].

### 2.1.2 Definición y nomenclatura

La característica que tiene un capacitor para almacenar carga se llama Capacitancia. Es decir, es la capacidad que tiene un elemento para almacenar carga entre sus placas a una diferencia de potencial (voltaje) dado entre terminales. El parámetro de capacitancia se abrevia con la letra “C” [1].

### 2.1.3 Relación entre voltaje y corriente

Partiendo de la definición de la capacitancia se podrá deducir la relación que existe entre el voltaje y la corriente en un capacitor, es que la capacitancia es igual a la carga almacenada sobre el voltaje en las terminales del capacitor.

$$C = \frac{Q}{V} \tag{Ec.2.1}$$

Dónde: C= Capacitancia del capacitor (Faradios), Q= Carga almacenada (Coulomb), V= Voltaje en la terminales del capacitor (Volts).

Despejando la carga de la ecuación 2.1 se obtiene:

$$Q = C V \tag{Ec.2.2}$$

Si el voltaje que se aplica en las terminales del capacitor es variable con respecto al tiempo entonces la carga almacenada también varía con respecto al tiempo, por lo tanto la fórmula se convierte en:

$$\frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt}$$

**Ec.2.3**

Muchos filtros de baja frecuencia, temporizadores de tiempos grandes, acoplamiento y desacoplamiento, de bypass (circuitos auto polarizados) requieren de grandes capacidades y pequeño volumen. Los capacitores electrolíticos cumplen estos requisitos por ser los capacitores de más alto rendimiento volumétrico, y de menor costo por microfaradio [5].

## 2.2.- Tipos de capacitores electrolíticos

Los capacitores se diferencian entre sí por el tipo de dieléctrico que utilizan. Materiales comunes son los capacitores de aluminio (AEC), capacitores de tantalio (TEC) y cerámicos (MLCC). Existen en un diseño tubular, y de varias placas y dieléctrico intercalados [6].

El diseño de múltiples placas es un diseño para aumentar el área efectiva de la placa. Entre placa y placa se coloca el aislante y se hace una conexión de placa de por medio como si fueran capacitores en paralelo.

Cada uno de estos tipos de capacitores trabaja en rangos diferentes de voltaje y frecuencia así como también su capacidad de almacenar energía es variada, como se muestra en la figura 2.5 a y b.

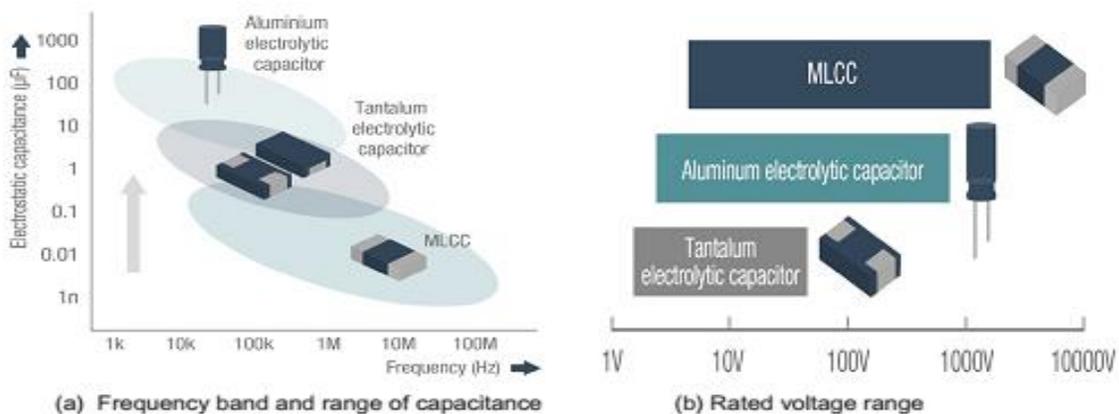


Figura 2.5 Rangos de capacitancia, frecuencia y voltaje de los capacitores AEC, TEC y MLCC

[6].

En la figura 2.6 se aprecia otra diferencia en el ESR (Resistencia de Serie Equivalente) y Ripple voltaje (rizo de voltaje), como en los capacitores de aluminio tienen una capacidad en  $\mu\text{F}$  mayor que los demás tipos de capacitores mencionados como se observa en la figura 2.5, también tiene un ESR y un rizo de voltaje mayor, se puede apreciar un cuarto tipo de capacitor, el polímero de aluminio, que tiene un ESR y un rizo de voltaje muy bajos pero los MLCC tiene rangos aun menores.

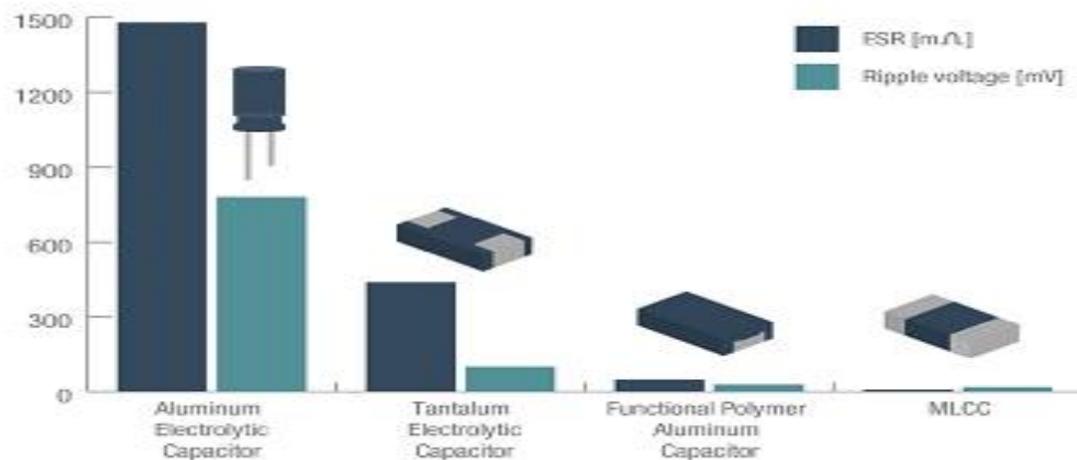


Figura 2.6 Relación entre ESR y Rizo de voltaje [6].

### 2.2.1.- Capacitores de cerámica

Son capacitores en donde las inductancias parasitas y las pérdidas son casi nulas. La constante de estos elementos es muy alta (de 1000 a 10000 veces la del aire).

Algunos tipos de cerámica permiten una alta permisividad y se alcanzan altos valores de capacitancia en tamaños pequeños, pero tienen el inconveniente que son muy sensibles a la temperatura y a las variaciones de voltaje [6].

Hay otros tipos de cerámica que tienen un valor de permisividad menor, pero que su sensibilidad a la temperatura, voltaje y el tiempo es despreciable. Estos capacitores tienen un

tamaño mayor que los otros de cerámica. Se fabrican en valores de fracciones de picofaradios (pF) hasta nano Faradios (nF).

### **2.2.2.- Capacitores de Aluminio**

Compacto pero poco preciso, los hay disponibles en el rango de  $<1 \mu\text{F}$  hasta 1 F, con voltajes de trabajo de hasta varios cientos de voltios. El dieléctrico es una fina capa de óxido de aluminio. Contiene líquido corrosivo y pueden hervir si se conectan al revés. La capa de óxido aislante tiende a deteriorarse en ausencia de voltaje "rejuvenecedor", y eventualmente el capacitor fallará si no se le aplica voltaje. Los electrolíticos bipolares (también llamados No-polarizados o NP) contienen dos capacitores conectados en serie inversa y se usan cuando ocasionalmente la corriente continua pueda invertirse. Sus malas características de frecuencia y temperatura los hacen inservibles para aplicaciones de alta frecuencia [6].

### **2.2.3.- Capacitores para caso de estudio**

Los capacitores de tantalio se utilizan cada vez más en los circuitos electrónicos debido a su alta eficiencia volumétrica, confiabilidad y estabilidad de temperatura en el rango de  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $+125 \text{ }^\circ\text{C}$  [7]. La construcción de capacitor de tantalio comienza con un polvo de tantalio fino de metal puro de tantalio elemental. El ánodo del capacitor se forma a partir de polvo de tantalio presionándolo en un gránulo alrededor de un cable de tantalio [8].

### **2.3.- Capacitores de Ta**

El Tantalio es un elemento que se emplea en lugar del Aluminio para obtener electrodos para capacitores electrolíticos. Con el Tantalio se consiguen más microfaradios por voltio por unidad de volumen que con él Al ya que se logran láminas de tantalio de un espesor de 0.03 mm en comparación con el espesor de las láminas de Al que son de 0.05 a 0.3 mm.

Las características de los capacitores de Tantalio son:

- Menor tolerancia que los de Al (10% menos).
- Gran estabilidad de la capacidad.
- Baja fuga de corriente (3 mA).
- Factor de potencia pequeño (Cantidad de energía eléctrica convertida en trabajo)
- Larga vida en servicio (2000 horas).
- Margen de temperatura de  $-55^{\circ}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ .

En la figura 2.7 se puede apreciar la estructura de un capacitor desde su ánodo hasta su cubierta, se puede observar en el lado derecho de la imagen como están constituidas las capas del capacitor, el ánodo en el centro, cubierto por un dieléctrico de dióxido de tantalio siendo esa la primera capa, la segunda capa es un semiconductor, el dióxido de manganeso, seguido por una tercera capa de carbono y por último una cuarta capa de pintura de plata, también se puede apreciar como un alambre de tantalio esta desde el centro del ánodo, alambre que va fijado a la terminal positiva (+) mostrada en la parte izquierda de la figura, también se observa la terminal negativa que va adherida con un adhesivo de plata sobre el ánodo recubierto, todo esto es encapsulado con un epoxy el cual es gravado con las características del capacitor.

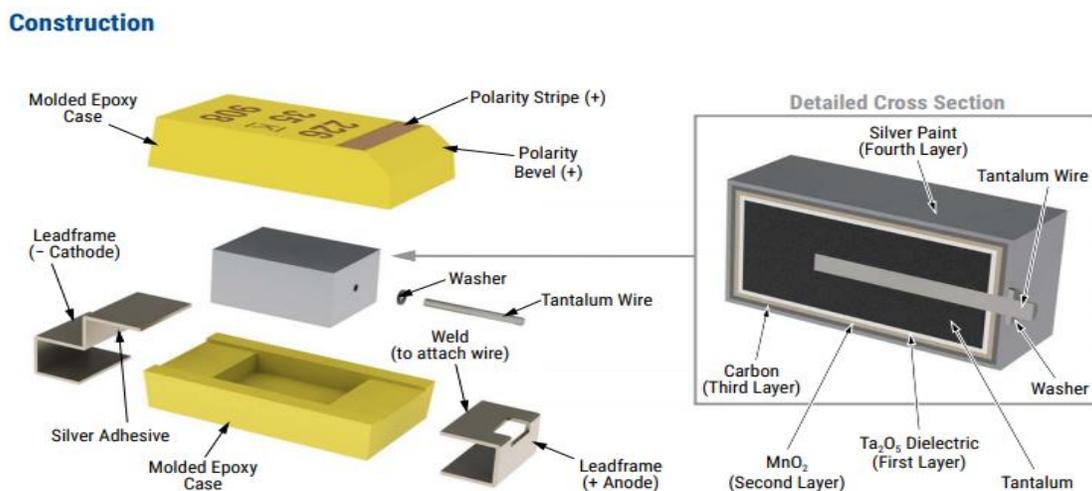


Figura 2.7 Construcción de una capacitor de Tantalio [9]

Las películas delgadas de pentóxido de tantalio ( $Ta_2O_5$ ) son adecuadas para su uso en una amplia variedad de aplicaciones y específicamente en tecnología de dispositivos semiconductores. Chaneliere [10], menciona que lo anterior se debe a que es posible depositarse mediante métodos compatibles con equipos ya disponibles para las líneas de proceso de microelectrónica (sustrato de silicio, sistemas de deposición química de vapor). Este material ya se utiliza en varias aplicaciones, como dispositivos ópticos y sensores de estado sólido, y el principal desafío del futuro será su aplicación como una capa dieléctrica para dispositivos de memoria no volátil (bajo voltaje). Durante la última década, las propiedades de película delgada de  $Ta_2O_5$  han mejorado debido al desarrollo de nuevas técnicas de deposición y procesos de recocido que permiten la formación de capas de alta calidad en términos de propiedades físicas y eléctricas para aplicaciones de microelectrónica.

## **2.4.- Proceso de fabricación de los capacitores de Ta**

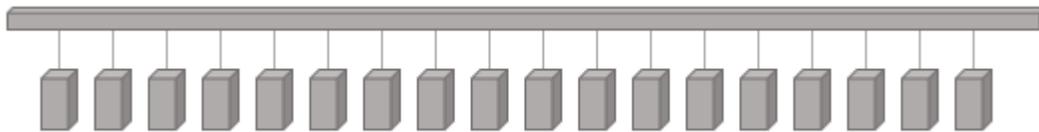
### **2.4.1.- Manufactura de Ánodos**

De acuerdo al proceso de construcción de los capacitores electrolíticos de tantalio en realizado en Kemet, es muy complejo, tiene 5 etapas. El primero paso en la manufactura de los capacitores de tantalio, involucra el fabricar un ánodo a base de tantalio que actúa como el elemento positivo de un capacitor.

El proceso comienza en el nivel de materia prima con polvo de tantalio, un metal semiprecioso no reactivo en forma de polvo suelto. Este polvo se mezcla con un aglutinante para que se adhiera entre sí. Posteriormente, un alambre de tantalio se inserta físicamente, y el ánodo se forma aplicando presión. Este proceso se llama presionar sinterización.

En el siguiente paso, el ánodo se pone en un vacío y se calienta. Eso seca la carpeta, dejando el ánodo muy poroso. El proceso de sinterización, también hecho al vacío, calienta el tantalio a una temperatura muy alta para que las partículas se adhieran entre sí. La sinterización también elimina las impurezas que puedan causar problemas más adelante en el proceso de fabricación. Después del sinterizado, los ánodos pasan por una compuerta de control de calidad (prueba húmeda de preforma) para la aprobación del lote.

El siguiente paso para todos los ánodos es Formación/Proceso Electroquímico. Este proceso es similar a todas las líneas de productos. Primero, los alambres del ánodo se unen sobre las barras portadoras para facilitar el manejo a través de los pasos de procesamiento (ver figura 2.8).

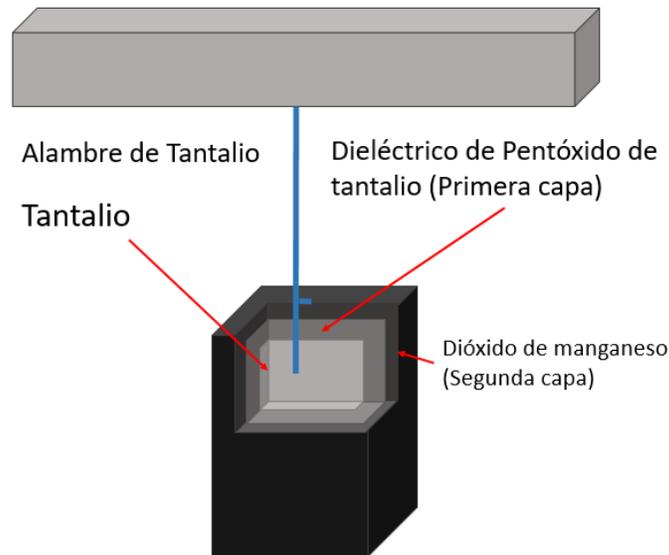


*Figura 2.8. Ánodos sinterizados y unidos a barra de aluminio para transporte durante el proceso.*

El propósito del paso de formación en el proceso es formar el dieléctrico en el ánodo de tantalio. Es lo mismo que “anodizar” e implica sumergir el ánodo en un electrolito con voltaje aplicado para formar pentóxido de tantalio ( $Ta_2O_5$ ) en toda el área superficial del polvo de tantalio cambiará de color. Luego, el electrolito se lava y el ánodo se envía a través de un proceso de tratamiento térmico.

La segunda capa que es la placa negativa (cátodo) de un capacitor de tantalio tradicional, también conocido como el contra electrodo, se forma cubriendo todo el ánodo con dióxido de manganeso ( $MnO_2$ ), que es un semiconductor (ver figura 2.9). Esto se realiza mediante una de

serie de ciclos de inmersión del ánodo en una solución de nitrato de manganeso y posteriormente calentarlo en un horno a temperaturas de 125 °C por un tiempo de 6 horas. Este proceso se conoce como Impregnación. La capa negativa en el producto KO-CAP de KEMET consiste en un polímero orgánico en lugar del dióxido de manganeso. Este polímero ofrece un ESR más baja (resistencia de la serie equivalente) y un modo de falla no catastrófica.



*Figura 2.9. Capacitor seccionado mostrando las capas del pentóxido de tantalio y dióxido de manganeso.*

Ahora, cada grano de tantalio dentro del ánodo está completamente cubierto, primero con el dieléctrico pentóxido de tantalio ( $Ta_2O_5$ ) y luego con el contra electrodo dióxido de manganeso ( $MnO_2$ ); a partir de ahora, todo lo demás se hace en el exterior del ánodo. En el caso de los capacitores de tantalio de dióxido de manganesos tradicionales, esto incluye una inmersión de carbono para proporcionar un contacto eléctrico libre de óxido entre el  $MnO_2$  y la siguiente capa (pintura de plata) y una inmersión de plata para proporcionar un recubrimiento de alta conductividad eléctrica.

Después del proceso electro - químico, otra QC Toolgate (Prueba de calidad) verifica las partes físicas y eléctricas. Los capacitores ya están listos para su ensamblaje y encapsulado. Estos procesos varían según el tipo de capacitor que se está fabricando.

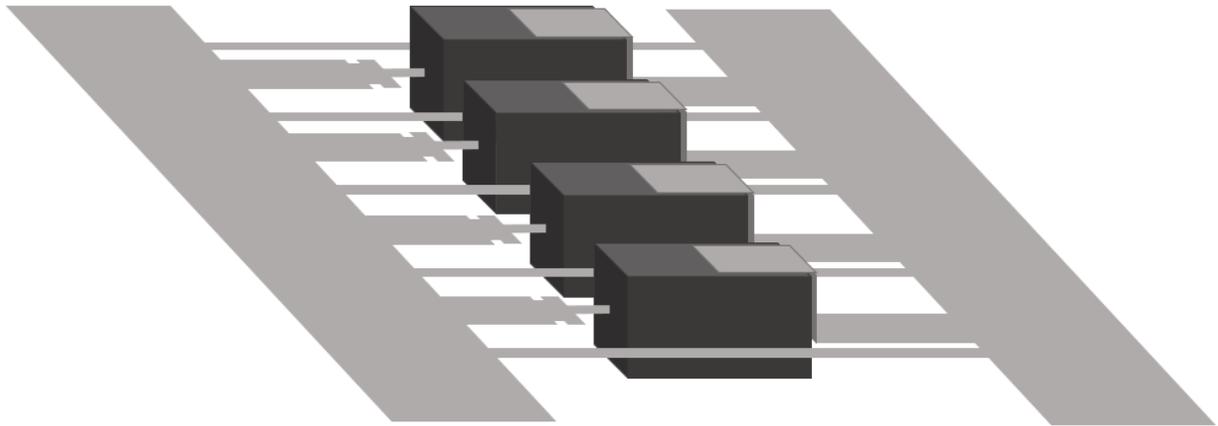
#### **2.4.2.- Montaje Superficial**

La familia de capacitores de montaje en superficie de tantalio, que representa la gran mayoría de la capacidad de producción de KEMET, actualmente incluye siete series: la serie T491 es el producto estándar de grado industrial. La serie T492 es la versión militar que está calificada para Mil-C-55365/8. EL T494 está disponible en todos los valores de CV y tamaños de caja ofrecidos en la línea de productos T491, pero con límites de ESR reducidos. Ofrece baja ESR a un precio económico. El T495 ofrece muy baja ESR y alta capacidad de sobre corriente. El T496 tiene un elemento fusible incorporado que protege contra una falla de cortocircuito, Todas estas series T49x contienen un ánodo (o elemento capacitor) dentro de la caja moldeada.

KEMET también ofrece un capacitor de tantalio de montaje en superficie de ánodo múltiple, la serie T510. El T510 en realidad incorpora múltiples ánodos, conectado en paralelo, dentro de la caja moldeada. Esta construcción de múltiples ánodos permite a KEMET ofrecer los valores de CV más altos y la ESR más baja en el tamaño de carcasa más pequeño de la industria. KEMET fue el primer fabricante en ofrecer esta construcción única de capacitores.

La serie T520 es el producto KO-CAP de KEMET o KEMET Organic. El KO-CAP es un capacitor de tantalio que utiliza un polímero conductor sólido como capa de cátodo en lugar del dióxido de manganeso estándar. Las ventajas del polímero incluyen una ESR muy baja y la eliminación del modo de falla potencialmente catastrófica que puede ocurrir con los capacitores de tantalio estándar en aplicaciones de alta corriente de sobretensión. La serie 530 es un producto KO-CAP de ánodo múltiple.

La operación de ensamblaje para capacitores de montaje en superficie utiliza un marco de conexión que sirve como soporte y, en última instancia, proporciona las terminaciones externas. El cable ascendente de tantalio del ánodo (el lado positivo) está soldado a un portador del marco de conductores mientras que al mismo tiempo, el lado negativo está asentado en un adhesivo epoxi plateado y curado.



*Figura 2.10. Ánodos ensamblados en una barra de aluminio y un esqueleto.*

El siguiente paso es la encapsulación, que incluye el componente ensamblado en una caja protectora de epoxi moldeada. Los capacitores se sujetan entre dos placas de molde, y se produce un flujo de epoxi plástico alrededor de cada uno (ver figura 2.11). El epoxi plástico se cura, luego el capacitor se retira del molde. Las piezas continúan para limpiarse del exceso de epoxy, marcación por láser y separación del cable (separación en el extremo negativo mientras los extremos positivos permanecen conectados para facilitar las pruebas eléctricas).

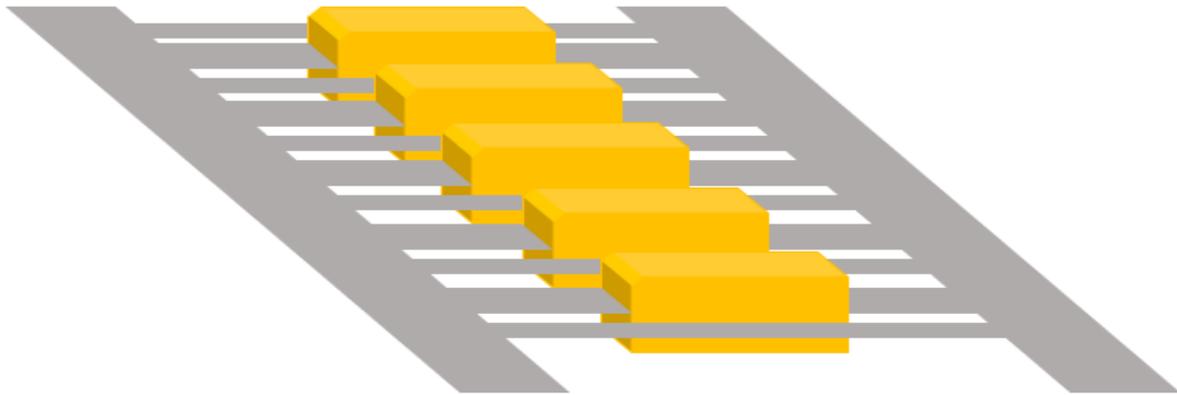


Figura 2.11. Capacitores moldeados.

Estos pasos son seguidos por el acondicionamiento de temperatura/voltaje y el 100% de las pruebas eléctricas de LKG, capacitancia, DF y ESR. La prueba es seguida por una inspección física y una inspección final de QC.

En la figura 2.12, se muestra en un diagrama a bloques del proceso de fabricación de capacitores de tantalio. Como se puede observar, la elaboración de este tipo de capacitores es muy compleja en total cada capacitor pasa por 22 estaciones de procesos donde permanecen diferente tiempo. Un tiempo aproximado en la fabricación de estos capacitores electrolíticos es de 7 días.

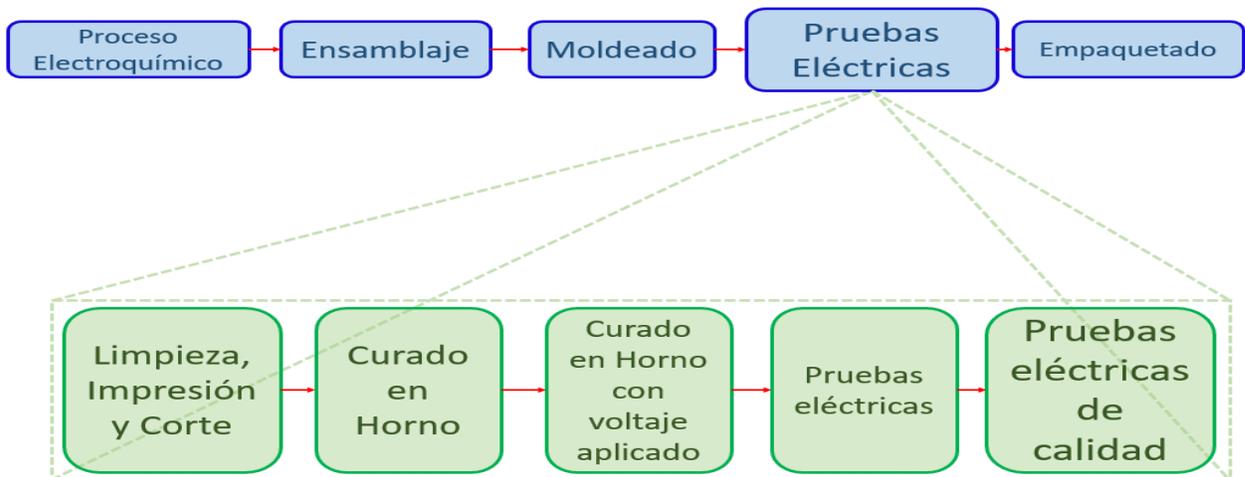


Figura 2.12. Diagrama a bloques del proceso de fabricación de capacitores de Tantalio.

## **2.5.- Mediciones y pruebas a los capacitores.**

Los capacitores son sometidos a pruebas eléctricas de capacitancia, ESR, DF y Leakage principalmente, en ocasiones se requiere, una muestra sometida a pruebas de destrucción y de estrés térmico, con la finalidad de asegurar que las especificaciones que el cliente solicita. Las pruebas fuera de parámetros de funcionamiento óptimo de los capacitores ha sido estudiado por varios autores [11, 18], la idea es analizar el comportamiento de este material a condiciones que tal vez no se presente, más sin embargo es una parte vital del aseguramiento de la calidad y funcionamiento de los capacitores.

## **2.6.- Normas empleadas para construcción y pruebas de capacitores**

Algunas de las normas que respaldan las pruebas en los capacitores son las JESD22-A104D, la cual menciona que “es conducido a determinar la confiabilidad de componentes e interconexiones de soldadura para resistir stress mecánico inducido, alternando alta y baja temperatura extrema”. Cambios permanentes en electricidad y/o características físicas pueden resultar de estas tensiones mecánicas [11]. La norma EIA standard 535BAAC menciona cómo se deben fabricar capacitores de tantalio [9].

## **2.7.- Marco referencial**

El uso de materiales funcionales en el desarrollo de productos y dispositivos sustenta muchos aspectos de la vida moderna a través de dispositivos de generación y almacenamiento de energía, tecnología de información y comunicaciones, sensores multicomponentes, atención médica, defensa militar y transporte.

La sociedad moderna ha sido testigo de un tremendo crecimiento y desarrollo a través del descubrimiento y aplicaciones de materiales funcionales y dispositivos semiconductores [3]. Un

área específica donde el uso de materiales funcionales ha hecho posibles nuevas aplicaciones es la fabricación de capacitores. Un capacitor es un componente eléctrico pasivo que posee dos terminales para el almacenamiento de energía dentro de un campo eléctrico. Su capacitancia se mide en faradios (F) y es la relación entre la carga eléctrica y la diferencia de voltaje entre los dos conductores eléctricos separados por un dieléctrico. Existen numerosos tipos de capacitores, incluidos capacitores electrolíticos de aluminio (AEC), capacitores de polímero orgánico de aluminio, capacitores cerámicos, capacitores cerámicos de capa única, capacitores cerámicos multicapa (MLCC), capacitores de matriz, capacitores electrolíticos de tantalio (TEC) y supercapacitores. Al identificar diferentes atributos como la capacitancia, el voltaje nominal, el rango de temperatura de operación y la dimensión, los capacitores se pueden seleccionar para diferentes tipos de aplicaciones. La importancia de tales dispositivos no puede ser subestimada. La sociedad moderna depende de varios dispositivos para los cuales se utilizan capacitores; Actualmente, la industria de materiales funcionales se jacta de tener un tamaño de mercado mundial que supera los \$ 4 billones con una tasa de crecimiento de 4.8% anual [3].

Los capacitores difieren de otros tipos de dispositivos de almacenamiento de energía en que son dispositivos eléctricos pasivos que almacenan pequeñas cantidades de energía eléctrica, a diferencia de los dispositivos electroquímicos que producen energía, como las baterías y las pilas [1]. El almacenamiento de energía varía desde múltiples horas de teravatios mantenidas durante años en compuestos químicos, hasta vatios-horas mantenidas en capacitores durante unos segundos [12].

## **2.8.- Capacitores de Ta (casos de estudio)**

Los componentes pueden almacenarse o pueden funcionar a temperaturas muy altas y / o muy bajas. La temperatura a menudo puede variar entre estos extremos, y este ciclo puede debilitar las características de un componente. Las pruebas de ciclos de temperatura acelerada se han considerado una técnica de aceleración efectiva para el ciclo térmico [9]. Las pruebas aceleradas se utilizan para estudiar la confiabilidad de los componentes electrónicos, especialmente ciertos mecanismos de falla dominantes en condiciones normales de operación. Alternativamente, las pruebas aceleradas pueden diseñarse para inducir mecanismos de falla distintos a los que ocurren en condiciones normales de operación en el campo [11].

La confiabilidad de los capacitores de tantalio se ve muy afectada por las condiciones ambientales. Además, una fuerte corriente de ondulación y tensiones mecánicas pueden causar fallas. La temperatura varía la velocidad de muchas reacciones físicas y químicas. Sin embargo, a altas temperaturas, se pueden activar nuevos mecanismos de falla. Si se ejecuta una prueba a estas temperaturas, la falla puede ocurrir debido a un mecanismo que es poco probable durante condiciones normales de operación [13]. Se ha estudiado el uso de capacitores de tantalio a alta temperatura, y la fabricación de capacitores de tantalio para aplicaciones críticas, como la alta temperatura, sigue siendo un desafío en diferentes ramas de la ingeniería [10].

Además, las tensiones termomecánicas pueden generar nuevos sitios de falla en los componentes. Un paquete de capacitores de tantalio puede sufrir expansiones de material a diferentes velocidades dependiendo de la expansión térmica y sufrir fuerzas de tensión en las estructuras de los pellets; sus elementos pueden encogerse durante el enfriamiento y no encajar como lo hicieron antes de la expansión. Además, pueden aparecer fuerzas compensatorias en la estructura del gránulo y producir fracturas a lo largo de una pequeña sección de bordes y esquinas [14-16].

El ciclo de temperatura de los capacitores de tantalio se ha estudiado antes [16] con capacitores sometidos a ciclos de temperatura en un rango de  $-65^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$  y  $-65^{\circ}\text{C}$  a  $+150^{\circ}\text{C}$ . Los resultados indican que los capacitores de chip de tantalio son capaces de soportar hasta 500 ciclos de temperatura que van desde  $-65^{\circ}\text{C}$  a  $+150^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, diferentes lotes muestran diferente robustez para diversas condiciones de ciclos. El agrietamiento en el dieléctrico de pentóxido de tantalio, que se desarrolla durante el ciclo de temperatura, da como resultado no solo un aumento de la fuga de corriente, sino que también aumenta la probabilidad de averías por ignición [6,17].

Estudios anteriores han demostrado que la temperatura, humedad y risis de voltaje son factores de variables de estrés en capacitores de tantalio, Virkki [13], realizó mediciones en rangos de temperaturas de operación de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$ , a diferentes voltajes y con un ambiente controlado a  $85^{\circ}\text{C}$  y una humedad de 85%. Todo esto junto puede acelerar la falla en capacitores de tantalio y puede afectar mejorando la difusión y tensión generada por el rizo de voltaje.

Bultitude, y col., I. [12] estudiaron el efecto de la temperatura en los hornos de curado en la formación del dieléctrico de los capacitores de Ta, encontrando que a altas temperaturas en el horno, la formación de la capa del dieléctrico era más estable, más homogénea, es decir más uniforme por lo tanto retenía mejor la fuga de corriente.

La temperatura altera las condiciones de muchas reacciones físicas y químicas. Altas temperaturas se usan a menudo en las pruebas de confiabilidad como un parámetro de aceleración para provocar fallas en los capacitores que probablemente no ocurran durante condiciones normales de operación [18]. Varios autores [13, 19-22] han estudiado los ciclos de temperatura en capacitores de tantalio fuera del rango de funcionamiento normal (entre  $-65^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$ ). Los resultados encontrados han demostrado que, aunque pueden soportar ciclos superiores a 500 sin presentar una falla aparente, son más propensos a una degradación

significativa en la fuga de corriente y reducen la ruptura máxima de voltaje después de estos ciclos de temperatura causados por grietas en el dieléctrico de  $Ta_2O_5$ .

La corriente de fuga es el indicador más sensible de la estabilidad y el rendimiento óptimo del dieléctrico en un capacitor de tantalio, en comparación con otros parámetros especificados como C, DF y ESR. Aunque se han llevado a cabo muchas investigaciones [23-29] para estudiar el efecto de la temperatura y el voltaje en el comportamiento físico, eléctrico y microestructural de estos capacitores, todavía hay vacíos en sus orígenes debido a las múltiples variables durante el proceso de producción. El valor de fuga actual (DCL) medido al final del procesamiento del capacitor determinará el grado de éxito durante su operación.

Por esta razón, las empresas que se dedican a la fabricación de estos componentes, y desean ser más competitivas en el mercado de la electrónica, deben agregar a sus productos una mayor estabilidad y confiabilidad a altas temperaturas y voltajes. Por lo tanto, es de vital importancia conocer y comprender en profundidad los fenómenos termodinámicos y cinéticos involucrados en la tecnología de fabricación relacionada con estos componentes.

### 3.- Metodología experimental

#### 3.1.- Introducción

El presente capítulo muestra a detalle los procedimientos experimentales que se siguieron en la presente investigación. Los resultados de los experimentos realizados se utilizaron para determinar la confiabilidad de los capacitores de tantalio de la serie T491 tamaño A, utilizados en la fabricación de componentes electrónicos. En la Figura 3.1, se muestran las características del trabajo experimental mediante un diagrama de flujo, que ilustra los factores considerados en el diseño de experimentos y condiciones de ensayo en general. Para la realización del presente trabajo, ha sido necesario el manejo de diversos equipos, técnicas experimentales, y manejo de software de simulación K-SIM, los cuales son detallados en este capítulo.

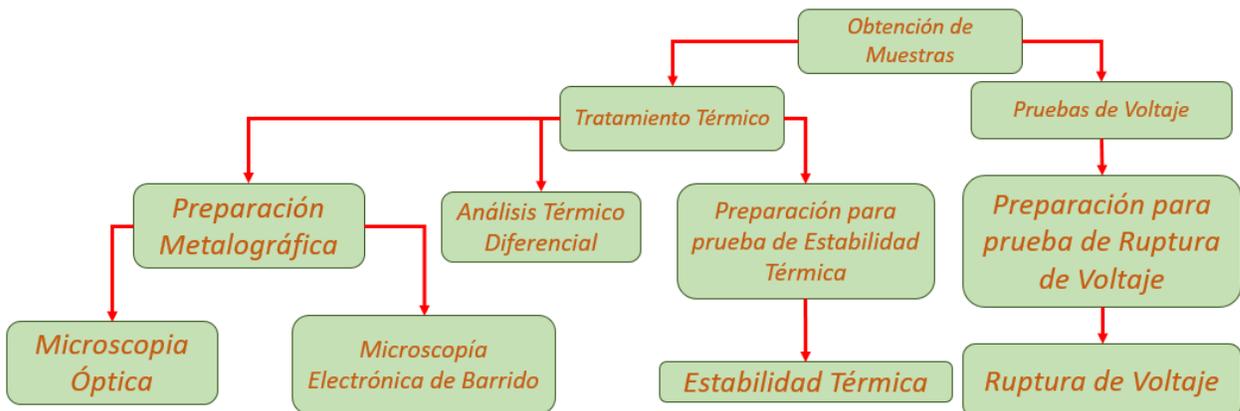


Figura 3.1 Diagrama de flujo para la preparación de muestras y realización de pruebas.

#### 3.2.- Obtención del material para su estudio

El material utilizado en la presente investigación fueron capacitores de Ta fabricados mediante metalurgia de polvos, las dimensiones de estos fueron de 3.2 mm de longitud y 1.6 mm de ancho, como se ilustra en la Figura 3.2 y proporcionados por la empresa Kemet de México S.A. de C.V planta Victoria. Los capacitores fueron sometidos por diferentes pruebas de inmersión hasta

lograr la formación de capas necesarias para su funcionamiento. Todas las muestras utilizadas en los diferentes experimentos de laboratorio fueron obtenidas en condición final es decir pasaron por todos los procesos requeridos industrialmente.

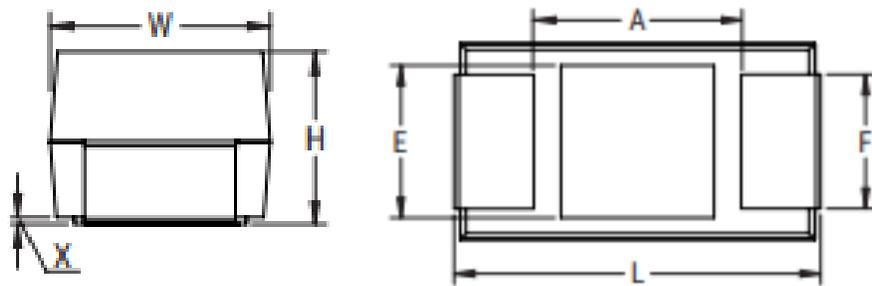


Figura 3.2 Imagen de dimensiones de capacitores terminados. Ancho (W), alto (H), Largo (L), Valores de referencias (X, E, A y F)

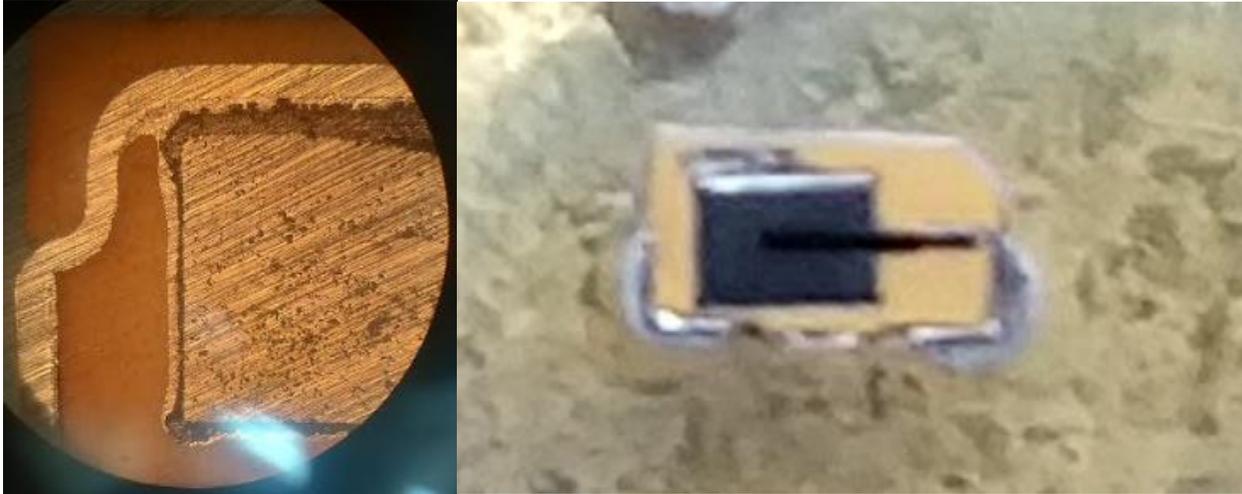
### 3.3.- Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos realizados fueron determinantes en la predicción del comportamiento físico, térmico y mecánico del material. Las pruebas fueron desarrolladas en un horno tipo mufla para determinar la estabilidad tanto a temperaturas criogénicas ( $-65^{\circ}\text{C}$ ) como a altas temperaturas ( $125^{\circ}\text{C}$ ), lo anterior con la finalidad de obtener datos precisos para los cálculos de confiabilidad.

### 3.4.- Preparación metalográfica

Las muestras con dimensiones de 5 mm y 1.6 mm de largo y ancho respectivamente mostradas en la Figura 3.3, obtenidas a partir de los diferentes procesos de producción mostrados en la Figura 3.1, se montaron en una resina epóxica de endurecimiento en horno a temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$ , para facilitar su manejo. Estas muestras fueron utilizadas para determinar la morfología y fases presentes en la microestructura de los capacitores. Las muestras fueron desbastadas con lijas de SiC con granulometrías de 500, 800, 1200 y 2400 partículas/pulgada<sup>2</sup>.

Se pulieron sobre paños rotatorios utilizando pasta de diamante de 3 y 1  $\mu\text{m}$ , y en paños con silica coloidal de 1  $\mu\text{m}$ .



*Figura 3.3 capacitor seccionado.*

### **3.5.- Caracterización mediante microscopía óptica (MO)**

La observación microestructural se realizó mediante microscopía de luz reflejada en un microscopio metalográfico marca Olympus modelo Vanox AHMT-3. Para la adquisición de imágenes se utilizó una cámara digital QImaging Modelo Micropublisher 3.3 RTV Color 10 bit. A partir de las imágenes obtenidas se realizó la medición de la fracción de fases presentes y las diferentes capas presentes durante las inmersiones por medio del programa Image Pro-Plus versión 4.0.

### **3.6.- Caracterización mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**

Para una mejor identificación de fases después de los tratamientos térmicos y procesos de producción empleados se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) modelo Philips XL30 ESEM equipado con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos-X EDAX-Pegasus. El equipo fue operado con un voltaje de aceleración de 20.0kV, las imágenes fueron

tomadas mediante electrones retrodispersados (BSE) y electrones secundarios (SE) a diferentes aumentos.

### **3.7.- Análisis térmico diferencial (DTA)**

El análisis térmico diferencial de los capacitores de Ta obtenidos al final del proceso se realizó en un analizador térmico diferencial marca Perkin-Elmer modelo 1700 de alta temperatura. Se utilizaron crisoles de alúmina en los cuales se colocaron muestras de polvo de Ta del proceso de 30 mg. La velocidad de calentamiento fue de 5°C/min desde temperatura ambiente hasta 400 °C. La finalidad fue observar los cambios exotérmicos y endotérmicos presentes durante el calentamiento de las muestras y determinar el tipo de fases presentes.

### **3.8.- Simulación mediante K-SIM**

Para comparar los resultados obtenidos experimentalmente y determinar ciertas propiedades importantes en los capacitores de Ta bajo las condiciones de operación empleadas, se utilizó el software K-SIM, el cual es un software de simulación que permite calcular el comportamiento de una amplia gama de las propiedades de los capacitores de Ta utilizados en la práctica industrial. Este software es capaz de hacer cálculos para determinar, el voltaje, corriente, capacitancia y ESR a diferentes frecuencias y temperaturas.

### **3.9.- Pruebas de Estabilidad térmica**

Para determinar la confiabilidad de los capacitores en diferentes condiciones de temperatura, se utilizó un equipo (ver figura 3.4) con varios elementos donde se realizaron pruebas de Capacitancia, DF, Leakage (fuga de corriente) y ESR (Resistencia de Serie Equivalente) a

diferentes temperaturas, para registrar y analizar el comportamiento de los capacitores sometidos al estrés térmico de los cambios de temperatura desde  $-55^{\circ}\text{C}$  hasta  $125^{\circ}\text{C}$ .

Se soldaron una muestra en una tablilla de circuitos (Board) para poder colocarla en el interior de una cámara donde el board se conecta en una terminal (slot) que este a su vez está conectado con varios medidores que tomaran la lecturas de Cap, DF, ESR y Leakage, que serán enviadas a una computadora que arrojará un histograma de donde se tomaran la lecturas y realizar el análisis.

Se utilizaron medidores Hewlett Packard Agilent 4263B para tomar lectura de Capacitancia, DF y ESR ya que estos medidores tienen una precisión básica de 0.1%, para las lecturas de fuga de corriente se utilizó medidores Hewlett Packard Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit, estos tienen una precisión del 0.004%.

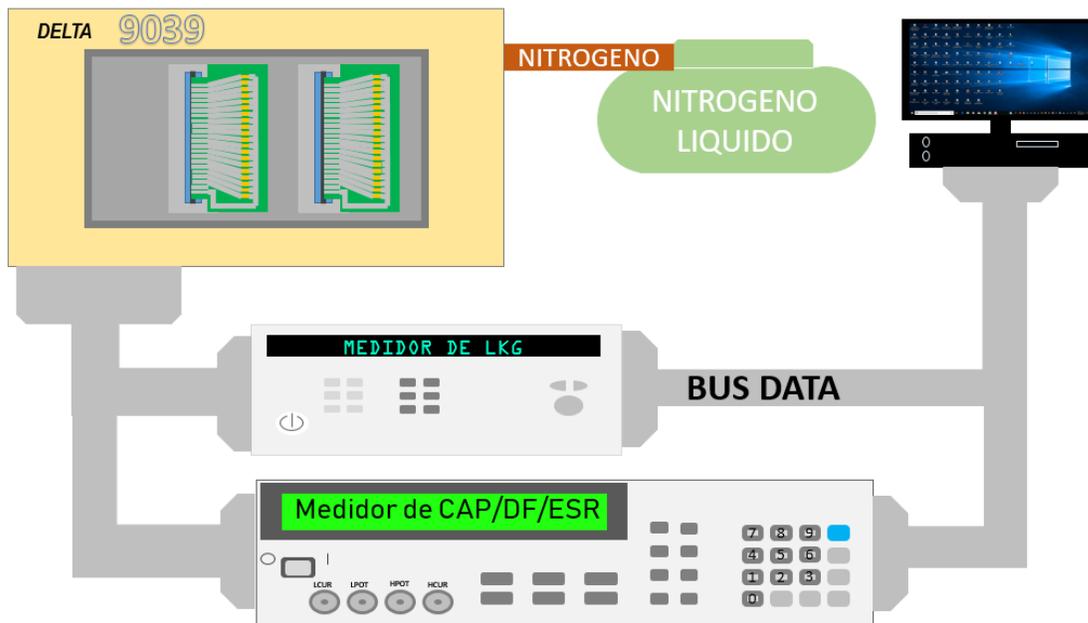


Figura 3.4 Diagrama de interconexión del equipo de medición de Estabilidad térmica.

Esto se realizó en 8 muestras de 40 capacitores cada una, dando un total de 360 capacitores sometidos a la prueba. Las muestras comenzaron a evaluarse a  $25^{\circ}\text{C}$ , los resultados arrojados

fueron la base de referencia para analizar las variaciones a diferentes  $\Delta T$ . Las temperaturas y tiempos empleados en los análisis fueron de 25°, -55°, 25°, 85°, 125° y 25° C, y 5 y 30 minutos de acuerdo al diseño experimental como se muestra en la Figura 3.5.

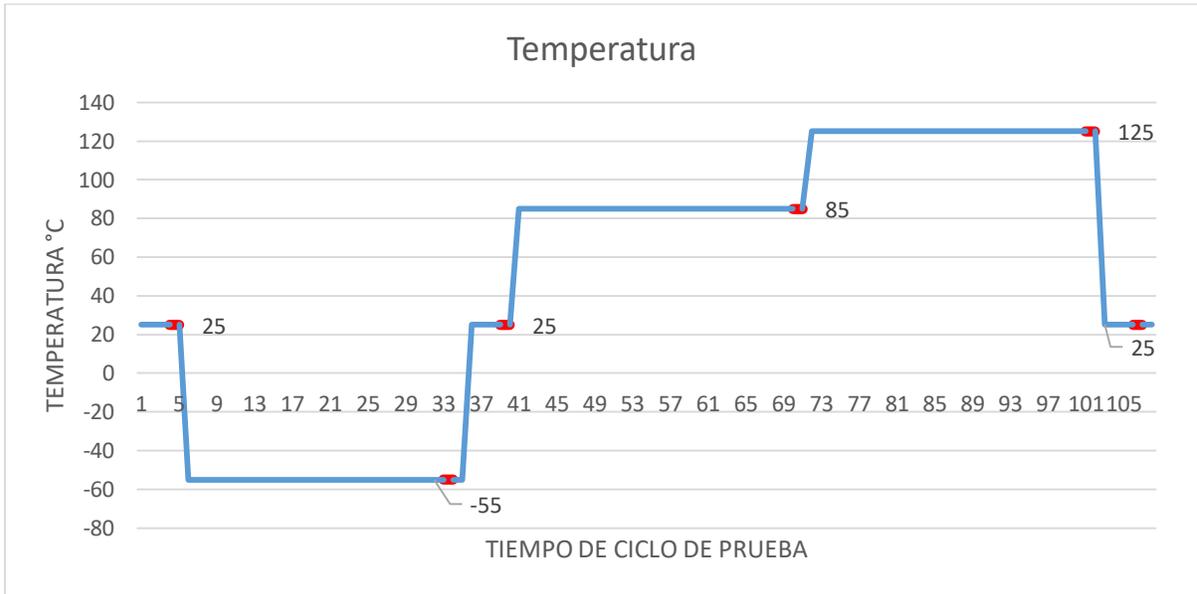


Figura 3.5.- Diseño experimental de los ciclos de temperatura a los que fueron sometidas las piezas

### 3.10.- Pruebas de ruptura de Voltaje

Se realizaron pruebas de ciclos de voltaje con descargas de corriente de hasta 30 amperes en el rango de 0 V hasta los 30 V, aumentando de manera constante (1 volt cada 30 segundos) para conocer el voltaje promedio de rompimiento del dieléctrico en los capacitores de tantalio y a su vez el porcentaje de eficiencia en este aspecto. Un capacitor entre más voltaje pueda soportar es mejor, eso es porque en casos de sobrecargas será capaz de proteger mejor el circuito en el que se encuentre.

Para esta prueba se montaron 8 muestras de 200 capacitores cada muestra en unas tablas (board); un total de 1600 piezas; en una computadora se registró el voltaje al cual tuvo la ruptura

cada una de las piezas, se utilizó una fuente de voltaje Hewlett Packard 6655 con una precisión de 0.06%.

#### 4.- Resultados

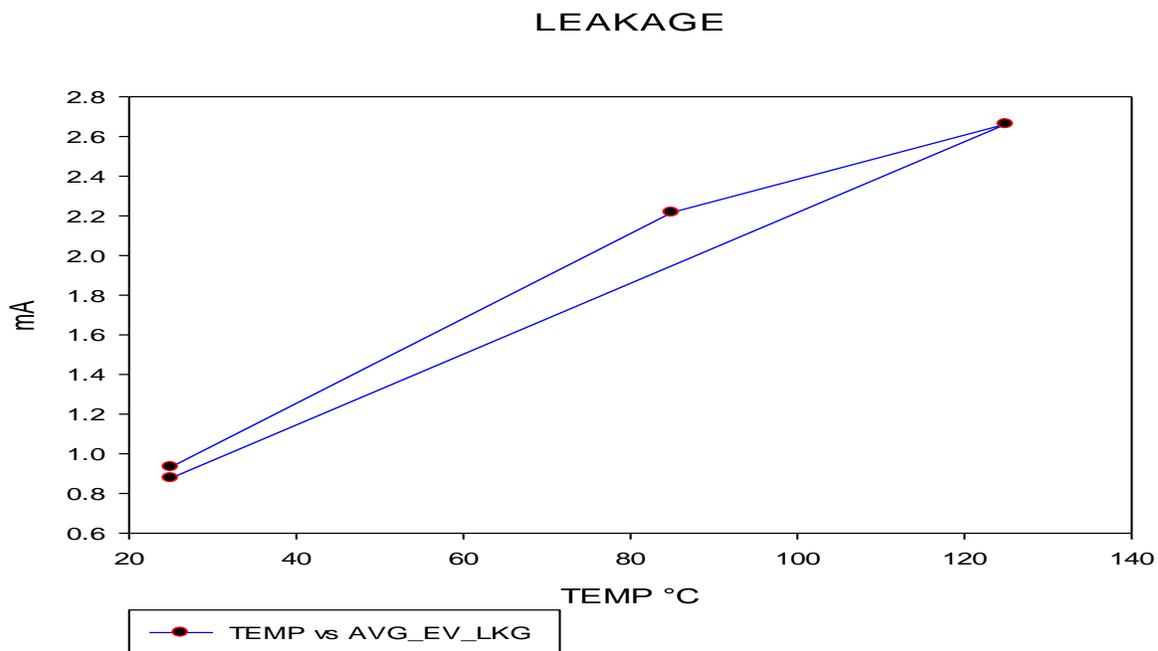
En este apartado se presentan y discuten los resultados de las diferentes pruebas experimentales y de simulación realizadas.

##### 4.1.-Análisis de estabilidad térmica

En la Tabla III se presentan los resultados promedio de LKG de cada una de las muestras evaluadas a diferentes temperaturas a través de los ciclos térmicos de temperatura,

**Tabla III. Resultados promedio de evaluaciones de LKG a diferentes rangos de temperatura.**

TEMP	EV-1	EV-2	EV-3	EV-4	EV-5	EV-6	EV-7	EV-8	AVERAGE_EV_LKG
25	0.6103	0.4497	1.1045	1.7672	1.1669	2.1045	0.0297	0.2353	0.9335
85	2.0965	2.9794	2.9417	2.2443	2.5263	2.9417	0.2251	1.7826	2.2172
125	1.5077	2.2247	2.2126	6.7882	1.7556	2.2126	0.4043	4.192	2.6622
25	0.2943	0.2833	1.4992	2.2124	0.9695	1.4992	0.0292	0.2353	0.8778



*Figura 4.1 Gráfica de promedios de LKG a diferentes rangos de temperatura.*

En la Figura 4.1, se puede observar el promedio de los resultados de la muestra de 320 capacitores estresados térmicamente. Se puede observar que el LKG obtenido está directamente relacionado con la temperatura de operación. Es importante recordar que lo ideal en este tipo de componentes electrónicos para su buen funcionamiento es que el leakage se encuentre lo más bajo posible y no sobrepase los 3 mA. Iniciando la toma de lectura a una temperatura de 25 °C con un voltaje de 6 V el LKG es de 0.93 mA, al incrementarse la temperatura en la prueba de aceleración a 85 °C el LKG incrementa a 2.21 mA, aunque aún se encuentra dentro de parámetros, a la temperatura más elevada que se estudió fue de 125°C, el leakage tuvo su punto más alto siendo de 2.66 mA, después se redujo la temperatura a 25 °C como al inicio de la prueba donde se aprecia una lectura de leakage menor a la inicial, esto equivale a un 5.9% de reducción en la lectura después de haber sido estresada térmicamente.

La tabla IV, muestra los resultados promedios de las lecturas de ESR a diferentes rangos de temperatura.

**Tabla IV. Promedio de resultados de evaluaciones de ESR a diferentes rangos de temperatura.**

TEMP	EV-1	EV-2	EV-3	EV-4	EV-5	EV-6	EV-7	EV-8	AVERAGE_EV_ESR
-55	1.5005	1.1985	0.6181	0.6196	0.6184	0.6181	1.4552	0.3024	0.8663
25	0.5911	0.526	0.2713	0.2722	0.2712	0.2713	0.7112	0.1623	0.3846
85	0.3655	0.3455	0.1804	0.181	0.1808	0.1804	0.4658	0.1183	0.2522
125	0.2842	0.2806	0.1475	0.1481	0.1477	0.1475	0.3743	0.1017	0.204

## ESR

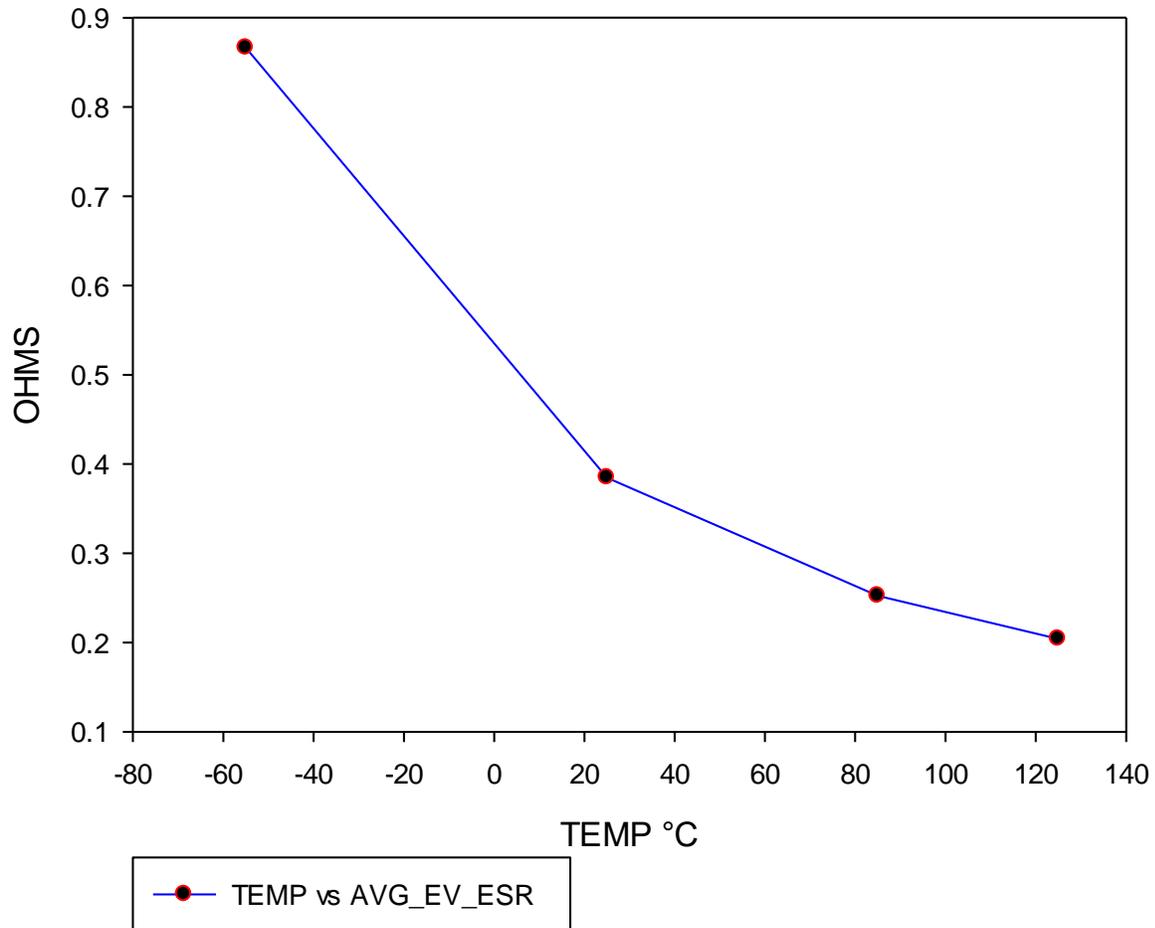


Figura 4.2. Gráfica de promedios de ESR a diferentes rangos de temperatura.

En la figura 4.2 se observa cómo el ESR presenta un efecto contrario al que ocurre con el leakage. El ESR tiende a disminuir conforme aumenta la temperatura. Para el tipo de capacitores evaluados, su límite de ESR es de 3.5 ohms, como se puede apreciar esta evaluación de 320 capacitores, da los resultados a partir de los -55 °C donde se puede ver una lectura cercana a los 0.9 ohms, pero a incrementarse a una temperatura ambiente de 25 °C su ESR baja cerca de los 0.4 ohms, al continuar incrementando la temperatura hasta 85 °C y 125 °C el ESR sigue descendiendo hasta cerca de los 0.2 ohms. Como lo menciona Savant, que en los materiales,

los electrones se pueden elevar a niveles de energía más altos por medio de aplicación de calor, que provoca vibraciones de la red. Los materiales que son aislantes a temperatura ambiente pueden volverse conductores cuando la temperatura se eleva lo suficiente [30].

#### **4.2.- Análisis de Pruebas de ruptura de Voltaje**

En la tabla V se puede apreciar la cantidad de capacitores que se evaluaron a una sobre carga de voltaje en la prueba de SSST, de la misma manera también se puede observar a que cantidad de voltaje fallaron, en la columna de QTY CAPACITORS está el número de capacitores que fallaron al voltaje marcado en la columna de VOLTAGE, algunos valores de la columna VOLTAGE aparecen repetidos, debido a que los resultados provienen de varias muestras evaluadas, también se puede apreciar que en la columna de QTY CAPACITORS no siempre esta repetidas por la razón ya mencionada.

**Tabla V. Cantidad de capacitores probados y voltajes a los que fallaron.**

QTY CAPACITORS	VOLTAGE														
1	6.01	1	9.01	3	10.2	5	11.25	4	12.82	1	14.61	7	16.47	4	19.42
1	6.21	4	9.02	1	10.21	5	11.25	2	12.82	4	14.62	14	16.8	8	19.8
1	6.21	4	9.02	3	10.23	1	11.41	3	12.83	10	14.65	2	16.81	22	20
1	6.21	3	9.03	4	10.24	8	11.44	4	12.84	1	14.81	4	16.82	1	20.01
2	6.21	1	9.21	5	10.25	1	11.61	6	12.86	1	14.81	22	17	2	20.01
3	6.23	2	9.22	1	10.41	2	11.61	10	13	12	15	22	17.01	9	20.4
1	6.61	2	9.22	4	10.42	6	11.62	6	13.03	9	15	3	17.01	1	20.41
1	6.61	2	9.22	2	10.42	4	11.62	15	13.05	3	15.01	2	17.01	2	20.61
1	6.61	3	9.23	3	10.43	3	11.63	12	13.06	2	15.02	2	17.02	14	21
2	6.61	4	9.24	3	10.43	8	11.64	11	13.2	2	15.02	4	17.02	26	21
2	6.62	4	9.24	8	10.44	8	11.64	1	13.21	3	15.03	3	17.03	27	21.03
1	6.81	5	9.25	4	10.44	5	11.65	1	13.21	29	15.04	4	17.04	1	21.21
3	6.83	6	9.26	10	10.45	5	12	4	13.22	4	15.04	11	17.4	2	21.22
1	7.81	1	9.61	7	10.47	4	12	4	13.22	5	15.05	1	17.41	7	21.6
1	8.01	4	9.62	2	10.8	4	12.01	3	13.23	5	15.05	4	17.62	1	21.81
1	8.01	2	9.62	4	10.82	5	12.01	3	13.23	6	15.06	3	17.63	16	22
1	8.01	3	9.63	2	10.82	1	12.01	5	13.25	6	15.23	4	17.64	16	22.02
2	8.02	3	9.63	6	10.83	2	12.02	2	13.41	4	15.24	5	17.65	8	22.2
2	8.02	6	9.63	6	10.83	4	12.02	5	13.45	6	15.26	13	18	9	22.8
2	8.02	3	9.63	4	10.84	9	12.03	6	13.46	8	15.28	29	18	11	23
4	8.04	4	9.64	5	10.85	4	12.04	7	13.8	7	15.6	2	18.01	2	23.01
1	8.41	4	9.64	5	10.85	8	12.04	9	13.8	2	15.62	8	18.02	9	23.4
4	8.41	5	9.65	12	10.86	4	12.04	3	13.83	6	15.63	2	18.02	3	24
1	8.41	5	9.65	6	10.86	4	12.04	12	13.84	4	15.82	3	18.03	3	25
2	8.42	6	9.66	7	10.87	7	12.07	7	13.87	3	15.83	29	18.05		
2	8.42	6	9.66	8	10.88	24	12.08	10	14.01	5	15.85	1	18.21		
3	8.43	3	9.81	1	11	6	12.22	2	14.01	7	15.87	2	18.22		
4	8.44	2	10.02	1	11.01	3	12.41	4	14.02	16	16	6	18.23		
4	8.44	2	10.02	1	11.01	4	12.41	6	14.03	2	16.02	8	18.6		
6	8.46	3	10.03	4	11.02	2	12.42	3	14.03	6	16.03	2	18.61		
1	8.81	3	10.03	3	11.03	3	12.43	4	14.04	4	16.04	2	18.62		
2	8.82	6	10.03	8	11.04	3	12.43	4	14.04	17	16.07	2	18.82		
4	8.82	4	10.04	7	11.07	3	12.6	5	14.05	8	16.08	3	18.83		
3	8.83	4	10.04	8	11.08	3	12.63	5	14.05	6	16.2	28	19		
4	8.84	5	10.05	4	11.22	12	12.64	7	14.07	2	16.21	2	19.01		
4	8.84	5	10.05	2	11.22	6	12.66	10	14.4	4	16.22	39	19.05		
4	8.84	5	10.05	3	11.23	1	12.81	1	14.41	3	16.23	14	19.2		
5	8.85	10	10.05	6	11.23	1	12.81	2	14.42	2	16.42	2	19.21		
5	8.85	6	10.06	4	11.24	4	12.81	4	14.42	3	16.43	2	19.22		
1	9	6	10.06	4	11.24	2	12.82	8	14.48	5	16.45	1	19.41		

## SSST

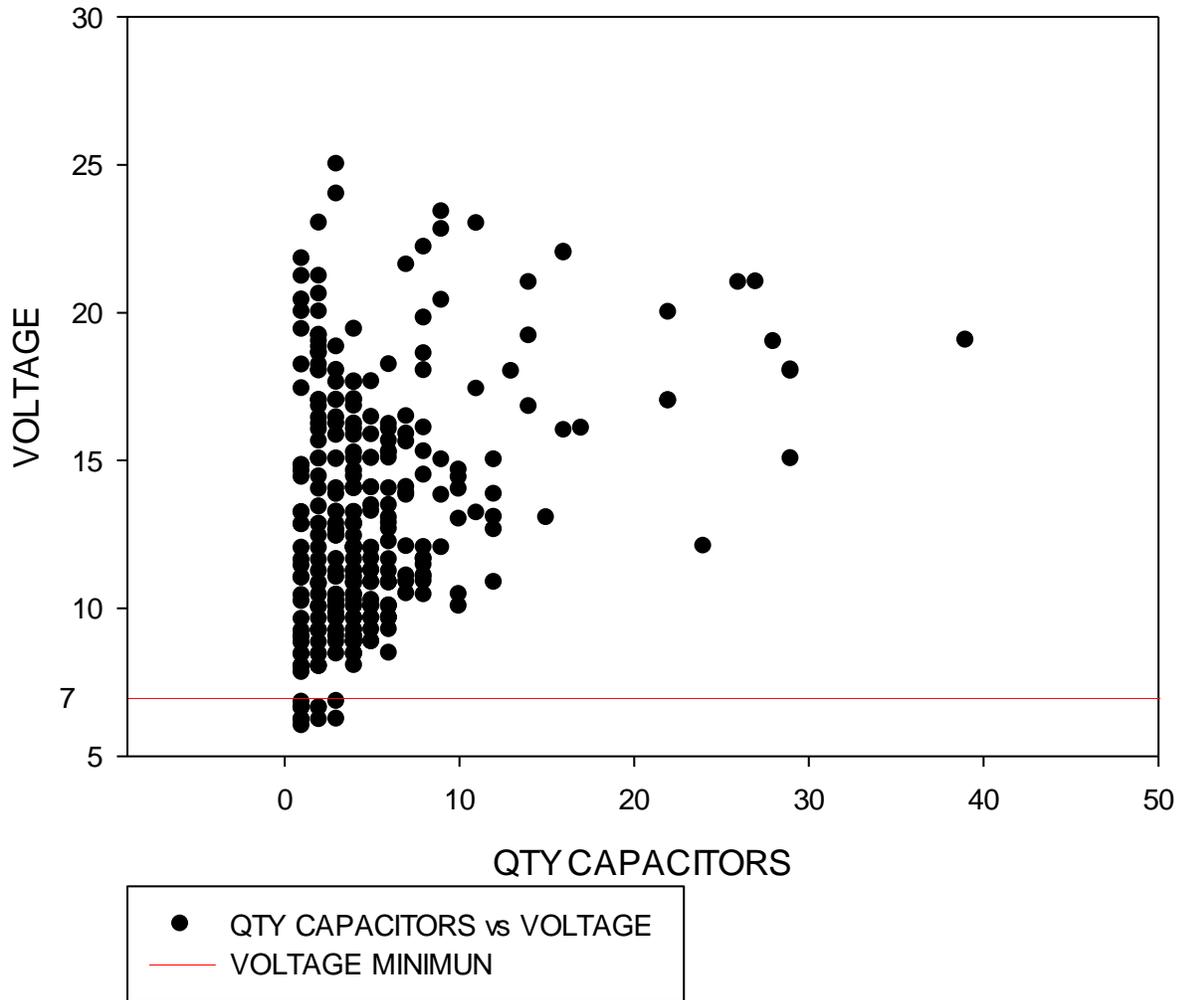


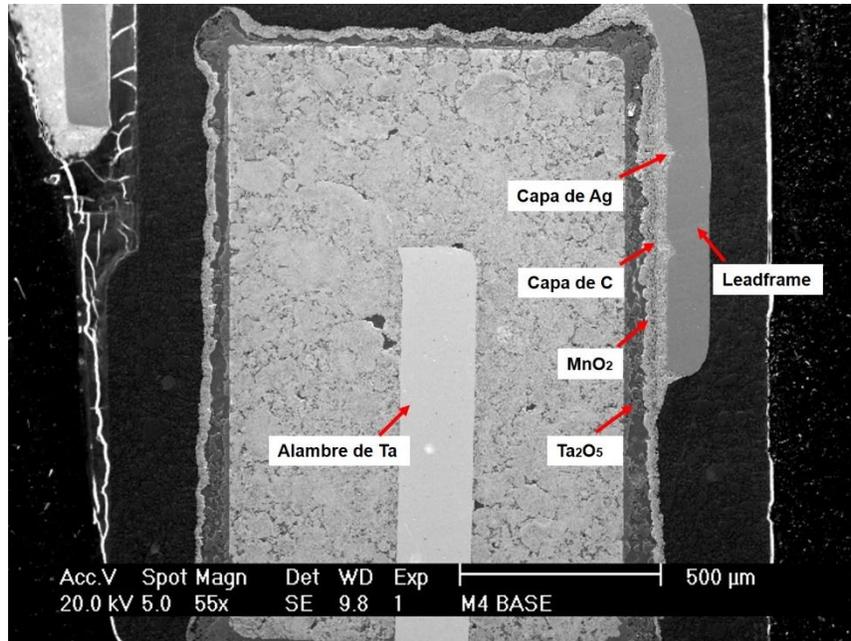
Figura 4.3. Gráfica de voltaje al que se destruyeron los capacitores en la prueba de SSST.

En la Figura 4.3, se muestra los resultados de la evaluación SSST realizada a 1600 capacitores de un voltaje nominal de 6 V, donde fueron sometidos a un incremento de voltaje constante de 1 Volt cada 30 segundos, partiendo desde 0 Volt hasta 30 Volts; difícilmente este tipo de capacitores podría soportar voltajes tan altos, pero aquí lo importantes es que puedan soportar voltajes superiores a los 7 volts esto debido a que se considera que si un capacitor no es capaz de soportar el voltaje para él que está diseñado es un capacitor que no funcionará

óptimamente. En la Figura 4.3, se puede observar cómo solo el 1.25% de los capacitores no soportaron más de su voltaje nominal, la gran mayoría pasaron la prueba donde algunos incluso llegaron a soportar más de 20 volts.

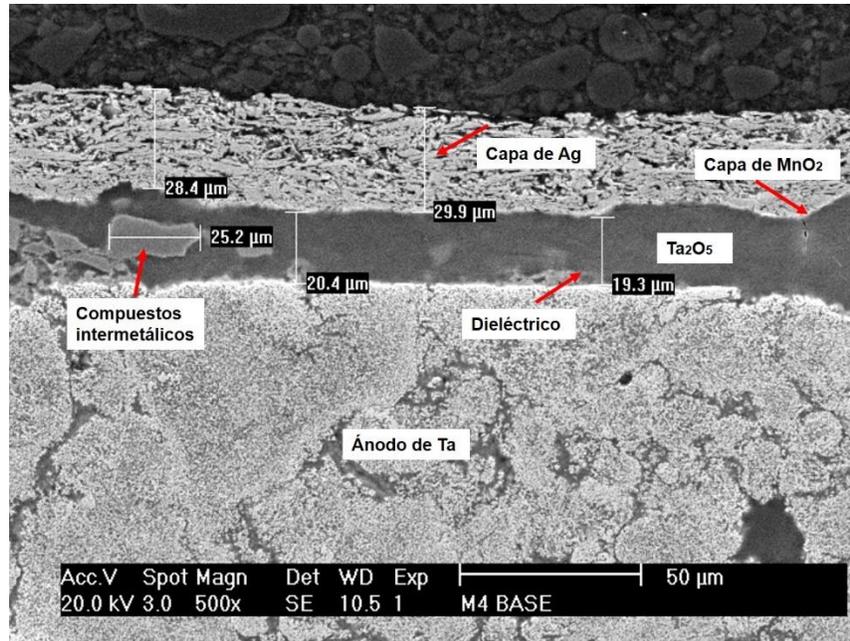
#### **4.3.- Caracterización microestructural**

Después de que los capacitores de Ta pasaron por todo el proceso de fabricación para la formación de las diferentes capas por métodos de inmersión y ser encapsulados en una resina epóxica. Estos fueron preparados por técnicas metalográficas para observar y analizar la morfología de las capas y las diferentes fases formadas. La Figura 4.4, corresponde a una muestra representativa de los capacitores de Ta tipo T491A, donde se muestra una fotomicrografía obtenida por microscopía electrónica de barrido (MEB) a través de electrones secundarios (SE) de la microestructura correspondiente a la sección longitudinal de estos capacitores. La microestructura consiste de la formación de una capa de pentóxido de tantalio ( $Ta_2O_5$ ) conocido como dieléctrico y que es la primera capa en formarse sobre el ánodo de Ta y una de la más importantes, pues de su estabilidad y buena adherencia dependerá la resistencia a la fuga de corriente cuando los capacitores estén sometidos a cargas de voltaje o elevadas temperaturas. Otras capas formadas son el dióxido de manganeso ( $MnO_2$ ), el carbón (C) y la última capa que pertenece a la pintura de plata (Ag). También se puede observar el leadframe que es la terminal negativa. La microestructura obtenida es el producto de un complejo proceso electroquímico, el cuál le proporciona al capacitor la capacidad de almacenar o distribuir energía durante su funcionamiento.



*Figura 4.4.- Estructura interna de los capacitores de Ta estudiados.*

El fenómeno de la fuga de corriente (Leakage), se convierte en un problema latente de falla catastrófica cuando los capacitores electrolíticos de Ta no pueden ser recargados manualmente, como lo es en aplicaciones de dispositivos médicos entre otros. Si un capacitor presenta una fuga de corriente alta como resultado de defectos en el dieléctrico, el funcionamiento de estos dispositivos a alta temperatura o voltaje puede incrementar significativamente el problema de Leakage. Existen varios factores que favorecen a la fuga de corriente de un capacitor, pero el más importante es la condición y espesor del dieléctrico siendo la primera capa en formarse sobre el ánodo de Ta, donde el voltaje aplicado a través del electrolítico determinará su espesor. Con  $Ta_2O_5$  más gruesos se tienen mayores capacidades de manejo de voltaje y un DCL menor. En la industria de los capacitores de Ta, el espesor de la capa del dieléctrico es una parte crítica por tal motivo la formación de una capa homogénea y con el grosor adecuado garantizará su óptima operación durante el funcionamiento de los componentes electrónicos.



*Figura 4.5.- Formación de capas sobre el ánodo de Ta.*

En la Figura 4.5, se presenta una microestructura mediante MEB por electrones secundarios, donde se muestran las diferentes capas formadas sobre el ánodo de Ta. Se realizaron mediciones sobre 10 campos del capacitor. Los resultados mostraron un promedio de la capa del dieléctrico de 19.5  $\mu\text{m}$ , mientras que la Ag, el C y el  $\text{MnO}_2$  promedian juntas un espesor de 29  $\mu\text{m}$ , los compuestos intermetálicos presentes pertenecen a un compuesto ricos en Mn con tamaños promedio de 20  $\mu\text{m}$ . En la misma figura, se analizó mediante Espectrometría de dispersión de energía de rayos X EDAX, el análisis de los elementos que conforman cada capa y los compuestos presentes, para determinar la distribución homogénea en la multicapa. La Figura 4.6a, representa la distribución de los elementos en el ánodo del capacitor, como era de esperarse en su mayoría se encuentra el Ta y en menor concentración de Mn. Los compuestos formados en el dieléctrico están representados en la Figura 4.6b, como se puede observar son ricos en Mn y con pequeñas cantidades de O. Las capas externas son representadas en las Figuras 4.6c y d, y se aprecia una alta concentración de Ag, con presencia de Ni y Sn producto de la soldadura. Es importante hacer notar que se encontró una cantidad considerable de

compuestos ricos en Mn distribuidos en la capa de dieléctrico, por lo que se tiene que tener especial cuidado en la presencia de una transformación de fase que modifique las características del dieléctrico.

El análisis mediante EDAX demuestra la distribución esperada en cada una de las capas del capacitor. El buen funcionamiento de los componentes electrónicos dependerá en gran medida de la capa del dieléctrico es decir el que no exista el rompimiento de éste.

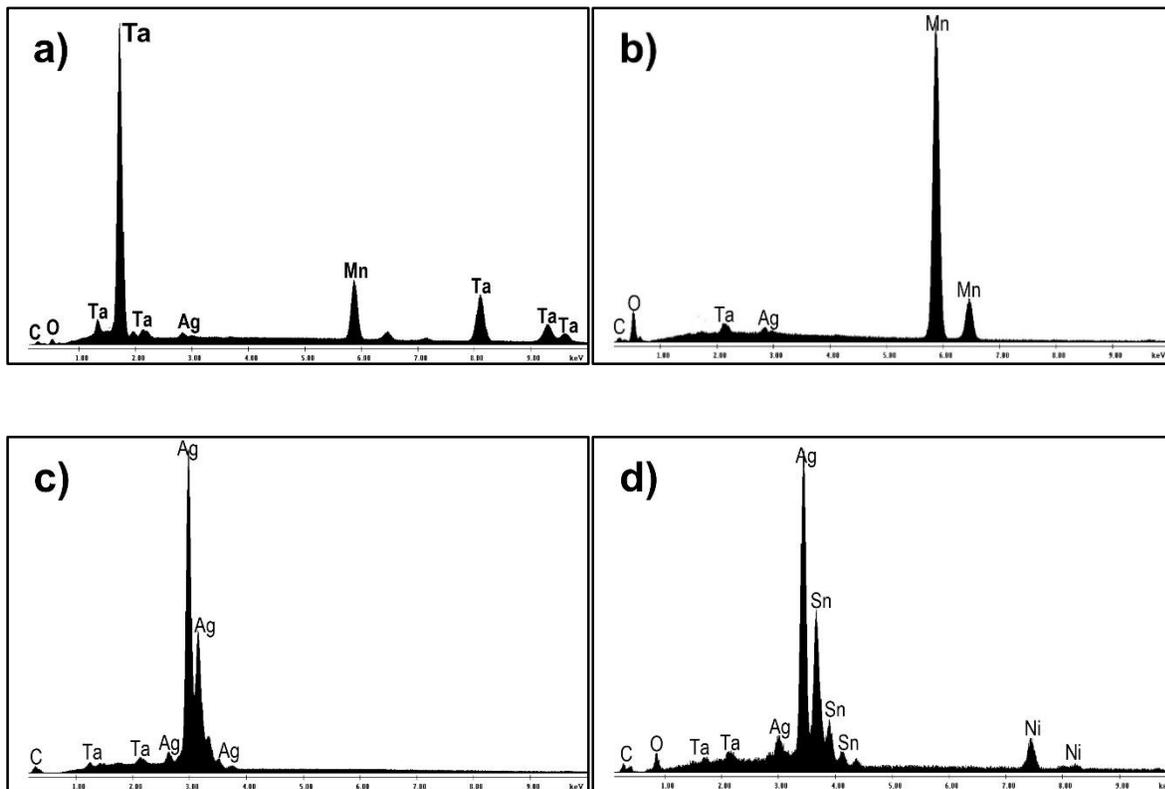


Figura 4.6.- Espectrograma por EDAX de la estructura interna de los capacitores; a) ánodo de Ta, b) Compuestos en el dieléctrico, c) Capa de Ag, y d) última capa del capacitor.

#### 4.4.- Análisis térmico

La Figura 4.7, muestra el comportamiento de una muestra de capacitor de Ta de tipo T491A sometido a incrementos de temperaturas constantes. La línea sólida en color rojo, representa la pérdida o ganancia de peso de la muestra ensayada del capacitor de Ta al ser calentado a alta temperatura. En esta curva, se puede observar que se presenta una caída de peso a una temperatura cercana a 130 °C, lo que indica que hasta antes de esta temperatura el capacitor es estable térmicamente. Con lo anterior, se puede demostrar que el tipo de capacitor de Ta T491A es óptimo para trabajar en componentes electrónicos hasta esta temperatura.

Por otra parte, la curva de color azul presente en la Figura 4.7, representa el flujo de calor durante el calentamiento, donde en este se pueden presentar dos reacciones una endotérmica (el pico de la curva se presenta hacia abajo, y quiere decir que la reacción necesita calor para poderse llevar a cabo), la otra reacción es exotérmica (el pico de la curva es hacia arriba, y demuestra que la reacción pierde calor durante la reacción). A una temperatura cercana a 325 °C, el capacitor de Ta del tipo T491A presenta una reacción exotérmica liberando calor durante la reacción. Lo anterior indica que se está presentando una transformación de fase y de estructura cristalina de los compuestos. Para definir con mayor exactitud se puede complementar con análisis mediante difracción de rayos X.

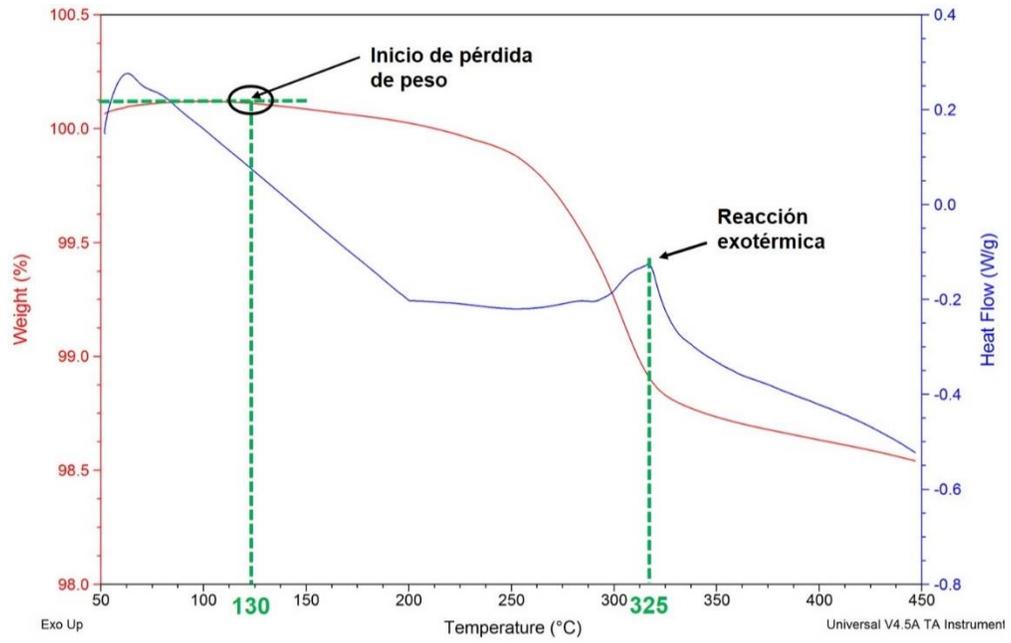


Figura 4.7.- Análisis térmico diferencial (DTA) de un capacitor de Ta con proceso terminado.

## 5.- Conclusiones

De acuerdo a todas las pruebas y análisis realizados a los capacitores de Ta del T491A Se puede concluir que este número de parte presenta un leakage estable ante los cambios de temperatura especificados, y aun al ser sometidos a una temperatura fuera de rangos continuaron dentro de los límites requeridos siendo menores de 125° C. Concluyendo que para este tipo de capacitor en el rango de temperaturas estudiadas presenta más inestabilidad a bajas temperaturas afectando su ESR ya que como se aprecia en la Figura 4.2 que a su mínima temperatura de especificación (-55°C) presenta mayores niveles de ESR y aún estaba muy por debajo de su límite de especificación.

También se puede decir que los capacitores probados fueron capaces de soportar voltajes mayores que para lo que están diseñados, con esto asegurando a los clientes el manejo de sus dispositivos bajo condiciones severas ya que los capacitores serán capaces de proteger sus equipos al poder amortiguar alguna sobrecarga de voltaje sin que estos presenten algún tipo de daño ya que como se menciona anteriormente; su porcentaje de falla es de apenas del 1.25%.

De acuerdo a los análisis de caracterización microestructural se debe tener presente que existen algunas partículas intermetálicas de Mn en la capa de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, que de fracturarse debido a cambios de estructura cristalina o de propiedades por transformaciones de fase podrían provocar una grieta en el dieléctrico y esto traería como consecuencia que la fuga de corriente se incremente de forma significativa.

Al observar el análisis térmico se puede apreciar que estos capacitores comienzan a presentar falla a los 130°C, pero antes de eso los capacitores siguen cumpliendo con los parámetros de especificación.

Teniendo en cuenta el panorama mostrado de todas las pruebas y análisis, se puede concluir de manera general que este tipo de capacitores son altamente confiables y que con este estudio se podrá ayudar a responder las quejas de clientes que puedan surgir y al mismo tiempo se

obtendrá un ahorro de 1.6 millones de pesos anuales aproximadamente por concepto de quejas de clientes.

Es recomendable que Kemet cuestione y analice las condiciones ambientales y de trabajo a las cuales fueron sometidos los capacitores que ha adquirido el cliente. El cliente también debe prever posibles condiciones que puedan llegar a afectar los capacitores antes de utilizarlos y así ambos podrán evitar problemas de Capacitancia, fuga de corriente, ignición (explosión o destrucción de los capacitores por sobrecargas de voltaje y/o corriente), ESR o DF por los cambios de temperatura durante el tiempo de trabajo de los capacitores o algún cambio de temperatura derivado del ambiente al que estén expuestos.

Derivado de todas las pruebas que se realizaron, sería muy posible analizar la formación de la primera capa de los capacitores, que es el pentóxido de tantalio para disminuir la fuga de corriente y el porcentaje de energía que se pierde (DF), esto influiría en la mejora del almacenamiento de energía en los capacitores.

## Bibliografía

1. O'Malley, J. (1986). *Análisis de circuitos básicos: teoría y 670 problemas resueltos*. McGraw-Hill.
2. Hahn, R., & Tempel, K. (2015). Solid electrolytic capacitors designed for high temperature applications. *Additional Papers and Presentations, 2015(HiTEN)*, p.142-152.
3. López-López, G., López-López, J., & García-Yagues, M. R. (2009). Tantalum: A strategic metal. *Dyna (Bilbao)*, 84(3): 219-224.
4. [http://www.kemet.com/Lists/ProductCatalog/Attachments/254/KEM\\_T2005\\_T491.pdf](http://www.kemet.com/Lists/ProductCatalog/Attachments/254/KEM_T2005_T491.pdf).
5. A. González, R. Cesari, R. Vicioli. (2009). Capacitores parte II. *Tecnología electrónica*, 1, 50.
6. Smith, L., Ibn-Mohammed, T., Koh, S. L., & Reaney, I. M. (2018). Life cycle assessment and environmental profile evaluations of high volumetric efficiency capacitors. *Applied energy*, 220, 496-513.
7. MATHEW, T. (2001). Measurement of the low temperature electrical properties of solid tantalum capacitor. *Cryogenics*, 41: 285-288.
8. Abuetwirat, I., & Liedermann, K. (2015, June). Dielectric Properties of Thin Tantalum Oxide Layers at Solid Tantalum Capacitors. In *International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications*.
9. [http://www.keysemi.com/upload/data\\_sheet/1480424829-510343173100uf10v7343.pdf](http://www.keysemi.com/upload/data_sheet/1480424829-510343173100uf10v7343.pdf).
10. Skatkov, L., Gomozov, V., & Bayrachniy, B. (2012). Investigation of porosity and fractal properties of the pyrolytic MnO<sub>2</sub> films in the capacitor structure. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 98: 247-249.
11. Electronic Industries Association. (1989). JEDEC STANDARD: Temperature Cycling JESD22-A104-A. *Electronic Industries Association, USA*.
12. Bultitude, J., McConnell, J., & Shearer, C. (2015). High temperature capacitors and transient liquid phase interconnects for Pb-solder replacement. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(12): 9236-9242.
13. Virkki, J., Seppälä, T., Frisk, L., & Heino, P. (2010). Accelerated testing for failures of tantalum capacitors. *Microelectronics Reliability*, 50(2): 217-219.
14. Dias, D., Carvalho, P. A., Ferro, A. C., & Lohwasser, W. (2005). MnO<sub>2</sub> counter-electrode structure in Ta capacitors: A TEM study. *Acta materialia*, 53(17): 4723-4732.
15. Li, S., & Wang, C. A. (2015). Design and synthesis of hierarchically porous MnO<sub>2</sub>/carbon hybrids for high performance electrochemical capacitors. *Journal of colloid and interface science*, 438: 61-67.
16. Dias, D., Carvalho, P. A., Lohwasser, W., & Ferro, A. C. (2007). On the performance of pyrolytic MnO<sub>2</sub>/tantalum capacitors: Columnar vs. nanocrystalline cathodic layers. *Acta materialia*, 55(11): 3757-3763.
17. Chaneliere, C., Autran, J. L., Devine, R. A. B., & Balland, B. (1998). Tantalum pentoxide (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) thin films for advanced dielectric applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 22(6), 269-322.

18. Hu, J. U. N. M. I. N. G., Barker, D. O. N. A. L. D. B., Dasgupta, A. B. H. I. J. I. T., & Arora, A. J. A. Y. K. (1993). Role of failure-mechanism identification in accelerated testing. *Journal of the IES*, 36(4), 39-45.
19. Teverovsky, A. (2007). Effect of temperature cycling and exposure to extreme temperatures on reliability of solid tantalum capacitors. NASA GSFC. 1, 18.
20. A Dehbi, A., Wondrak, W., Ousten, Y., & Danto, Y. (2002). High temperature reliability testing of aluminum and tantalum electrolytic capacitors. *Microelectronics Reliability*, 42(6): 835-840.
21. Virkki, J., & Tuukkanen, S. (2010). Testing the effects of temperature cycling on tantalum capacitors. *Microelectronics Reliability*, 50(8): 1121-1124.
22. Freeman, Y., Hahn, R., Lessner, P., & Prymak, J. (2007). Reliability and critical applications of tantalum capacitors. In *CARTS-CONFERENCE-* (Vol. 27, p. 111). COMPONENTS TECHNOLOGY INSTITUTE INC.
23. Martin, D., Grube, M., Weinreich, W., Müller, J., Weber, W. M., Schröder, U., ... & Mikolajick, T. (2013). Mesoscopic analysis of leakage current suppression in ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> nano-laminates. *Journal of Applied Physics*, 113(19): 194103.
24. Yu, D. Q., Lau, W. S., Wong, H., Feng, X., Dong, S., & Pey, K. L. (2016). The variation of the leakage current characteristics of W/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/W MIM capacitors with the thickness of the bottom W electrode. *Microelectronics Reliability*, 61: 95-98.
25. Jin, C., Lu, H., Zhang, Y., Zhang, Y., Guan, H., Wu, L., ... & Liu, C. (2016). Transport mechanisms of leakage current in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/InAlAs MOS capacitors. *Solid-State Electronics*, 123: 106-110.
26. Verchiani, M., Bouyssou, E., Fiannaca, G., Cantin, F., Anceau, C., & Ranson, P. (2008). Reliability study of TaON capacitors: From leakage current characterization to ESD robustness prediction. *Microelectronics Reliability*, 48(8-9), 1412-1416.
27. Manceau, J. P., Bruyere, S., Jeannot, S., Sylvestre, A., & Gonon, P. (2006, October). Leakage current variation with time in Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> MIM and MIS capacitors. In *2006 IEEE International Integrated Reliability Workshop Final Report* (pp. 129-133).
28. Teverovsky, A. (2016, January). Degradation of leakage currents and reliability prediction for tantalum capacitors. In *2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)* (pp. 1-7).
29. Chiu, F. C., Wang, J. J., Lee, J. Y. M., & Wu, S. C. (1997). Leakage currents in amorphous Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films. *Journal of Applied Physics*, 81(10): 6911-6915.
30. Savant, C. J., Roden, M. S., & Carpenter, G. (1992). *Diseño electrónico: circuitos y sistemas*. 2. Addison-Wesley Iberoamericana.