



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA
Y MATERIALES**

**“FABRICACIÓN DE SILICONES Y COMPÓSITOS
FERROELÉCTRICO-SILICÓN PARA APLICACIONES DE
ALTO VOLTAJE EN CORRIENTE DIRECTA”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA METALÚRGICA**

PRESENTA:

ING. BRENDA EDITH GARCÍA CAUDILLO

DIRECTORES DE TESIS:

DR. CARLOS GÓMEZ YÁÑEZ

ESIQIE-IPN

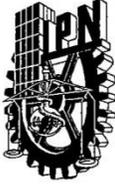
DR. FERMÍN PASCUAL ESPINO CORTÉS

ESIME-IPN

Ciudad de México

Enero, 2020





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14
 REP 2017

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis,

designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de:

para examinar la tesis titulada:

por el (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	GARCÍA	Apellido Materno:	CAUDILLO	Nombre (s):	BRENDA EDITH
-------------------	--------	-------------------	----------	-------------	--------------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Después de la lectura y revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **NO APROBAR** la tesis, en virtud de los motivos siguientes:

Comisión Revisora de Tesis


 DR. CARLOS GÓMEZ YÁÑEZ
 DIRECTOR DE TESIS
 12174-EG-18
 COLEGIADO TITULAR


 DR. FERMIN PASCUAL ESPINO CORTÉS
 DIRECTOR DE TESIS
 (EXTERNO-ESIME)


 DRA. MYRIAM PAREDES OLGÚN
 (EXTERNO-UPVM)


 DR. JOSÉ ORTIZ LANDEROS
 12099-EB-16
 COLEGIADO TITULAR


 DRA. LUCÍA TÉLLEZ JURADO
 13531-EF-18
 COLEGIADO TITULAR

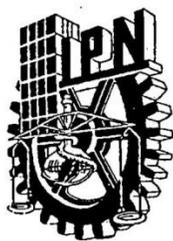

 DRA. MONICA DE LA LUZ COREA TÉLLEZ
 12917-ED-17
 COLEGIADO TITULAR

Presidente del Colegio de Profesores


 DRA. GUADALUPE SILVA OLIVER



ESCUELA SUPERIOR DE
 INGENIERÍA QUÍMICA E
 INDUSTRIAS EXTRACTIVAS
 SECCIÓN DE ESTUDIOS
 DE POSGRADO E
 INVESTIGACIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 18 del mes Diciembre del año 2019, el (la) que suscribe Brenda Edith García Caudillo alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica con número de registro B170188, adscrito a Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Carlos Gómez Yáñez y Dr. Fermín Pascual Espino Cortés cede los derechos del trabajo intitulado "Fabricación de silicones y compósitos ferroeléctrico-silicón para aplicaciones de alto voltaje en corriente directa", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección brendacaudillo10@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Nombre y firma

Brenda Edith García Caudillo

RESUMEN

Aunque los aisladores poliméricos son relativamente nuevos como aislamiento externo de alta tensión, su expectativa de vida todavía es desconocida y es un tema de gran interés para los servicios públicos. Sin embargo, sus ventajas sobre los aisladores de porcelana y de vidrio los han hecho aún más atractivos. Una propiedad con la que deben contar estos aisladores es la resistencia a las descargas parciales sobre la superficie, ya que estas causan la degradación de los aisladores no cerámicos en forma de seguimiento eléctrico y erosión del material.

Para mejorar las propiedades de los aisladores poliméricos se agregan partículas de cerámica de diversos tipos, los cuales son llamados rellenos. El BaTiO_3 es uno de los materiales ferroeléctricos de alta permitividad que puede incrementar la constante dieléctrica de todo el aislador, mejorando así el perfil de gradientes de campo eléctrico del cuerpo del aislador.

En este trabajo se elaboraron compósitos de Polidimetilsiloxano o hule silicón, entrecruzado a temperatura ambiente con 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% en peso de BaTiO_3 como relleno. Estas piezas fueron sometidas a la prueba de plano inclinado (ASTM-D2303-13) en corriente directa (CD) y corriente alterna (CA). El uso de CD en nuestro país se contempla para incrementar la capacidad de transmisión en el sistema eléctrico nacional, ya que presenta ventajas tales como: mayor capacidad de conducción, mejor estabilidad del sistema y disminución del derecho de vía, entre otras.

También se fabricaron láminas de Sol-Gel con PDMS de diferentes viscosidades, se usaron las viscosidades de 25 cSt, 60 cSt, 65 cSt y de 90-150 cSt, con el propósito de observar la influencia del peso molecular del polímero sobre el desempeño eléctrico.

Se observó que las muestras de silicón con menor peso molecular presentan mayor resistividad. Las muestras de silicón elaboradas por sol-gel resultaron tener poca resistencia mecánica, por lo que no se les hizo la prueba de plano inclinado.

Durante la prueba de plano inclinado se formaron surcos en las muestras de compósitos y se observó que entre mayor contenido de BT, menor es la resistencia a la erosión por descargas parciales. Esto se observó tanto en pruebas de CA como de CD. También fue notorio, que las pruebas CD dañaron más las pruebas comparadas con las pruebas de CA, esto todavía no es claro por los científicos, pero ya en pruebas anteriores se ha notado esta situación, puede ser porque en CD se acumula mayor contaminación que en CA, por ello el objetivo fabricar aisladores poliméricos con buenas propiedades no conductoras.

ABSTRACT

Although polymeric insulators are relatively new as external high voltage insulation, their life expectancy is still unknown and is a topic of great interest for public services. However, its advantages over porcelain and glass insulators have made them even more attractive. A property that these insulators must have is the resistance to surface discharges, since these cause the degradation of non-ceramic insulators in the form of electrical monitoring and erosion of the material.

To improve the properties of the polymeric insulators, some ceramic particles are added in the form of fillers. BaTiO₃ (Barium titanate or BT) is a ferroelectric material which shows high permittivity and it can increase the permittivity of the whole piece. This increase in permittivity produces in turn, a better profile of gradients in the electric field along the insulator body. At the end, the endurance of the insulator can be improved.

In this work, composites of Polydimethyl siloxane or silicone rubber, crosslinked at room temperature, were fabricated, added with 0, 10, 15, 20 and 25 weight percent of BaTiO₃ as filler. Samples were submitted to inclined plane tests (ASTM-D2303-13) in both, DC and AC regimes. The use of DC transmission lines has been considered for increasing the transmission capability of the national electric grid, this kind of regime has some advantages such capacity of transmission, better stability, reduction in the payment for the use of the via, etc.

Sol-Gel sheets with PDMS (Polydimethylsiloxane) of different viscosities were also manufactured, the viscosities of 25 cSt, 60 cSt, 65 cSt and 90-150 cSt were used, these organic polymer sheets were made to see their electrical properties as function of the molecular weight.

It was observed that samples with lower molecular weight presented the highest value of resistivity. Sol-Gel samples had low mechanical resistance so inclined plane tests could not be applied.

During the inclined plane tests, tracking was formed and it was observed that the higher the BT contain the lower the resistance to erosion bay partial discharges. This behavior was observed in both, DC and AC regimes. It was noted also, that the damage in the DC regime was more severe than in the AC regime.

ÍNDICE

Resumen	4
Abstract	5
Introducción	15
Objetivo General	18
Objetivo particular	18
Hipótesis	19
Justificación	19
Capítulo 2	
ANTECEDENTES	
2.1 Tipos de aisladores para alto voltaje	20
2.1.1 Aisladores cerámicos	20
2.1.2 Aisladores poliméricos o aisladores no cerámicos (ANC)	21
2.1.3 Ventajas de los aisladores poliméricos	24
2.2 Aplicación de los aisladores poliméricos sistemas eléctricos y fenómenos que los dañan.	26
2.2.1 Descargas Corona	28
2.2.2 Arborescencia Eléctrica	29
2.2.2.1 Tipos de Arborescencias	30
2.2.3 Tracking y Erosión	31

2.3	Uso de líneas de alto voltaje en corriente directa CD	32
2.3.1	Situación actual en México	33
2.3.2	Tipos de corrientes eléctricas	34
2.3.3	Uso de hule silicón como aislante de alto voltaje	36
2.3.4	Propiedades dieléctricas del hule silicón	37
2.4	Uso del BaTiO ₃ como relleno en compósitos de hule silicón	39
2.4.1	Estructura cristalina del BaTiO ₃	40
2.4.2	Propiedades dieléctricas del BaTiO ₃	41
2.4	Propiedades de los materiales dieléctricos	43
	CAPÍTULO 3	
	MATERIALES Y DISEÑO EXPERIMENTAL	49
3.1	Materiales	51
3.1.1	Matriz polimérica	51
3.1.2	Cerámicos para relleno	52
3.1.3	Propiedades del ácido esteárico (surfactante)	53
3.2	Cálculos para determinar las cantidades de relleno y surfactante a utilizar	54
3.3	Procedimiento para la funcionalización de BaTiO ₃ con ácido esteárico	57
3.4	Preparación del compósito	58
3.5	Elaboración de silicones con diferentes pesos moleculares	59

3.6 Caracterización	63
3.6.1 Caracterización Estructural y Microestructural	63
3.6.2 Caracterización Eléctrica	64
3.6.3 Plano Inclinado	66
3.6.4 Muestras para plano inclinado	68
3.6.5 Medición de la resistividad	70

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Muestras elaboradas	72
4.2 Caracterización estructural	74
4.3 Caracterización Microestructural	75
4.4 Ángulo de Contacto	76
4.5 Caracterización Eléctrica de silicones de diferentes pesos moleculares	77
4.6 Caracterización eléctrica de compósitos de hule silicón con BaTiO ₃	79
4.7 Plano inclinado	80
4.7.1 Pruebas en corriente directa (CD)	
4.7.2 Pruebas en corriente alterna (CA)	83
4.7.3 Comparación entre la erosión producida por cada tipo de voltaje	85

Conclusiones

86

Referencias

87

Índice de figuras

Número	Descripción	Página
2.1	Diseño típico de aisladores cerámicos y de vidrio.	19
2.2	Aislador compuesto de varilla larga.	20
2.3	Diseño de Aislador no cerámico o aislador polimérico.	21
2.4	Hidrofobicidad superficial en un aislador cerámico.	23
2.5	Influencia de la longitud del aislador en la estructura de la torre. A. pico de cable de tierra más corto debido a B, B. brazos más cortos, por lo tanto, reduce la carga torsional, C. carga reducida, por lo tanto, menos acero y aspecto más atractivo, D. flexión reducida y aumentos de torsión, por lo tanto, una base más pequeña.	25
2.6	Primera imagen, a) descarga corona, la segunda imagen b) descarga corona alrededor de una bobina de alta tensión.	27
2.7	Arborescencia en corbata de lazo.	28
2.8	Imágenes de arborescencias eléctricas.	29
2.9	Corriente directa, flujo de electrones en una sola dirección.	34
2.10	Corriente alterna, flujo de electrones en ambas direcciones.	34
2.11	Cadena repetida de silicón.	38
2.12	Posiciones iónicas en la estructura Perovskita ideal.	39
2.13	Parámetros de red de BT como función de la temperatura	40
2.14	Constante dieléctrica del BT en función de la temperatura	40
2.15	Cambios cristalográficos del BT en función de la temperatura	40

2.16	Efecto de diferentes ácidos carboxílicos en constante dieléctrica de sistemas silicón/cerámicos/silicón.	43
2.18	Cámara climática, listos para comenzar ensayo termomecánico.	45
3.1	Micrografías de MEB, partículas de BaTiO ₃ .	50
3.2	Ácido esteárico.	51
3.3	Procedimiento para la funcionalización del BaTiO ₃ con ácido esteárico.	55
3.4	Procedimiento para elaborar los compósitos.	56
3.5	Material para realizar las láminas de sol-gel.	58
3.6	Procedimiento de la fabricación de láminas de sol-gel.	60
3.7	Dos ejemplos extremos de ángulo de contacto.	61
3.8	Arreglo de la medición, puente RLC.	63
3.9	Prueba de plano inclinado.	63
3.10	Diagrama general de la prueba de plano inclinado.	65
3.11	Medidas de las muestras poliméricas.	66
3.12	Amplificador de alto voltaje.	68
3.13	Arreglo experimental, amplificador de alto voltaje.	
4.1	Láminas de sol-gel de diferentes viscosidades.	70
4.2	Compósitos de hule-silicón con diferente contenido de BaTiO ₃ .	70

4.3	Espectro infrarrojo de los compósitos de BaTiO ₃	70
4.4	Espectro infrarrojo de hule silicón.	70
4.5	Micrografías con aumento de la sección transversal de la muestra.	72
4.6	Imagen típica de la gota de agua sobre la muestra de compósito. En este caso la foto corresponde a la muestra de 20% peso de BT.	73
4.7	Gráfica de viscosidad vs resistividad de láminas de silicón.	74
4.8	Gráfica de viscosidad vs constante dieléctrica de láminas de silicón.	75
4.9	Gráfica de viscosidad vs pérdida dieléctrica de silicón.	75
4.10	Gráfica de los compósitos como función del contenido de BT.	76
4.11	Gráfica de la constante dieléctrica de los compósitos como función del contenido de BT.	76
4.12	Gráfica de la pérdida dieléctrica de los compósitos como función del contenido de BT.	77
4.13	Resultados de la prueba de plano inclinado en corriente directa, compósitos de BaTiO ₃ .	78
4.14	Gráfica de la masa erosionada de los compósitos en CD como función del contenido de BT.	79
4.15	Gráfica de tiempo de ruptura de los compósitos en corriente directa como función del contenido de BT.	79
4.16	Resultados de la prueba de plano inclinado en corriente alterna, compósitos de BT.	80
4.17	Gráfica de la masa erosionada de los compósitos en CA, como función del contenido de BT.	81
4.18	Gráfica de tiempo de ruptura de los compósitos en CA, como función del contenido de BT.	81
4.19	Muestras de silicón puro sometidas a la prueba de plano inclinado. Se puede observar el tipo de daño que causó cada tipo de corriente.	82

Índice de tablas

Número	Descripción	Página
2.1	Esfuerzos sobre aislamiento exterior de alta tensión.	36
2.2	Rellenos comunes incorporados en dieléctricos para lograr materiales de ingeniería para aislamiento eléctrico.	36
3.1	Propiedades del silicón RTV-615.	49
3.2	Propiedades del BaTiO ₃ .	50
3.3	Propiedades del ácido esteárico.	51
3.4	Respectivas masas de BaTiO ₃ para los compósitos.	53
3.5	Respectivas masas de ácido esteárico para los compósitos.	54
3.6	Características del equipo de plano inclinado.	64
3.7	Características del amplificador de alto voltaje.	69
4.1	Ángulo de contacto de los compósitos arriba mencionados.	73

Listado de Abreviaturas

Abreviatura	Significado
ATCD	Alta tensión de corriente directa
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
AE	Ácido esteárico
BT	Titanato de bario (BaTiO_3)
Tan δ	Ángulo de pérdidas, utilizado para diagnosticar calidad en aislamiento
ASTM	American Society for Testing Materials, organismo internacional que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para realizar ensayos en materiales
HVI	Interfaz de alto voltaje (High voltage interface)
HVA	Amplificador de alto voltaje (High voltage amplifier)

1. INTRODUCCIÓN

Los primeros aisladores surgieron cuando el telégrafo y el teléfono se inventaron en la década de 1850, pero solo el vidrio podía aislar eficientemente las corrientes eléctricas. La porcelana se probó sin gran éxito entre 1890 y 1893, posteriormente la cerámica se desarrolló en 1903, realizándose los primeros aisladores con este material y a partir de 1935 se utilizó el templado para los dieléctricos de vidrio, obteniéndose piezas con gran resistencia mecánica. Por último, tenemos a los aisladores de polímero que se puede decir que son una tecnología relativamente nueva y su vida esperada aún se desconoce lo anterior y es un tema de gran interés para las empresas de servicios públicos [1].

La historia de los aisladores poliméricos comenzó en la década de 1940, cuando se usaron materiales aislantes orgánicos para fabricar aisladores eléctricos para interiores de alto voltaje, a partir de resinas epoxi. Este tipo de aisladores para uso en exteriores se hicieron factibles en la década de 1950. Sin embargo, los aisladores de polímeros para aplicaciones en exteriores en líneas de transmisión se desarrollaron hasta finales de los años sesenta y setenta, concluyendo su uso general en las líneas de transmisión en 1980 [1]. Es importante mencionar que estos aisladores tienen excelente desempeño a la intemperie, gracias a su carácter hidrofóbico ya que mantiene una alta resistencia superficial, incluso en condiciones de lluvia y evitando así la formación de películas continuas de agua y arcos en la superficie del aislador.

Con el paso del tiempo los investigadores se han dado cuenta que, para reducir los problemas ocasionados por descargas superficiales, existen dos opciones:

- 1.- Reducir la intensidad del campo eléctrico en la superficie del aislador por debajo del valor por inyección de descargas.
- 2.- Modificar las propiedades de los materiales mediante la adición de rellenos inorgánicos para incrementar la resistencia a la erosión por descargas.

En este trabajo se tomó la segunda opción, se fabricaron compósitos con hule silicón RTV-615 con BT, dispersado con AE, ya que el BT es uno de los materiales ferroeléctricos de alta permitividad que puede incrementar aún más su valor de K (constante dieléctrica), es decir, cuando esta constante se eleva, el campo eléctrico en la superficie del aislador puede disminuirse [2].

Los aisladores poliméricos compuestos están siendo aceptados cada vez más por las empresas eléctricas. Actualmente representan alrededor del 70% de los nuevos aisladores de alto voltaje instalados en América del Norte [1]. Sin embargo, debido a que este tipo de aisladores son relativamente nuevos, la vida útil esperada no se conoce y es de interés crítico para los usuarios. Como el PDMS (polidimetilsiloxano) tiene excelentes propiedades fisicoquímicas, bajo costo y nula toxicidad, sus aplicaciones varían desde lentes de contacto, lubricantes, aditivo en alimentos, recubrimientos resistentes al calor entre otros.

En este trabajo los compósitos poliméricos se sometieron a alta tensión en corriente directa. El concepto de alta tensión en corriente directa (ATCD) apareció a mediados de la década de 1920 debido a la necesidad de transmitir mayores volúmenes de energía a mayores distancias, así como para la instalación de líneas submarinas. La transmisión de líneas de corriente directa se ha evaluado como una opción posible en nuestro país, debido a que para unas circunstancias presenta ventajas con respecto a las líneas de corriente alterna, tales como: mayor capacidad de conducción, mejor estabilidad del sistema y disminución del derecho de vía entre otras [3].

La infraestructura eléctrica nacional sumará los próximos años nuevos proyectos, lo que implicará una nueva inversión por 3,500 millones de dólares para el arranque de proyectos como: la línea de transmisión de corriente directa que correrá de Oaxaca al Estado de México, demandará una inversión de 1,700 millones de dólares (mdd), también otro proyecto es el de la obra de la línea submarina de corriente directa que conectará el sistema aislado de Baja California Sur al interconectado nacional (los Mochis-Villa constitución), el proyecto podría entrar en operación en unos cuantos años. Los avances del estudio técnico y económico muestran beneficios atractivos con el proyecto de corriente directa, entre los que se destacan los siguientes beneficios relacionados [4]:

- Menores costos de inversión, con reducciones de hasta un 50% en comparación con enlaces de CA.
- Aumento en la capacidad de transmisión en 1,200 MW, por lo que se aprovecharía capacidad de generación de tecnologías renovables en la zona sureste del país.

Otro punto importante es la aparición de descargas superficiales, éstas se derivan de un campo eléctrico en un espacio específico, éste aumento se debe muchas veces a la contaminación a la que se encuentran expuestos los aisladores. Con el tiempo estas descargas provocan la pérdida de la hidrofobicidad y la erosión del material de la cubierta.

Por lo tanto, conocer las numerosas investigaciones que han trabajado con distintos rellenos es importante para comprobar que realmente sean efectivos como aisladores para alta tensión, aquí hay unos ejemplos de ello:

- En investigaciones anteriores utilizaron diferentes rellenos, con diferentes ácidos carboxílicos, tales como ácido oleico, ácido laúrico y EDTA (etilendiaminotetraacético), comprobándose que el ácido oleico no mejora las propiedades dieléctricas, mientras que el laúrico y el EDTA si las mejoran, pero el ácido esteárico por si solo las mejora aún más [5].
- Posteriormente en otro trabajo de investigación se obtuvieron compósitos silicón-cerámicos, a partir de la mezcla de silicón con óxido de magnesio y nitruro de aluminio por separado, para mejorar la dispersión del óxido de magnesio en el silicón fue utilizado el tensoactivo Tritón X-100 [6].
- Paredes Olguín Myriam, trabajó con polvo cerámico semiconductor dopado con Y que sustituyen a los átomos de Ti mediante un tratamiento térmico a 1500°C [7].
- Compósitos de hule silicón y polvo de BaTiO_3 , se prepararon para determinar sus valores de permitividad dieléctrica relativa (K). Se encontró que adicionando rellenos de polvo de BaTiO_3 al hule silicón, se obtienen compósitos poliméricos con constante dieléctrica mayor, sin perder las propiedades mecánicas características del silicón [2].

1.1 OBJETIVO GENERAL

Fabricación de silicones y compósitos ferroeléctrico-silicón para aplicaciones de alta tensión en corriente directa.

1.1.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- ❖ Estudiar la influencia eléctrica de diferentes cantidades de partículas de BaTiO_3 en la matriz polimérica de hule silicón.
- ❖ Comparar la resistencia a la erosión sobre los compósitos por descargas superficiales en corriente directa con respecto al mismo fenómeno en corriente alterna.

1.2 HIPÓTESIS

Cambiando gradualmente la concentración del material cerámico que se introduce en la matriz del silicón y el peso molecular de los silicones podría reflejarse la influencia del material ferroeléctrico y el peso molecular sobre las propiedades eléctricas en altos voltajes de corriente continua. Haciendo que aumente la permitividad.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los aisladores poliméricos, presentan varias ventajas frente a los aisladores cerámicos o de vidrio. La característica hidrofóbica de la superficie de los materiales poliméricos utilizados en las cubiertas de los aislamientos externos es la propiedad que reduce la posibilidad de aparición de descargas eléctricas en la superficie. Sin embargo, la hidrofobicidad puede perderse temporalmente e incluso de manera permanente. Una opción para reducir la probabilidad de que presenten descargas en la superficie de los aisladores es el control del campo eléctrico, mediante el uso de materiales de alta permitividad eléctrica. Estos compósitos han mostrado su factibilidad en aisladores y boquillas en corriente alterna, pero no se han evaluado bajo tensiones de corriente directa. Por lo anterior resulta de interés evaluar la capacidad de los materiales compuestos de alta permitividad, de operar en alta tensión de CD. En el trabajo se realizará un estudio del comportamiento de los materiales compuestos de alta permitividad operando bajo tensiones de CD.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Tipos de aisladores de alto voltaje

Alrededor del año 1910 se utilizaron tensiones de hasta 100 kV y desde aproximadamente 1920 se desarrollaron varios sistemas de alto voltaje en varias partes del mundo. Se transmitieron potencias de aproximadamente 50 MW en distancias de hasta 50 km. En 1954, se adoptó una tensión de 380 kV como estándar internacional y durante la década de 1960 se generaron potencias de hasta 1000 MW a distancias de 1000km, primero a una tensión de 5550 kV y luego a 765 kV o 800 kV [8].

En los últimos años, la transmisión de corriente directa de alto voltaje ha recuperado parte de su popularidad anterior. Esto se atribuye al hecho de que la corriente directa de alto voltaje no tiene limitación de la distancia de transmisión, no tiene problemas de estabilidad o de transmisión de potencia reactiva y produce muchas ventajas económicas cuando se usa en combinación con la transmisión de CA. La alta confiabilidad de los modernos convertidores de estado sólido, junto con otras ventajas técnicas y económicas, hacen que la transmisión de CD para ciertas condiciones sea preferible a la CA [8].

2.1.1 Aisladores cerámicos

Este tipo de aisladores están hechos de materiales cerámicos que incluyen porcelana y vidrio. Son materiales inorgánicos compuestos por elementos metálicos y no metálicos vinculados químicamente, poseen una alta dureza y resistencia al calentamiento, pero tienden a la fractura frágil. Su uso inicial precede a la construcción de sistemas eléctricos. Fueron introducidos por primera vez como componentes en redes telegráficas a fines del siglo XIX. Los aisladores de porcelana y vidrio están bien establecidos, como podría esperarse en base a su larga historia de uso. Ambos materiales tienen superficies inertes, que muestran una muy buena resistencia al arco de la superficie, y ambos son extremadamente fuertes en compresión [9].

Los enlaces químicos estables del material cerámico proporcionan una alta energía de superficie, ésta es una propiedad que describe la fuerza de la adhesión superficial de contaminantes. Con una alta energía libre de superficie, la porcelana se humedece fácilmente, el agua en la superficie tiende a formar filamentos que cubren las secciones de la superficie con una capa y los materiales con tales características se les conoce como hidrofílicos, por lo tanto, las superficies hidrofílicas tienden a no funcionar bien en condiciones de contaminación [10].



Figura 2.1 Diseño típico de aisladores cerámicos y de vidrio [11].

2.1.2 Aisladores poliméricos o aisladores no cerámicos (ANC)

El uso de material polimérico en aplicaciones de aislamiento al aire libre ha ido aumentando constantemente con el tiempo. A pesar de las tres décadas de historia de servicio, los materiales aislantes de polímeros no tienen el mismo nivel de estandarización que la porcelana. Este tipo de aisladores cuando son nuevos y sin exposición al medio ambiente, son resistentes a la humectación y son inherentemente hidrofóbicos. La retención de propiedades hidrófobas con la exposición es un atributo altamente deseado [10].

Los materiales poliméricos tienen enlaces más débiles que la porcelana (covalente versus iónico), lo que significa que se pueden envejecer y cambiar por las múltiples tensiones encontradas en el servicio. Con el desarrollo adecuado del

material y el diseño del producto, los aisladores poliméricos pueden proporcionar un alto rendimiento con la vida útil deseada [10].

Los aisladores poliméricos ofrecen ventajas significativas sobre los aisladores de porcelana y de vidrio, especialmente para líneas de transmisión de ultra alta tensión. Su peso ligero permite diseños de torres y compactación que los aisladores de porcelana y vidrio no [1].

Las ventajas específicas de este tipo de aisladores en comparación con los aisladores cerámicos o de vidrio son [1]:

- Peso ligero: menores costos de construcción y transporte.
- Resistencia al vandalismo: menos daños por armas de fuego.
- Relación de alta resistencia a peso: tramos más largos, nuevos diseños de torres.
- Mejor rendimiento bajo condiciones de contaminación.
- Mejora la estética de la línea de transmisión.

Los aisladores de polímero tienen un núcleo compuesto por una varilla de fibra de vidrio y una cubierta exterior aislante de material polimérico, la cual proporciona protección al núcleo de los esfuerzos eléctricos y de la intemperie, además se caracteriza por ser flexible.

Aisladores compuestos de varilla larga

El término varilla larga se usa en realidad para un diseño específico de aislante de porcelana que se introdujo por primera vez en Alemania en la década de 1920, la construcción de una varilla larga compuesta tiene como objetivo trabajar en condiciones ambientales críticas, es decir alta contaminación. En la figura se puede ver el núcleo reforzado con la fibra de vidrio, los accesorios metálicos y la cáscara de silicona [12].

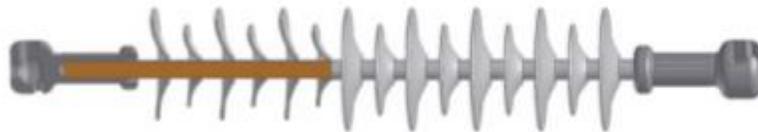


Figura 2.2 Aislador compuesto de varilla larga [12].

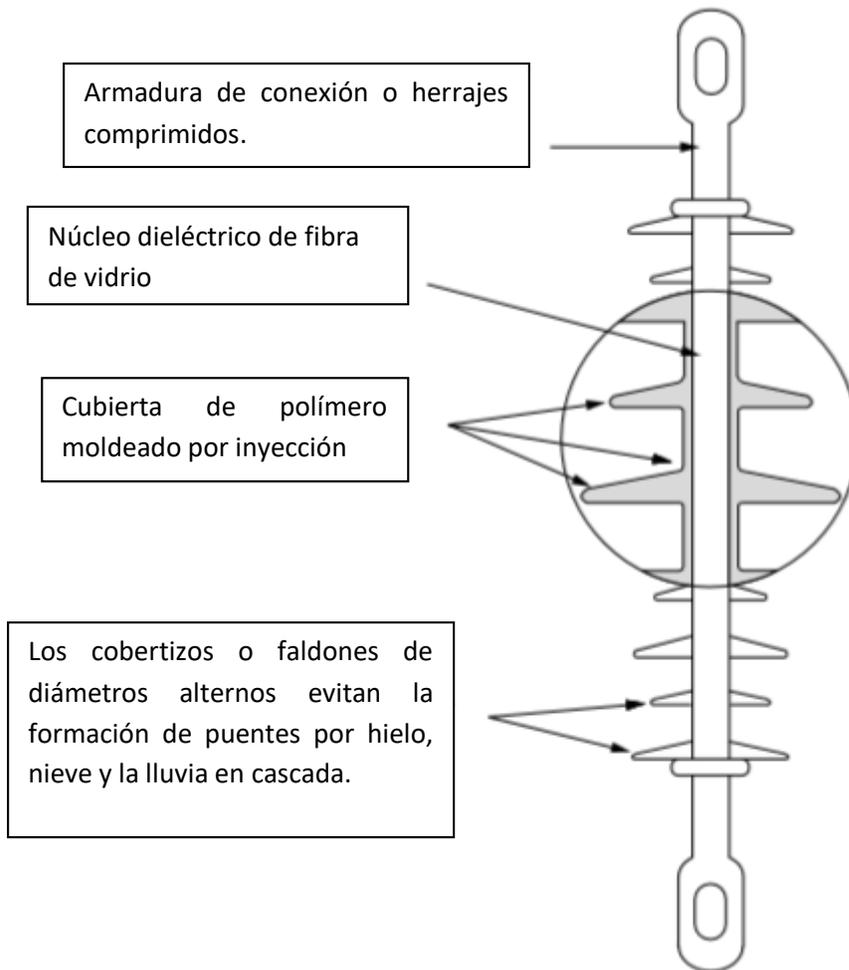


Figura 2.3 Diseño de aislador no cerámico o aislador polimérico [9].

Núcleo dieléctrico o barra fibra de vidrio: transmite los esfuerzos mecánicos producidos por los conductores y proporciona aislamiento eléctrico necesario, también es resistente a la hidrólisis para evitar el ingreso de humedad y provocar ruptura por corrosión. Estas barras pultruidas contienen fibras de vidrio de grado eléctrico alineadas axialmente en una matriz de resina [9].

El material plástico reforzado con fibra de vidrio que conforma el núcleo mecánico, debe ser fabricado mediante una matrix de resina epoxi y una suspensión de fibras de vidrio de grado "ECR" (Electrical and Chemical Resistant) o Resistentes eléctrica y químicamente, lo cual se consigue mediante la utilización de vidrios libre de boro [13].

Cubierta de polímero: es el recubrimiento moldeado sobre la barra de fibra de vidrio, éste recubrimiento deberá ser uniforme alrededor de la circunferencia de la varilla de fibra de vidrio, ésta formará una superficie hidrofoba protectora, aún bajo condiciones de contaminación severa.

Faldones: pueden ser planos, cóncavos o en forma de cono, a veces se instalan con diámetros alternantes, su objetivo principal es incrementar la distancia de fuga. En la fabricación actual de los aisladores no cerámicos, los materiales más comunmente usado son los elastómeros de silicón e hidrocarburos. Los elastómeros hidrocarbonados incluyen hules de etileno-propileno, tales como el monomero de etileno-propileno (EPM), el dieno monómero de etileno-propileno (EPDM) y un copolímero de etileno-propileno y silicón (ESP). Los elastómeros de silicona incluyen a los silicones que se vulcanizan a alta temperatura (HTV), los silicones líquidos (LSR) y los silicones vulcanizables a temperatura ambiente (RTV). Los materiales de etileno-propileno han mostrado buen comportamiento en ambientes limpios, mientras que los materiales basados en silicón funcionan bien tanto en aplicaciones bajo condiciones limpias como contaminadas [7,9].

Armadura de conexión o Herrajes comprimidos: es un elemento mecánico que cumple la función de soportar y transmitir la carga mecánica sobre el aislador, con un diseño adecuado en la interfaz donde los herrajes se unen con el aislador y aseguran que la contaminación no alcance al núcleo de la fibra de vidrio. Muchos de los herrajes usados están hechos de metales como aluminio o acero y son remachados y atornillados al núcleo, o bien se insertan al núcleo por compresión y se unen con pegamentos especiales [7].

Los Herrajes deben quedar siempre sellados herméticamente. Este material nunca deben sobremoldearse con la envolvente o embeberse en la silicona. De hacerlo, aparecen puntos de enorme campo eléctrico dentro de la envolvente, que la degradan y en última instancia llevan al fallo al aislador [13].

2.1.3 Ventajas de los aisladores poliméricos

Durante los últimos 25 años los aisladores poliméricos han surgido como una opción viable en lugar de los de porcelana y vidrio para aislamiento exterior. Los polimeros son preferibles en ciertos aspectos a la porcelana o vidrio debido a su menor peso, mejor resistencia al vandalismo y rendimiento superior a la contaminación. Una de las características más importantes sobre los aisladores poliméricos, es su desempeño a largo plazo, sin embargo el aislamiento exterior está sujeto a una variedad de esfuerzos, por ejemplo: eléctrico, térmico, mecánico,

radiación UV, entre otros. Éstas tensiones se van dando de forma simultánea y pueden tener un efecto sinérgico en el envejecimiento del aislador [14].

A continuación se presenta algunas ventajas de los aisladores no cerámicos y compósitos poliméricos :

- **Excelente desempeño en ambientes contaminados:** El caucho de silicona vulcanizado a alta temperatura es preferido, especialmente en entornos altamente contaminados, esto se debe a su excelente característica hidrofóbica originadas por la distribución de tamaños de las moléculas de los polímeros las cuales en promedio son grandes, pero hay moléculas de bajo peso molecular en la goma de silicona, éstas moléculas son muy pequeñas y ligeras en comparación con otras moléculas en la matriz del polímero y por lo tanto pueden moverse fácilmente a la superficie, ya que en la superficie las moléculas de bajo peso molecular se difunden con la capa de contaminación y posteriormente encapsulan las partículas nocivas, devolviéndole hidrofobicidad a la superficie [7,15].

La hidrofobicidad del aislador significa que el material se resiste a la formación de películas continuas de humedad, esto se debe a su elevada tensión superficial. Cuando el material tienen una hidrofobicidad estable, también implica la capacidad de autolimpieza, ya que la suciedad queda atrapada y aislada y sin posibilidad de que forme caminos secos conductores [15].

La hidrofobicidad es la propiedad que tiene la superficie de un aislante sólido para formar gotas, en lugar de formar una película continua de agua cuando existen condiciones de niebla, alta humedad o lluvia ligera. Como se observa en la Figura 2.4.



Figura 2.4 Hidrofobicidad superficial en un aislador polimérico [20].

- **Peso ligero:** los aisladores de polímero son más ligeros que los convencionales, y ello reduce el costo de las estructuras, el transporte, el almacenamiento, la mano de obra de instalación, entre otros. Este tipo de aisladores son ventajosos para uso en zonas urbanas, ya que ofrecen una excelente relación entre una alta resistencia mecánica y un bajo peso que le permite tener una vida útil de aproximadamente 40 años y una estética visual mejorada [7].
- **Geometría compleja:** las cubiertas de aislamiento de polímero se moldean relativamente de manera fácil, ya que los polímeros pueden ser adaptados con geometrías complejas, no es difícil fabricar piezas sobre una base rentable que tenga una mayor distancia de fuga por unidad de longitud que la porcelana. Se fabrican faldones de diámetro alterno (grandes y pequeños), que incrementa la tensión de flameo. Los materiales poliméricos tienen enlaces más débiles que la porcelana (covalente vs iónico), lo que significa que pueden envejecer, pero con un adecuado desarrollo de materiales y diseño de producto pueden proporcionar un alto rendimiento [10].

2.2 Aplicación de los aisladores poliméricos sistemas eléctricos y fenómenos que los dañan

Las líneas de transmisión de energía eléctrica o línea de alta tensión, son básicamente el medio físico por el cual se realiza la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias, entre subestaciones eléctricas. Su operación confiable depende en gran medida de una inspección adecuada, para así poder proporcionar el mantenimiento oportuno.

En la actualidad la alta tensión se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones que abarcan los sistemas eléctricos de potencia, la industria, los laboratorios de investigación, en aplicaciones biomédicas, entre otros. Algunas de éstas aplicaciones se han convertido en esenciales para sostener la civilización moderna [12].

Los aisladores de alto voltaje son de importancia clave para la seguridad operacional y la eficiencia operativa de los sistemas de transmisión de energía eléctrica y por lo tanto no es de extrañar que estos componentes deban cumplir con demandas altas en términos de confiabilidad. Los primeros aisladores de líneas de transmisión aéreas, hechos de materiales orgánicos, fueron utilizados

hace más de 50 años en los EE. UU., éstos aisladores se utilizaron principalmente en líneas de media tensión. Unos años más tarde, los fabricantes de Alemania, Francia, Inglaterra, Italia y Suiza comenzaron a fabricar aisladores en la forma que conocemos hoy [12].

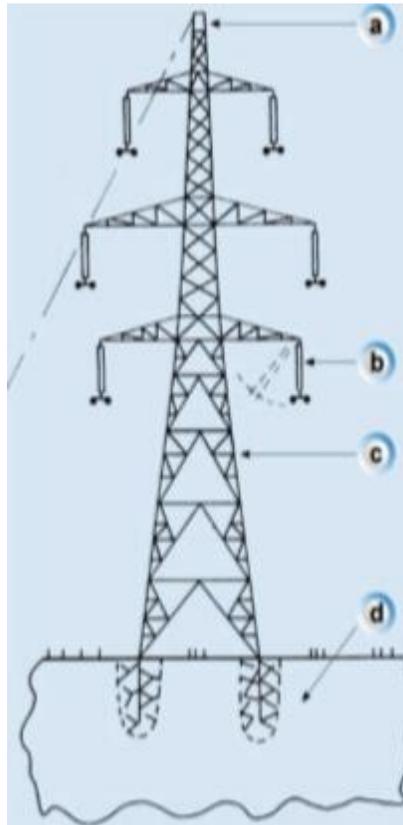


Figura 2.5 Influencia de la longitud del aislador en la estructura de la torre. A) Punta de hilo de guarda más corto, debido a B). B) Brazos más cortos, por lo tanto reduce la carga torsional. C) Carga reducida, por lo tanto menos acero y aspecto más atractivo. D) Flexión reducida y momentos de torsión, por lo tanto una base más pequeña [12].

Existen varias razones para el creciente uso de materiales poliméricos en la fabricación de equipos de alta tensión. Las extraordinarias propiedades de las superficies de ciertos polímeros resultan muy útiles para su aplicación como aislamiento eléctrico, en zonas de media y alta contaminación [12].

Los aisladores no cerámicos presentan, además, una excelente resistencia a la intemperie y a la degradación por envejecimiento, dicho material puede ofrecer una vida útil, superior a los 30 años, como ya se ha comprobado en la práctica en

las más de cuatro décadas de historia de aislamiento polimérico implantado a gran escala.

A nivel microscópico, la cuestión clave son las propiedades físico-químicas de la superficie del polímero y la estabilidad de las mismas frente a campos electromagnéticos. Estas propiedades son:

- 1.- Estructura electrónica superficial
- 2.- Reconstrucción superficial de enlaces químicos
- 3.- Energías de adsorción y barreras de difusión para diversas especies químicas

Éstas características microscópicas son las que dotan a la superficie polimérica de sus propiedades termodinámicas útiles, como: elevada tensión superficial, hidrofobicidad, y capacidad de autolimpieza y auto-regeneración [12].

A continuación se describen algunos fenómenos que afectan el desempeño de los aisladores poliméricos en sistemas de alta tensión.

2.2.1 DESCARGA CORONA

Es un fenómeno eléctrico que ocurre espontáneamente en las líneas de alta tensión y se manifiesta en forma de halo luminoso. Este tipo de descarga es causado por la ionización del aire circundante al conductor debido a las inhomogeneidades de campo eléctrico en las superficies de los conductores, que se producen a altas tensiones.

El gas ionizado es químicamente activo y cuando ocurre éste fenómeno se producen gases como ozono (O_3), monóxido de nitrógeno (NO) que evoluciona a dióxido de nitrógeno (NO_2) y ácido nítrico en ambientes húmedos.

Bajo la acción de corona, las superficies de las cubiertas de los aisladores se someten simultáneamente a una mezcla de especies energéticas y reactivas, así como radiaciones, electrones, iones, ozono, UV y altas temperaturas. Todo esto provoca la degradación de la estructura de la red polimérica y produce cambios en las propiedades mecánicas y eléctricas de la cubierta [16].

La presencia de gotitas de agua depositadas sobre las superficies poliméricas hidrófobas distorsiona localmente la distribución del campo eléctrico. La razón de esto se debe a dos circunstancias: la primera se debe a la alta permitividad relativa del agua y la segunda se debe a las deformaciones de las gotitas, pero

ésta segunda se debe al tipo de tensión que se aplique, es decir, si se encuentra en CA (corriente alterna) o CD (corriente directa) [16].

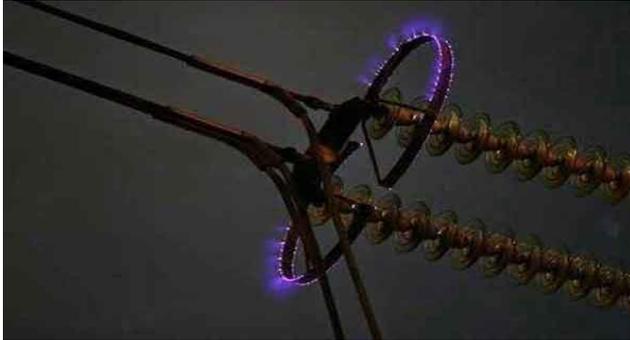


Figura 2.6 Primer imagen descarga corona, la segunda imagen es descarga corona alrededor de una bobina de alta tensión [17].

2.2.2 ARBORESCENCIA ELÉCTRICA

Es un fenómeno eléctrico, previo a la ruptura dieléctrica de un material aislante, suele emplearse como sinónimo el término en inglés “electrical treeing”. Es un proceso destructivo progresivo e irreversible debido a descargas parciales, que avanza dentro o en la superficie de un dieléctrico cuando se somete a un prolongado estrés eléctrico de alta tensión [18].

Las descargas parciales en general son una consecuencia de campos eléctricos intensos que rebasan localmente la rigidez dieléctrica de los materiales aislantes. Estas descargas suelen presentarse en cavidades o huecos, ya sea internamente o en el límite entre materiales dieléctricos o entre dieléctricos y los electrodos.

Se observa que las arborescencias eléctricas se inician en puntos del aislante donde impurezas, burbujas gaseosas, defectos mecánicos o partículas conductoras crean pequeñas regiones con un alto esfuerzo eléctrico sobre el material dieléctrico. Con el tiempo se formará dentro del dieléctrico una figura ramificada tridimensional semejante a un árbol, parcialmente conductora de la electricidad, ésta arborescencia puede en ocasiones crecer hasta el punto de causar la falla completa del material aislante [18].

2.2.2.1 TIPOS DE ARBORESCENCIAS

- **Arborescencia electroquímica.** Aparecen cuando se presentan las siguientes características:
 - a) Presencia de partículas contaminantes en la mezcla polimérica.
 - b) Presencia de agua en el interior del conductor o dentro de la cubierta.
 - c) Intensidades del campo eléctrico iguales o superiores a 1.5-2 Kv/mm

Las consecuencias de éstas arborescencias, se manifiesta por el aumento considerable del factor de pérdida dieléctrica, por consiguiente la caída de la rigidez dieléctrica y la disminución de la resistencia de aislamiento [18,19].

- **Arborescencia en corbata de lazo.** Son las que comienzan a crecer desde el interior del material dieléctrico y avanzan simétricamente hacia afuera desde los electrodos. Como comienzan desde dentro del dieléctrico, no reciben el libre suministro de aire que permitiría un continuo soporte de las descargas parciales.



Figura 2.7 Arborescencia en corbata de lazo [19].

- **Arborescencias acuosas o árboles de agua.** Están constituidas por microcavidades rellenas de agua, distribuidos como nubes y con un diámetro entre 1-2 μm cada uno. Se desarrollan a partir de la capa semiconductor o bien en el interior del polímero, son incoloras y por ello, para observarlas por medio de microscopio es preciso tintarlas con azul de metileno o con rodamina [19].

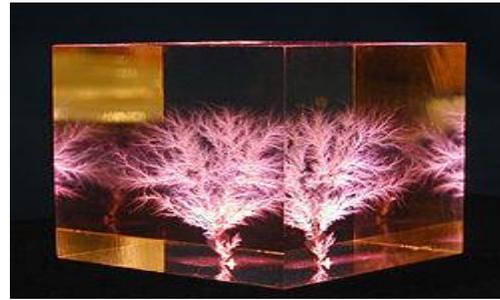
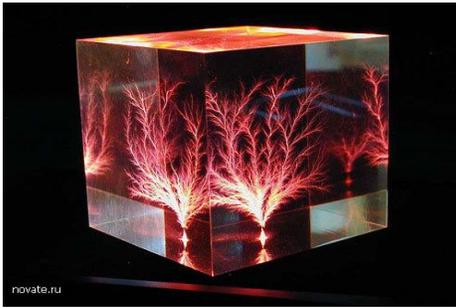


Figura 2.8 Imágenes de arborescencias eléctricas [18].

2.2.3 TRACKING Y EROSIÓN

Tracking: es la formación de pistas conductoras, es un proceso que genera una degradación irreversible debido a la formación de pistas conductoras o surcos que aparecen y crecen en la superficie del material aislante. Estas pistas o surcos son conductoras incluso cuando están secas [20].

Erosión: degradación irreversible que ocurre en la superficie del aislante debido a la pérdida del material y no es conductora, puede ser uniforme, localizada o arborescente.

El tracking y la erosión son la principal causa de falla en la mayoría de los aisladores externos. El arqueo en banda seca inicia la degradación de la superficie del material, la cual evoluciona hacia el interior del mismo.

Los aisladores compuestos de polímero con núcleo de fibra de vidrio, conexión final de metal y coberturas exteriores de caucho de silicona, son candidatos confiables para los sistemas de transmisión y distribución de alto voltaje. Este tipo de aisladores han demostrado tener un excelente rendimiento eléctrico, mecánico, químico y de envejecimiento superior. Sin embargo bajo influencias de tensiones mecánicas, eléctricas (alto voltaje) y ambientales (radiación UV, arco de banda seca, lluvia ácida, humedad, temperatura), los aisladores no cerámicos en estas condiciones se vuelven hidrófilos, permitiendo así la corriente de fuga superficial y como consecuencia pueden tener lugar la erosión, la pérdida de hidrofobicidad, las descargas parciales y en ocasiones el fallo completo del aislador. Estas características a largo plazo, se le conoce como envejecimiento del aislador [21].

2.3 USO DE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN EN CORRIENTE DIRECTA (CD)

El uso de líneas ATCD ha mostrado ser una alternativa viable para la transmisión de grandes bloques de energía a largas distancias.

El concepto de alta tensión en corriente directa apareció a mediados de la década de 1920, debido a la necesidad de transmitir mayores volúmenes de energía a mayores distancias, así como para la instalación de líneas submarinas. La transmisión de energía eléctrica en CA ha sido ampliamente utilizada principalmente debido a la facilidad de transformación. El transformador es un equipo que permite elevar y disminuir la tensión de forma eficiente, por lo tanto, de esta manera es posible transmitir energía eléctrica en alta tensión a largas distancias. Además, el consumo de energía por parte de los usuarios a nivel residencial, industrial y comercial se hace en CA. Sin embargo, consideraciones técnicas y económicas han mostrado que la transmisión en CA, resulta ser menos factible que la transmisión en CD a medida que la tensión y la distancia incrementa [3].

La transmisión mediante líneas de corriente directa se ha evaluado como una opción posible en nuestro país, debido a que para algunas circunstancias presenta ventajas con respecto a las líneas alternas, tales como: mayor capacidad de conducción, mejor estabilidad del sistema, disminución del derecho de vía, entre otros, además las líneas de ATCD son una alternativa adecuada para la transmisión de energía eléctrica a través de líneas submarinas.

Los sistemas de ATCD siguen en continua evolución, ya que para el año 2005 existían más de 90 proyectos alrededor del mundo con una capacidad de 70000 MW. Actualmente existen varios proyectos y aunque México todavía no se tiene instalado ningún sistema de ATCD, se ha anunciado recientemente por parte de la SENER (Secretaría de Energía), la construcción de la primera línea de ATCD en México que irá del Istmo de Tehuantepec al centro del país. Con este proyecto se pretende resolver la mayor parte de las congestiones en la transmisión de energía eléctrica y promover el uso de tecnologías más eficientes, como lo es la transmisión en corriente directa en alta tensión [4].

Entre algunos de los sistemas de ATCD instalados en diversos países se pueden enunciar los siguientes:

- 1972, Canadá. Este proyecto consistió en la primera conexión asíncrona en el River conectando Quebec y New Brunswick con una potencia de 320

MW, a una tensión de 160 kV. Esta instalación fue muy importante ya que se dio la sustitución de las válvulas de mercurio por tiristores.

En años recientes la instalación de sistemas de ATCD ha experimentado un crecimiento acelerado en países como China, donde actualmente se construyen varias líneas de CD, teniendo proyectado que para el 2020 existan instaladas en ese país 13 líneas de 800 kV y una de 1100 kV.

Por otro lado es importante mencionar que en Europa, se espera que los sistemas de ATCD, serán los sistemas que darán forma a la futura red eléctrica inteligente, donde una cantidad significativa de energía será suministrada por fuentes de CD renovables [3].

2.3.1 SITUACIÓN ACTUAL EN MÉXICO

Aunque actualmente en México no se tienen instaladas líneas de transmisión de ATCD, existe un gran interés en el estudio de éstas, teniendo considerados al menos cinco proyectos viables con este tipo de tecnología, los cuales se describen a continuación:

- Se busca aplicar la transmisión de energía de corriente directa en la interconexión del sistema eléctrico de Baja California con el sistema interconectado nacional (Los Mochis-Villa constitución). La interconexión entre estas redes por medio de un enlace convencional de corriente alterna, no permitiría el control adecuado de los flujos de potencia, por lo que técnicamente se ha decidido el desarrollo de una interconexión asíncrona [3].

Con el objetivo de tener la mejor alternativa, se consideran los aspectos ambientales, geográficos, geológicos, así como las características eléctricas de los sistemas por interconectar.

- El segundo proyecto en donde se ha considerado la aplicación de un sistema de ATCD, es la construcción que va del Istmo de Tehuantepec al centro del país, este proyecto se considera que va a consistir en una línea de transmisión bipolar de ± 500 kV y 3000 MW y que también esta programada para complementar la segunda temporada abierta de generación eólica en el estado de Oaxaca.

Los beneficios de la CD en comparación con la CA, destacan los siguientes:

- I. Menores costos de inversión, con reducciones de hasta un 50% en comparación con los enlaces de CA.
- II. Aumento en la capacidad de transmisión en 1200 MW, por lo que se aprovecharía capacidad de generación de tecnologías renovables en la zona sureste del país [22].

En este proyecto se propone que se puedan usar las líneas de tensión de CD con aisladores poliméricos en un futuro. El uso de material polimérico en aplicaciones de aislamiento exterior han aumentado constantemente con el tiempo, pero a pesar de tres décadas de historia de servicio de aislantes de polímeros no tienen el mismo nivel de estandarización que los cerámicos.

2.3.2 TIPOS DE CORRIENTES ELÉCTRICAS

La corriente eléctrica varía según cómo las cargas eléctricas cambien el movimiento de manera constante. Cabe mencionar que toda corriente eléctrica no es más que el flujo de electrones a lo largo de la estructura molecular de un material conductor, siempre desde el polo positivo al polo negativo del material.

Este fenómeno conocido desde la antigüedad, se debe a la presencia de electrones libres en la última capa de los átomos de estos materiales, los cuales al no hallarse muy fuertemente unidos al núcleo atómico, pueden migrar al átomo siguiente, generando así una corriente eléctrica [23].

CORRIENTE DIRECTA (CD)

También conocida como corriente continua (CC), es aquella que siempre fluye en la misma dirección en un circuito eléctrico, su movimiento es rectilíneo y unidireccional y por lo tanto la energía fluye en el mismo sentido, sin importar la magnitud o voltaje de esta. La polaridad de circuación en este tipo de corriente, se establece por convención, desde el polo positivo al polo negativo, no obstante el movimiento de electrones (cargas negativas) se produce desde el polo negativo al positivo, y cada vez que se mueve un electrón deja un hueco positivo que atrae a otro electrón y por lo tanto este flujo de huecos es el que se produce en sentido positivo a negativo [24].

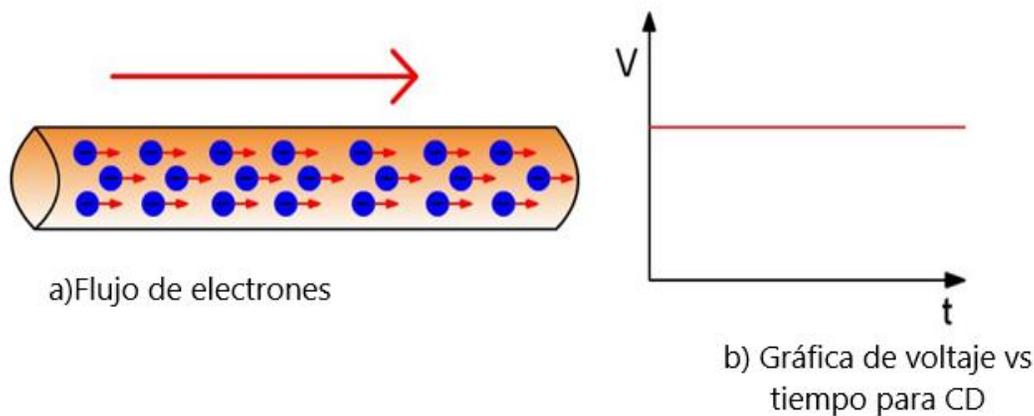


Figura 2.9 Corriente Directa, a) flujo de electrones en una sola dirección, b) gráfica de voltaje vs tiempo para CD [24].

CORRIENTE ALTERNA (CA)

En este tipo de corriente eléctrica la magnitud y la dirección varían cíclicamente, la forma de onda de la CA más comúnmente utilizada es la de una onda senoidal (una curva se desplaza hacia arriba y hacia abajo), puesto que consigue una transmisión más eficiente de la energía. Sin embargo en ciertas aplicaciones se utilizan otras formas de onda periódicas, tales como triangular o cuadrada.

Sin duda alguna el aspecto que más sobresale de este tipo de corriente es el hecho que durante un periodo de tiempo corto hay un polo positivo y otro negativo y seguidamente dicha polaridad se alterna. El cambio de sentido en el flujo de electrones se conoce como frecuencia y se mide en Hertzio (Hz), unidad que es igual a ciclos por segundo, esto quiere decir que en una corriente alterna de 60 Hz, se producen 60 ciclos por segundo. Cabe mencionar que la CA se puede producir en un generador y utilizar un transformador para subir y bajar la tensión de salida, según las necesidades y esto permite el transporte a una distancia mucho mayor.

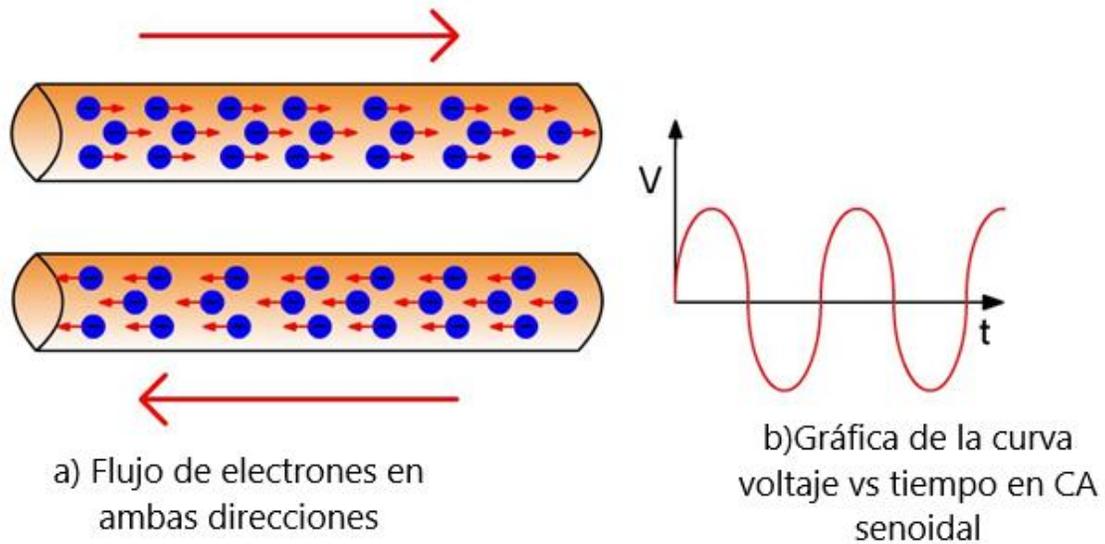


Figura 2.10 a) Flujo de electrones en ambas direcciones, b) gráfica de la curva voltaje vs tiempo en CA senoidal [25].

2.4 USO DE HULE SILICÓN COMO AISLANTE DE ALTO VOLTAJE

El hule silicón es un polímero inorgánico derivado del polisiloxano, está constituido por una serie de átomos de silicio y oxígeno alternados, pero también contiene dos grupos metil (CH_3) para cada silicio como se observa en la figura 2.12 [26].

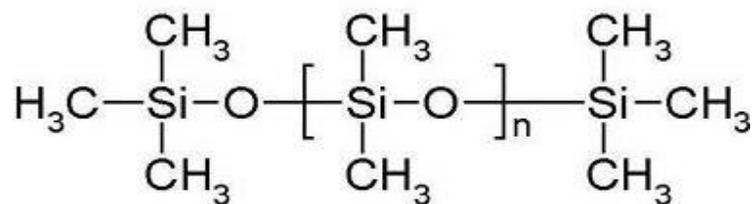


Figura 2.11 Cadena repetida de silicón [26].

Principales características de la silicona:

- Resistente a temperaturas extremas (-60 – 250 °C)
- Resistente a la intemperie, ozono, radiación y humedad
- Excelentes propiedades eléctricas como aislador
- Larga vida útil
- Gran resistencia a la deformación por compresión

Dada su composición química de silicio-oxígeno, el hule silicón es flexible y suave al tacto, no mancha, no envejece, no exuda nunca, evita el deterioro, ensuciamiento y/o corrosión sobre los materiales que estén en contacto con el mismo y no es contaminante [26].

La silicona posee flexibilidad, elasticidad y es un buen aislante, manteniendo sus propiedades dieléctricas aun ante la exposición a temperaturas extremas, donde otros materiales no soportarían. Cabe mencionar que también resiste algunos químicos como: algunos ácidos, oxidantes químicos, amoníaco, alcohol isopropílico, pero se incha cuando se expone a solventes no polares como el benceno, tolueno, retornando a su forma original cuando el solvente se evapora.

2.4.1 PROPIEDADES DIELECTRICAS DEL HULE SILICÓN

Se sabe que los elastómeros de silicona de todo tipo son excelentes dieléctricos, poseen muchas propiedades deseables que hacen que su aplicación como aislamiento eléctrico sea exitosa. En aplicaciones de alta tensión en exteriores, el aislamiento eléctrico a menudo experimenta esfuerzos que solo puede ser soportados por pocos materiales, los elastómeros de silicón por ejemplo se usan como material de cubierta en aplicaciones de aislamiento de alto voltaje en exteriores, ya que son capaces de resistir niveles de tensión que provocan descargas parciales, arco de banda seca y descarga corona en la superficie del aislamiento [27].

Los elastómeros de silicón normalmente son capaces de soportar todos los esfuerzos que a continuación se mencionan, sin embargo, todos los esfuerzos que dan lugar a descargas eléctricas sobre la superficie del aislador, originan la erosión física del material y finalmente su falla. El arco por banda seca causa el esfuerzo más dañino [7].

Tabla 2.1 Esfuerzos sobre aislamiento exterior de alta tensión [7].

Clasificación	Factores de Daño
Medioambiental	UV, humedad, temperaturas extremas, ataque químico.
Eléctrico	Arco eléctrico por banda seca, descargas parciales, descarga corona.
Mecánico	Cargas cíclicas.

El objetivo de la silicona en aplicaciones de alta tensión en exteriores, es reducir el estrés eléctrico de la superficie a un nivel que no produzca una descarga parcial. Para impartir una mejor resistencia a los efectos de descargas se puede lograr también mediante la adición de cargas inorgánicas adecuadas. A continuación se muestra una Tabla 2.2 los rellenos inorgánicos que más comúnmente, se incorporan en materiales dieléctricos para aplicaciones de aislamiento eléctrico [27].

Tabla 2.2 Rellenos comunes incorporados en dieléctricos para lograr materiales de ingeniería para aislamiento eléctrico [27].

Tipo Relleno inorgánico	Propiedad modificada	Mejora del aislamiento
Al₂O₃ 3H₂O SiO₂	Conductividad Térmica	Resistente al arco de banda seca, descargas parciales y corona.
BaTiO₃ BaTiO₃ + Al SiC	Permitividad Relativa	Atenuación del campo eléctrico.
Varistor (ZnO) Sb₂O₃	Conductividad eléctrica	Mejor desempeño en ambiente contaminado, atenuación del campo eléctrico.

Los rellenos son incorporados dentro de los materiales dieléctricos produciendo materiales compuestos que exhiben conductividad eléctrica, la tensión eléctrica en la superficie del aislamiento se puede reducir para minimizar los efectos del arco eléctrico.

2.5 USO DE BaTiO₃ COMO RELLENO EN COMPÓSITOS DE HULE SILICÓN

Durante la segunda guerra mundial, la necesidad de sustituir condensadores de mica excesivamente frágiles propició el estudio de materiales cerámicos basados en TiO₂, se detectaron anomalías dieléctricas en titanatos y circonatos con iones alcalinotérreos, pero se descubrió el carácter ferroeléctrico del BaTiO₃. Aparentemente el descubrimiento se realizó en 4 países a la vez y de manera independiente, éstos fueron: EE. UU., Gran Bretaña, Rusia y Japón.

Los primeros trabajos fueron realizados siempre sobre materiales policristalinos debido al punto de fusión tan elevado del titanato de bario (1,625°C). En 1947 se logran crecer monocristales a partir de una solución de BaCO₃ y TiO₂ en sales fundidas de BaCl₂ y solo dos años después se publica un estudio de BaTiO₃ monocristalino en el que incluyen datos de química cristalina, comportamiento eléctrico y calorífico, estructura de dominios y relaciones termodinámicas [28].

Hoy en día es más fácil encontrar polvo de Titanato de Bario (BT) incorporado como carga en compuestos cerámicos de polímeros para aprovechar las propiedades ferroeléctricas del BT. Se ha propuesto que el BT se utilice en aislamiento exterior, donde los materiales poliméricos han mostrado ventajas en comparación con los aisladores de porcelana y de vidrio [28].

El uso de rellenos inorgánicos con alta permitividad podría aumentar la permitividad del material compuesto y por lo tanto nos ayuda a disminuir la probabilidad de falla en el aislante. Un fenómeno que es importante mencionar, que evita el aumento de la constante dieléctrica, se atribuye a la gran diferencia de valores de permitividad entre la matriz y el relleno, esta condición genera una interfaz compuesta por una doble capa eléctrica difusa de cargas espaciales, cuando se carga una partícula de cerámica y la matriz del polímero contiene iones móviles. Además, la incompatibilidad entre las superficies es un problema importante, mientras que la naturaleza de la superficie del relleno es hidrófila, el polímero es hidrófobo [29].

Para reducir los problemas ocasionados por descargas superficiales existe la opción de modificar las propiedades de los materiales, mediante la adición de rellenos inorgánicos para incrementar su resistencia a las descargas. El uso de materiales que ayuden a controlar el campo eléctrico sobre aisladores no cerámicos ha sido abordado en trabajos anteriores, para distribuir los esfuerzos eléctricos uniformemente sobre el material y sin zonas de alta concentración, se usan materiales de alta permitividad.

Los ferroeléctricos poseen constantes dieléctricas extremadamente altas por lo que pueden mezclarse en baja concentración, para obtener compósitos de K alta sin afectar las propiedades de la matriz polimérica. El BT es uno de esos materiales ferroeléctricos de alta permitividad, que puede incrementar aún más su valor de constante dieléctrica al ser dopado [2].

2.5.1 ESTRUCTURA CRISTALINA DEL BaTiO₃

El titanato de bario presenta la misma estructura cristalina que el titanato de calcio (CaTiO₃), que es conocida como estructura tipo perovskita. Esta red cristalina es adoptada por múltiples compuestos de la forma ABO₃ donde A y el oxígeno es un catión de radio iónico grande, de coordinación 8-12, que ocupa los lugares vacíos entre los octaedros de oxígeno, mientras que B es un catión de radio iónico pequeño, de coordinación 6 que se sitúa en el centro del octaedro de oxígeno, como se observa en la Figura 2.13.

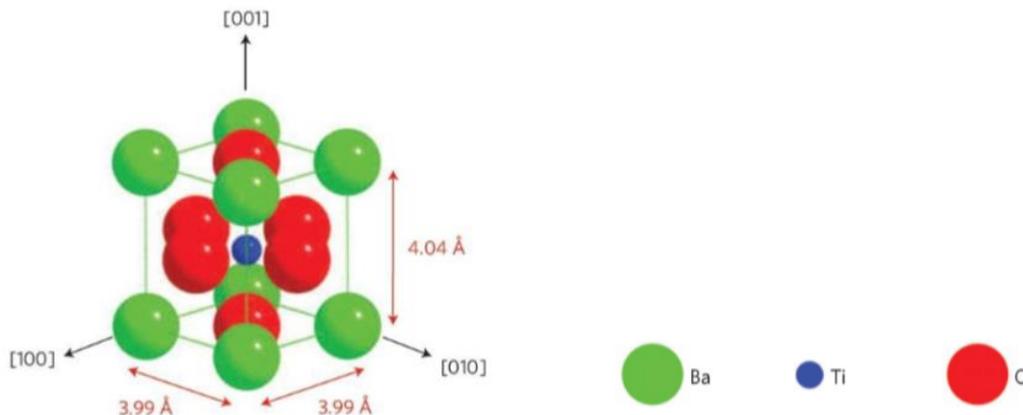


Figura 2.12 Posiciones iónicas en la estructura perovskita ideal [7].

Es una red cúbica compacta FCC formada por el catión más grande A y el oxígeno, mientras que los cationes B más pequeños ocupan los sitios octaédricos intersticiales en el arreglo FCC. La estructura es una red de un octaedro de oxígenos enlazados en las esquinas con el catión pequeño llenando los sitios octaédricos y los cationes grandes llenando los sitios dodecaédricos

El número de coordinación de A (Ba²⁺) es 12, mientras que el número de coordinación de B (Ti⁴⁺) es 6. En muchos casos, la Figura 2.12 se considera un poco idealizada debido a la variación del tamaño iónico (1.4 Å para Ba²⁺ y 0.6 Å para Ti⁴⁺) y los pequeños desplazamientos de los átomos que dan lugar a la distorsión de la estructura y la reducción de la simetría [7] [30].

2.5.2 PROPIEDADES DIELECTRICAS DEL BaTiO₃

La naturaleza ferroeléctrica del BaTiO₃ da origen a un valor de permitividad dieléctrica anormalmente elevado, presentando un máximo muy pronunciado en la temperatura de Curie, es decir, la temperatura a la que se produce la transición del estado ferroeléctrico (simetría tetragonal), al estado paraeléctrico (simetría cúbica) [28].

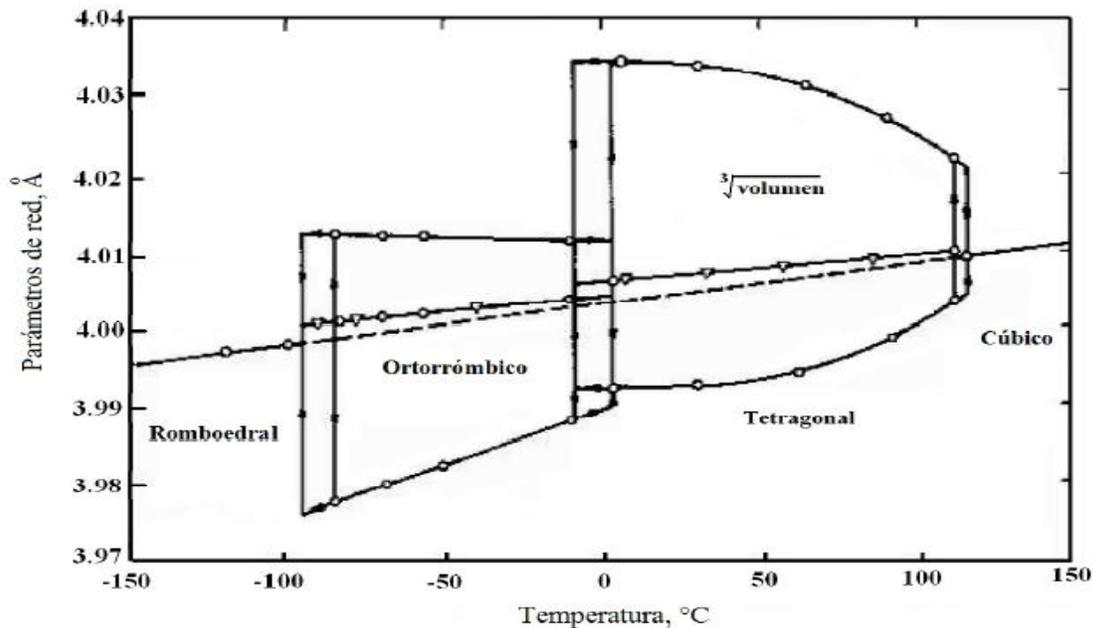


Figura 2.13 Parámetros de red del BaTiO₃ como función de la temperatura [].

Las dimensiones cristalográficas de la red de titanato de bario cambian con la temperatura, así como se muestra en la Figura 2.13, debido a la distorsión del octaedro de TiO₆ cuando la temperatura desciende desde la forma cúbica de alta temperatura hasta la tetragonal de baja temperatura.

Debido a que los octaedros distorsionados están acoplados unos con otros, se produce una gran polarización espontánea que da lugar a un valor grande de K y una gran dependencia de ésta con la temperatura en la dirección del vector **a** o el **c** (K_a y K_c respectivamente). Esto se puede apreciar en la Figura 2.14.

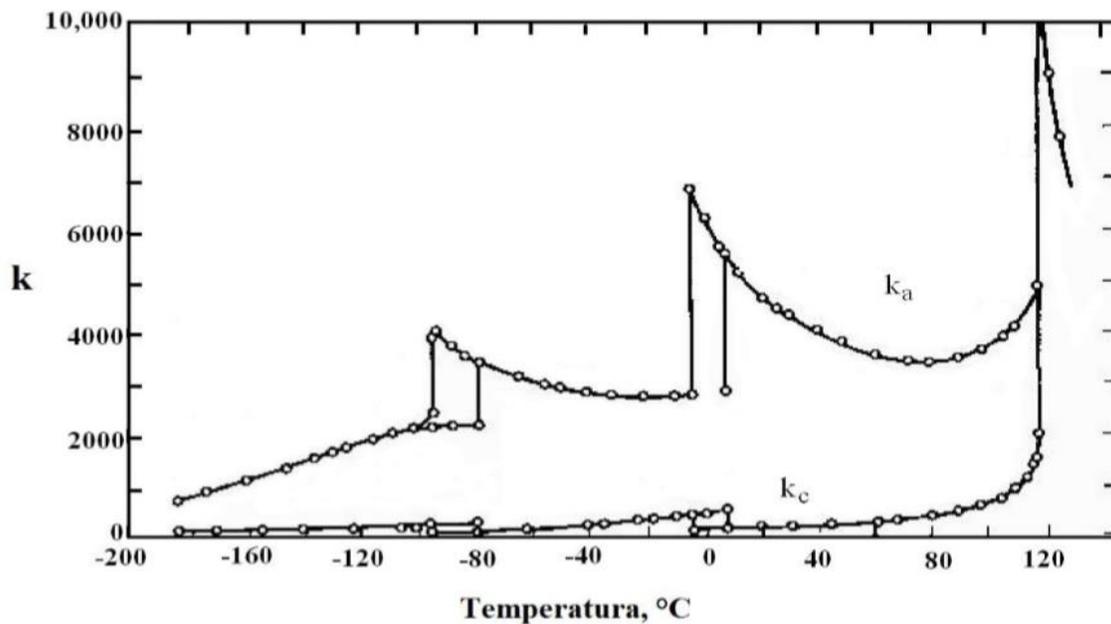


Figura 2.14 Constante dieléctrica del BaTiO₃ en función de la temperatura [7].

El BaTiO₃ tiene una simetría cúbica estable por encima de 130°C, hasta temperaturas muy altas de aproximadamente 1,460°C, es en la que aparece la fase hexagonal. Por debajo de 130°C y hasta 0°C tiene simetría tetragonal, entre 0°C y -88°C pasa a ser ortorrómbica y a temperaturas inferiores romboédrica. La ferroelectricidad del BaTiO₃ tiene su origen en la estructura de baja simetría. El ion Ti⁴⁺ se desplaza respecto del centro de octaedro de oxígeno distorsionando la red cúbica [28] [31].

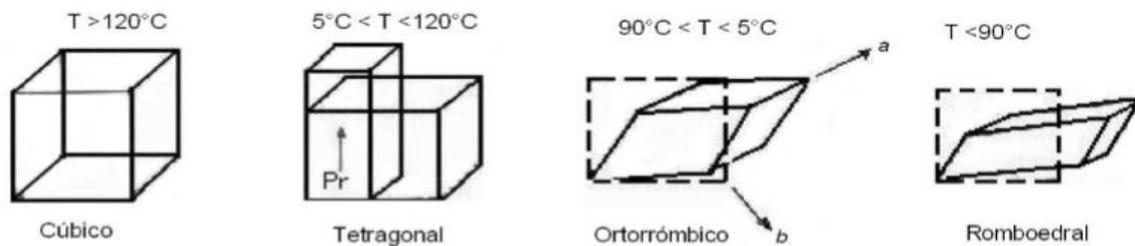


Figura 2.15 Cambios cristalográficos del BaTiO₃ en función de la temperatura [7].

El titanato de bario es un óxido de bario y titanio, se trata de un material cerámico ferroeléctrico, con propiedades piezoeléctricas y de efecto fotoreactivo. En estado de agregación sólido, posee cinco fases, de acuerdo con su temperatura: hexagonal, cúbica, tetragonal, ortorrómbica y romboédrica (estructuras cristalinas) ordenadas de acuerdo a temperatura decreciente, en todas las fases muestran el efecto ferroeléctrico excepto la fase cúbica que aparece encima de la temperatura de curie y presenta un centro de simetría, por lo tanto no es ferroeléctrico. Figura 2.15.

2.6 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DIELECTRICOS

Ferroelectricidad

La ferroelectricidad es una propiedad de ciertos dieléctricos que favorece la presencia de polarización eléctrica espontánea por debajo de la temperatura crítica, en ausencia de un campo eléctrico, la característica más importante de los materiales ferroeléctricos es que la polarización puede invertirse, si se desea, mediante la aplicación de un campo eléctrico externo. También es la capacidad de retener información en su estructura cristalina, sin necesidad de tener una fuente de energía.

En los materiales ferroeléctricos actúan con dipolos eléctricos, tienen uno positivo y uno negativo. Estos dipolos se orientan en forma aleatoria, sin embargo cuando se aplica un campo suficientemente fuerte, denominado campo crítico o coercitivo, todos se alinean con él, permaneciendo de este modo incluso si se elimina dicho campo. Para cambiar este estado, será necesario aplicar un nuevo campo igualmente intenso, pero en dirección opuesta.

Permitividad (ϵ)

La permitividad eléctrica también llamada constante dieléctrica, está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esta forma anular parcialmente del campo interno del material. La medición de este parámetro en los materiales ha despertado interés en los últimos años, porque se requiere en aplicaciones de diferentes sectores productivos, tales como medicina, farmacia, industria de alimentos, química e ingeniería civil, entre otros, debido a que a través de la medición de la permitividad es posible realizar cálculos indirectos de otros parámetros, tales como la humedad, temperatura y concentración

Capacitancia (C)

Es una medida de la cantidad de energía eléctrica almacenada para una diferencia de potencia eléctrica dada. La carga almacenada por un capacitor de placas paralelas está dada por la ecuación 1:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

Donde V es el voltaje y Q la carga eléctrica almacenada. La capacitancia C contiene información tanto de los factores geométricos como del material que hay entre el sistema capacitor.

Factor de pérdida dieléctrica (FP)

El factor de pérdida dieléctrica FP que se muestra en la Ecuación 2, es el criterio primario para determinar la utilidad de un dieléctrico como material aislante. Es el producto de los parámetros del material K y $\tan \delta$.

$$FP = K \tan \delta \quad (2)$$

Resistividad eléctrica (ρ)

Es una medida de la fuerza con la que un material se opone al flujo de corriente eléctrica. Si el material presenta baja resistividad indica que un material, puede permitir de forma fácil el movimiento de los electrones. A la inversa de un material de alta resistividad, tendrá una alta resistencia eléctrica e impedirá el flujo de electrones. La Ecuación 3 se muestra:

$$\rho = R \frac{S}{\ell} \quad (3)$$

en donde R es la resistencia en ohms, S la sección transversal en m^2 y ℓ la longitud en m.

ESTADO DEL ARTE

M. Paredes [5], detalla el efecto compatibilizador de 4 ácidos carboxílicos sobre las partículas de BaTiO_3 puras y dopadas con itrio. Este polvo se utilizó como relleno para los compósitos de hule silicón RTV. Los ácidos carboxílicos que se utilizaron fueron: ácido esteárico, ácido láurico, ácido oleico y etilendiaminotetraacético (EDTA), a las muestras realizadas se les hicieron pruebas eléctricas para obtener la capacitancia y una vez teniendo ese dato se podía determinar los valores de la constante dieléctrica (K), el factor de pérdida dieléctrica ($\tan \delta$) y la conductividad (σ). En la Figura 2.17 se observa que el ácido esteárico por si solo eleva la constante dieléctrica del sistema silicón/cerámico/silicón, por ello fue el ácido elegido para elaborar los compósitos.

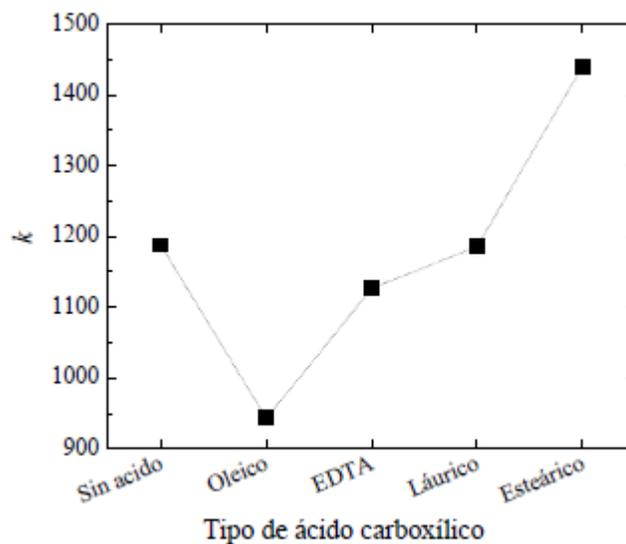


Figura 2.16 Efecto de diferentes ácidos carboxílicos en la K de sistemas silicón/cerámico/silicón [5].

T. Retana [6], fabrica compósitos de silicón RTV-615, con rellenos cerámicos para aumentar su resistencia ante las altas temperaturas producidas por descargas eléctricas superficiales. Para llevar a cabo la fabricación, seleccionaron materiales cerámicos con alta conductividad térmica fonónica, trabajaron con óxido de magnesio y nitruro de aluminio. Realizaron diferentes compósitos a diferentes concentraciones, las cantidades fueron: 0,5,10,30 y 50% volumen del cerámico.

En cada una de las muestras realizaron mediciones de caracterización eléctrica, capacitancia y resistencia de aislamiento, para comprobar que las características aislantes de la matriz se mantuvieran. También se aplicaron pruebas de desempeño como el plano inclinado y erosión láser, lo que los resultados indicaron que el nitruro de aluminio perdió menor cantidad de masa erosionada.

M. Paredes [7]. realizó un estudio sobre la influencia del Titanato de Bario (BaTiO_3) cuando se utiliza como relleno para elaborar compósitos de hule silicón RTV-615, para aplicaciones en aislamiento de alta tensión. Para ello elaboraron compósitos con diferentes concentraciones de polvo de BaTiO_3 , yendo desde el silicón puro hasta un 50% volumen de polvo mezclado en el silicón. Se realizaron simulaciones por computadora bajo tensión nominal de operación de 115 kV, 60 Hz y también bajo impulsos de rayo (1.2 /50 μs , voltaje pico 450 kV a 1.2 μs). Estas simulaciones mostraron que, al utilizar estos compuestos como recubrimiento de barras aisladoras y boquillas del transformador, la reducción del campo eléctrico tangencial es considerable.

J. Robertson [32]. En este artículo explica cómo se ha analizado varios aisladores compuestos de caucho se silicona, después de 15 años deservicio en una línea costera de transmisión de 400 kV en el Reino Unido. Se proporcionan mediciones extensas de su hidrofobicidad, según lo determinado por el ángulo de contacto. Desde luego que los mecanismos de envejecimiento y los procesos de descarga instantánea son diferentes para los sistemas cerámicos tradicionales que los aisladores compuestos y esto se debe principalmente a la mayor hidrofobicidad de las superficies poliméricas. En el Reino Unido se demostró que el clima tiene un gran impacto en el envejecimiento de los aisladores. Se requiere un análisis químico detallado de muchas caras del aislante para generar una imagen completa de los procesos de envejecimiento.

D. Fernández [33]. Detalla una explicación teórica y experimental de la evolución de los materiales aislantes de alta tensión desde los cerámicos a los poliméricos. Se habla bastante sobre los ensayos específicos de la envolvente polimérica, cabe mencionar que el éxito o fracaso en los ensayos de envejecimiento no solo depende del material polimérico, sino fundamentalmente a la distribución del campo eléctrico sobre la superficie del aislador. A lo largo de la última década, innumerables artículos técnicos y científicos han estudiado la distribución del campo eléctrico en la superficie de aisladores poliméricos de alta tensión. El

ensayo de los herrajes y las interfaces tienen una metodología compleja que se puede ver detalladamente descrita en la norma CEI 61109. Básicamente se trata de un ensayo de hermeticidad, que pretenden detectar cualquier falla en el sellado del equipo.



Figura 2.17 Cámara climática, listos para comenzar ensayo termomecánico [31].

J. Andersson [34]. Presenta una revisión que discute métodos de determinación de la resistencia a descarga corona y ozono de materiales poliméricos para aplicaciones en aislamiento de exteriores. Existen dos causas principales de descarga corona en la superficie de aisladores poliméricos compuestos, mal diseño de un aislante (incluidos los anillos de corona) o la presencia de gotas de agua en la superficie del aislador. Se realizaron varias investigaciones para estudiar el comportamiento de los aisladores compuestos, expuestos a la corona desencadenada por gotas de agua, se informó que la decoloración, erosión pueden atribuirse a acción de iones energéticos y gases reactivos de la descarga, además se encontraron regiones muy estresadas que implica la pérdida permanente de la hidrofobicidad. El grado de pérdida se encontró que es proporcional a la magnitud del campo eléctrico. Sin embargo, se ha demostrado que la erosión en la superficie del aislador debido a la corona de caída de agua, se

puede evitar cuando las superficies paralelas al campo eléctrico no estén estresadas más de 0.4-06 kV/mm.

A. Cherney y colaboradores [35]. Discute los mecanismos por los cuales los rellenos inorgánicos en dieléctricos de caucho de silicona mejoran las propiedades de conductividad térmica, permitividad relativa y conductividad eléctrica, lo que los hace útiles en aplicaciones de aislamiento de alto voltaje en exteriores. La adición de trihidrato de alúmina o cargas de sílice a los elastómeros de silicona forman compuestos binarios que mejoran la conductividad térmica y esto es motivo para que se discuta con respecto al tipo de relleno, el tamaño de partícula, la forma y la concentración del uso como material de alojamiento para aisladores no cerámicos. También se discute la permitividad relativa mejorada de los dieléctricos de silicona que se obtiene mediante la adición del polvo de titanato de bario, el cual se puede incrementar aún más con la adición de polvo de aluminio, lo que resulta en una clasificación significativa del campo eléctrico en la superficie. La conductividad eléctrica controlada de los dieléctricos de silicona es discutida a través del uso de los compuestos binarios de relleno de óxido de estaño dopado con antimonio y cuando se aplica como material en la carcasa de los bujes exteriores, el rendimiento de la contaminación mejora enormemente.

R. Hackman [36]. Utiliza cada vez más los rangos de voltaje de distribución y transmisión y por lo que están capturando mayor participación en el mercado. El uso principal para su mayor aceptación por parte de las empresas de energía eléctrica, sus ventajas principales son: su baja energía superficial, mantienen una buena propiedad de superficie hidrofóbica en presencia de condiciones húmedas como niebla, rocío y lluvia. El peso ligero da como resultado un diseño más económico de las torres y también permite actualizar el voltaje del sistema sin cambiar las dimensiones de las torres. El peso liviano de las cuerdas aislantes compuestas también permite un aumento de la distancia de fase a fase para reducir los campos eléctricos y magnéticos. Actualmente no existen especificaciones bien definidas para la prueba de vida acelerada de aisladores poliméricos compuestos o materiales aislantes, pero ya existen varias organizaciones nacionales e internacionales que intentan desarrollar pautas y pruebas para los aisladores compuestos. La mayoría de las pruebas de laboratorio existentes, son principalmente útiles para clasificar los materiales compuestos, estas pruebas incluyen cámaras de niebla salina, plano inclinado con contaminante sólido y pruebas de seguimiento.

M. Paredes-Olguín y colaboradores [37]. Detallan como la alta permitividad de los compuestos preparados con polvo de titanato de bario, dopado y funcionalizado se puede usar para controlar el campo eléctrico. Como alternativa al método capacitivo, se propone el control del campo eléctrico en las boquillas mediante el uso de materiales de alta κ (constante dieléctrica). Una aplicación de este material compuesto es la boquilla de los transformadores de instrumentos combinados (CIT), son una opción en subestaciones donde el espacio es un problema. Está bien sabido que en las boquillas el campo eléctrico aparece generalmente alrededor de la brida metálica y puede exceder el valor requerido para producir descargas superficiales y esto puede acelerar el envejecimiento de los aisladores poliméricos. El CIT es una de las técnicas más habituales para controlar el campo eléctrico en boquillas. Los aisladores de boquillas de cerámica son los más utilizados en transformadores de instrumentos, sin embargo, los aisladores de bujes de polímeros debido a las ventajas que presentan.

M. Deorsola [38]. Habla de cómo evaluar el estado de los aisladores retirados de servicio, considerando las sollicitaciones que sobre ellos actuaron, como el criterio de elección de los mismos para la zona de instalación y finalmente estudiar el desempeño de dichos aisladores a futuro bajo sollicitaciones similares. Primero se extraen muestras contaminadas de la superficie del aislador, se mide el equivalente de la cantidad de componente activo del contaminante. Esto significa que factores como la humidificación y el proceso de arco se excluyen como fuentes de fluctuación estadística en este método de medición de la severidad de la contaminación. Esta medida también aplica a los aisladores contaminados artificialmente, lo que permite establecer correlaciones entre pruebas de contaminación natural y artificial. Son 4 parámetros que se miden para los aisladores: como parámetro indicativo de la contaminación, es densidad de depósito de sal equivalente (Equivalent salt deposit density ESDD), el siguiente es densidad de depósito no soluble (Non-soluble deposit density NSDD), la dureza y la hidrofobicidad.

S. Ganga [39]. Presenta los resultados experimentales obtenidos del tracking y la erosión, en la prueba de resistencia de caucho de silicona en corriente directa (CD), expuesta también con radiaciones UV. Para las pruebas se utilizó Alúmina Trihidratada con 40%, 50% y 60% de relleno, ya que mejora la resistencia a la erosión del material polimérico. La solución contaminante para la prueba de plano inclinado fue 0.01% de cloruro de amonio con 0.02% de un ion no iónico, agente humectante Triton X que erradica la hidrofobicidad de la superficie de la muestra y

de esta manera se asegura un flujo suave y continuo. Para simular las radiaciones UV se utilizó una lámpara de marca OSRAM de 300 W de potencia, con una irradiancia de 72 W/ m².

El resultado de las pruebas se reportó que las muestras de 40% de relleno de Alúmina Trihidratada, perdieron el 50% del espesor inicial, para las muestras del 50% de relleno la profundidad de erosión es del 47% - 50% y para las muestras del 60% su masa erosionada fue alrededor de 36% - 44%, por lo tanto las muestras que perdieron menos masa fueron las que tienen mayor por ciento de relleno de Alúmina Trihidratada y también se concluyó que es correcto hacer la prueba de plano inclinado bajo expuestas con raciones UV.

M. Paredes-Olguín [40]. En este trabajo se estudió el efecto del polvo de BaTiO₃ (Titanato de Bario) dopado con Itrio (Y), que se usó como relleno en caucho de silicona. Los iones Y³⁺, rempazan los iones de Ba²⁺ en la red cristalina de BaTiO₃ en una concentración de 0.4%, usando un tratamiento térmico a 1300 °C durante una hora. La constante dieléctrica del polvo cerámico (K=692) es casi cinco veces mayor en comparación con la de BaTiO₃ puro (K= 154). Este polvo se incorporó a la matriz silicona en un 40% en volumen, obteniendo una buena dispersión, pero la constante dieléctrica del material compuesto no aumento mucho (K=10.61). Sin embargo, la conductividad eléctrica disminuye en comparación con el Titanato de Bario puro preparado en las mismas condiciones. Se realizaron simulaciones de campo eléctrico y bajo voltaje de impulso para una boquilla y un aislador de varilla larga. En este estudio se descubrió que la adición de 40% volumen de (Ba_{0.96}Y_{0.04}) TiO₃ promete ser una buena manera de aumentar más la permitividad relativa sin aumentar significativamente la conductividad de los compuestos.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIALES

En este capítulo se describen los materiales y equipos utilizados para la fabricación de los compósitos.

3.1.1 MATRIZ POLIMÉRICA

Los compósitos se preparan con hule silicón RTV-615 de dos partes. La parte A (RTV-A) corresponde al monómero y la parte B (RTV-B) al agente entrecruzante. Algunas de sus propiedades se enlistan en la Tabla 3.1. El silicón se obtuvo por el fabricante Momeptive, elastómero que vulcaniza a temperatura ambiente. Se utilizó hexano anhidro, 95%, fabricado por Sigma Aldrich, fue solvente para mejorar la dispersión de las partículas de BaTiO₃.

Tabla 3.1 Propiedades del silicón RTV-615

PROPIEDADES	VALORES
Densidad volumétrica (g/mm ³)	0.0102
Conductividad eléctrica (S/m)	5.5x10 ⁻⁶
Rigidez dieléctrica (KV/mm)	19.7
Constante dieléctrica	2.7
Coef. De expansión térmica (K ⁻¹)	27x10 ⁻⁵

3.1.2 Cerámicos para relleno

El polvo BaTiO₃ (ALDRICH 99.9% pureza, tamaño de partícula 0.8 μm), se funcionalizó con ácido esteárico CH₃(CH₂)₁₆CO₂H. Este polvo se utiliza como relleno en el hule silicón para hacer los compósitos. Como se ha demostrado en la literatura el AE eleva la K del sistema por ello fue el ácido elegido para elaborar los compósitos.

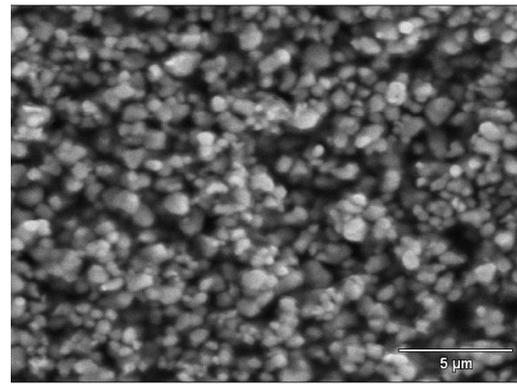
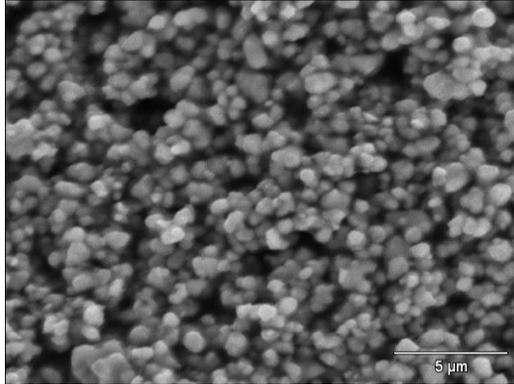


Figura 3.1 Micrografías de MEB, Partículas de BaTiO₃

En la Figura 3.1 son dos imágenes del polvo de BT, se utilizaron estas micrografías para poder sacar el tamaño de partícula promedio. Mediante el uso de 5 micrografías y el paquete de Excel se obtuvo la medición de 400 granos, para poder determinar el tamaño de grano promedio.

Tabla 3.2 Propiedades del BaTiO₃

PROPIEDADES	VALORES
Diámetro promedio de partícula	0.8 μm = 800 nm
Densidad	6.02 g/cm ³
Masa de partícula	1.6138x10 ⁻²² g
Área de partícula	2.29 x 10 ⁶ nm ²
Volumen partícula	5.0965x10 ⁷ nm ³

3.1.3 Propiedades del ácido esteárico (surfactante)

El ácido esteárico es también llamado ácido octadecanoico, es un ácido orgánico de 18 átomos de carbono, presente en aceites, grasas animales y vegetales.

Se ha reportado en la literatura que la modificación de la superficie de BaTiO₃ mediante ácido esteárico, permite obtener compósitos con una dispersión más homogénea y K mayor sin incrementar la conductividad eléctrica [41].

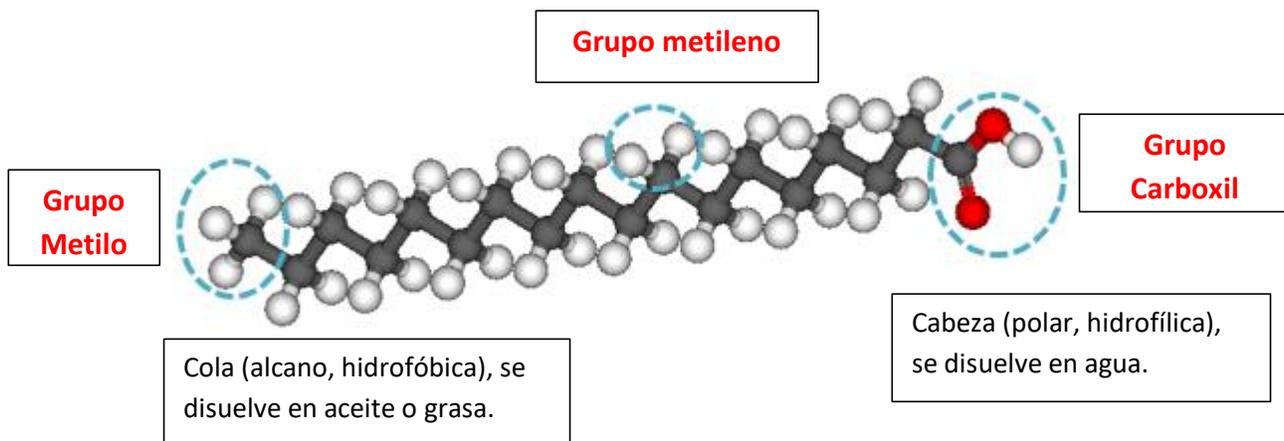


Figura 3.2 Ácido esteárico [41].

En la Figura 3.2 se observa la cadena del ácido esteárico, el cual es insoluble en agua, soluble en compuestos apolares (etil acetato, etanol, acetona y metanol), es un ácido graso saturado (no hay enlaces dobles entre los átomos de carbono vecinos), esto hace que la cadena pueda flexionarse.

Tabla 3.3 Propiedades del ácido esteárico

PROPIEDADES	VALORES
Masa molar	284.48 g/mol
Densidad	0.847 g/cm ³
Punto de fusión	69.6°C
Punto de ebullición	383 °C

3.2 CÁLCULOS PARA DETERMINAR LAS CANTIDADES DE RELLENO Y SURFACTANTE A UTILIZAR

A continuación, se describe el procedimiento para elaborar los compósitos hule silicón-BT.

El procedimiento comienza con la funcionalización de las partículas con ácido esteárico. Con este propósito se calcula la cantidad de surfactante que recubrirá completamente, con una monocapa la superficie de las partículas de BT. Los parámetros utilizados son los siguientes:

- Diámetro promedio de partícula de BT: $0.8 \mu\text{m} = 0.8 \times 10^{-6} = 800 \text{ nm}$, por lo tanto, el radio es: $r = 0.4 \mu\text{m} = 400 \text{ nm}$
- Área de partícula de BT: $4\pi r^2 = 4 \pi (400 \text{ nm})^2 = 2010619.298 \text{ nm}^2$
- Área de contacto de la molécula de ácido esteárico = 0.2087 nm^2
- La masa, volumen y la densidad de la partícula de BaTiO_3

$$V_{\text{partícula}} = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi (400)^3 = 268082573.1 \text{ nm}^3$$

$$\text{Densidad (P) del BT} = 6.02 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}\right)^3 \left(\frac{1 \times 10^{-9} \text{ m}}{1 \text{ nm}}\right)^3 = 6.02 \times 10^{-21} \text{ g/nm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Masa de partícula de BT} &= (6.02 \times 10^{-21} \text{ g/nm}^3) (268082573.1 \text{ nm}^3) \\ &= 1.61385709 \times 10^{-12} \text{ g} \end{aligned}$$

- Para obtener la masa de BT que se van a pesar, se requiere saber el volumen del recipiente, en este caso es de 30 cm^3

Por ejemplo: Volumen del BT para el 10% en volumen

$V_{\text{BT}} = 30 \text{ cm}^3(10\%) / 100 = 3 \text{ cm}^3$ de igual manera para los demás porcentajes, que corresponden a los compósitos de 0,5,10,15,20 y 25 % en volumen de BT.

- Por lo tanto, la masa de BT es:

$$\text{Masa}_{\text{BT}} = 3 \text{ cm}^3 (6.02 \text{ g/cm}^3) = 18.06 \text{ g}$$

Tabla 3.4 Masas de BaTiO₃, para los compósitos

% Peso BT	Masa de BT
5 %	9.03g
10%	18.06g
15%	27.09g
20%	36.16g
25%	45.15g

- Número de partículas de BT

$$N_{\text{BT}} = \frac{\text{masa total de BT}}{\text{masa partícula BT}} = \frac{18.06\text{g}}{1.61385709 \times 10^{-12}\text{g}} = 1.119097782 \times 10^{13} \text{ partículas de BT}$$

- Cálculo de moléculas de Ácido esteárico que se necesitan para recubrir todas las partículas de BT

$$N = \frac{\text{área de partícula de BT}}{\text{área de contacto de ácido esteárico}} = \frac{2010619.298 \text{ nm}^2}{0.2087 \text{ nm}^2} = 9634016.762$$

Moléculas de AE sobre cada
partícula de BT

$N_{\text{total de ácido esteárico}} =$

(Número de partículas de BT) (Número de moléculas de AE)

$$= (1.119097782 \times 10^{13}) (9634016.762) = 1.078140679 \times 10^{20}$$

Número total de moléculas de AE

- Masa de Ácido esteárico

Tabla 3.5 Masas de ácido esteárico para los compósitos

%Peso de BaTiO₃	Masa de ácido esteárico
5 %	0.0106 g
10%	0.0212g
15%	0.0318g
20%	0.0424g
25%	0.0531g

Numerosas investigaciones han explorado la adición de rellenos nano y micrométricos a materiales dieléctricos sólidos para formar compósitos aplicados a aislamiento eléctrico de alta tensión. El objetivo de utilizar elastómeros de silicón en aplicaciones en alta tensión al aire libre es reducir los esfuerzos eléctricos en la superficie a un nivel de descarga parcial o el arco de banda seca no se produzca.

En la Tabla 3.5 se tiene la cantidad de masa ácido esteárico que se va agregar a lo compósitos, como ya se mencionó este ácido es un agente surfactante, ya que ayuda a la reducción de aglomeración y esto permite una mejor dispersión de los rellenos. Cuando se añade a una mezcla heterogénea y a una concentración baja, cambia las propiedades de la superficie o de la interfaz mediante la reducción de la energía superficial o la tensión interfacial [41].

3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA FUNCIONALIZACIÓN DEL BaTiO₃ CON EL ÁCIDO ESTEÁRICO

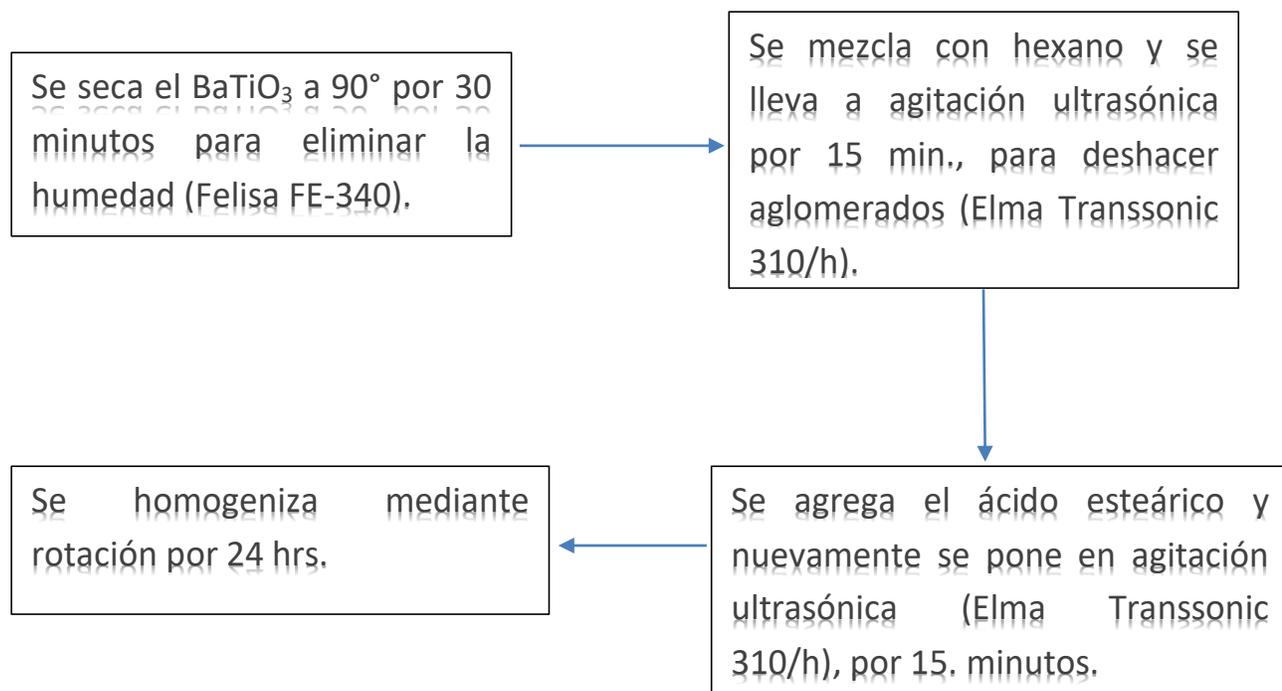


Figura 3.3 Procedimiento para la funcionalización del BaTiO₃

El proceso de secado se lleva a cabo para quitarle un poco de humedad que pueda traer el polvo, ya que debido a que se guardan por tiempos prolongados en el almacén, esto puede provocar que acumule humedad. Se elige el hexano como solvente, debido a que no es polar y de esta manera no reacciona con el titanato de bario y ácido esteárico.

La agitación ultrasónica se realiza para que las partículas se dispersen, es decir no se formen aglomerados en la mezcla.

3.4 PREPARACIÓN DEL COMPÓSITO

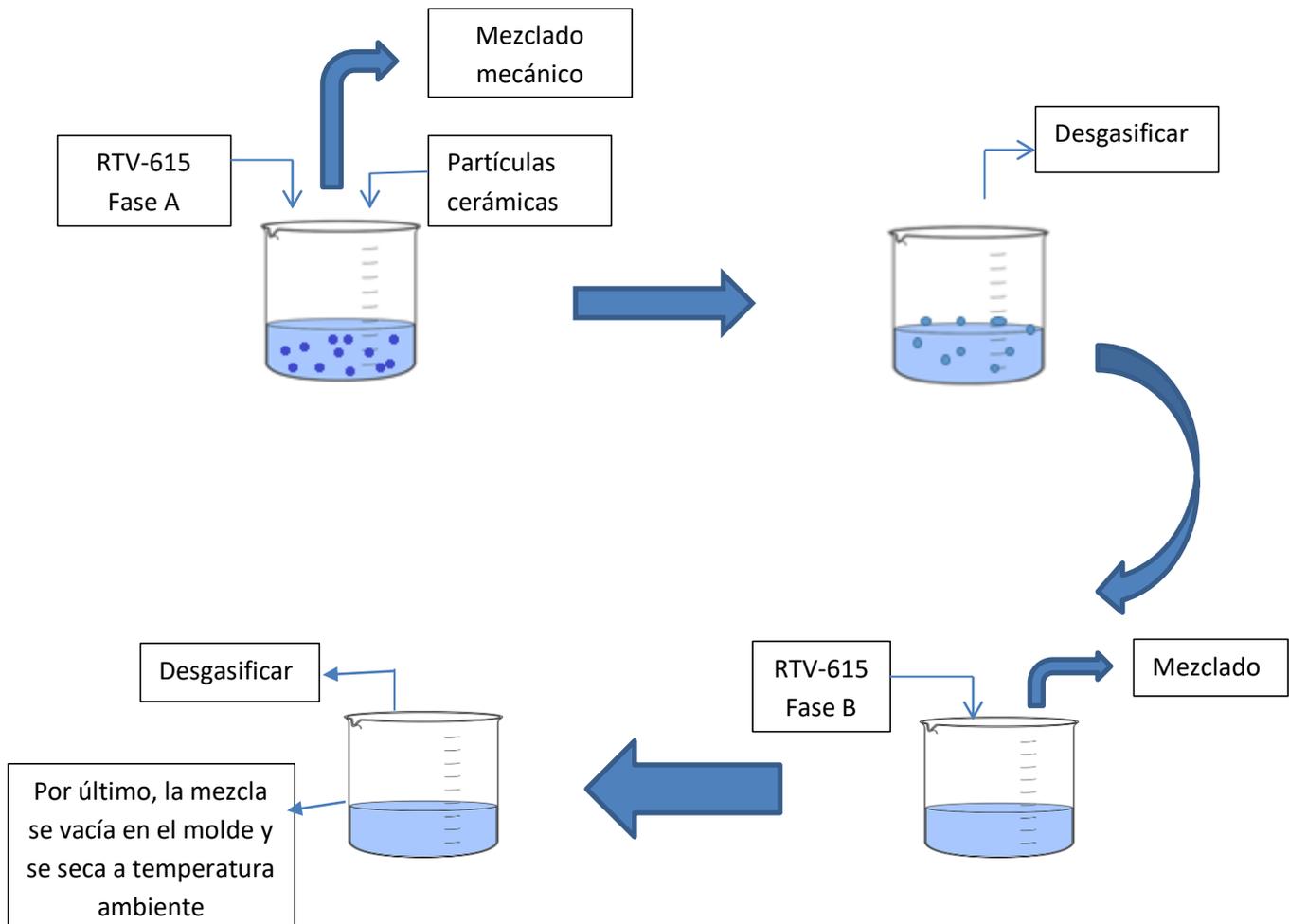


Figura 3.4 Procedimiento para elaborar los compósitos

Estas son las características de elaboración, una vez obtenidos los compósitos:

1.- Mezclado de partículas cerámicas y RTV-615 Fase A

Temperatura 25°C

Agitador vertical (mezclador) RW20 DZM JANKE & KUNKEL

Velocidad: 2914 rev/min

Tiempo de mezclado 15 a 20 minutos

2.- Desgasificado

Temperatura 25 °C

Bomba de vacío FELI WELCH 1400

Tiempo de desgasificación aproximadamente 10 min

3.- Mezclado de partículas cerámicas y RTV-615 Fase B

Temperatura 25 °C

Agitador vertical (mezclador) RW20 DZM JANKE & KUNKEL

Velocidad: 2914 rev/min

Tiempo de mezclado 5 minutos

4.- Desgasificado

Temperatura 25 °C

Bomba de vacío FELI WELCH 1400

Tiempo de desgasificación 5 minutos

5.- Vaciado al molde

Temperatura a 25 °C

3.5 Fabricación de silicones con diferentes pesos moleculares

A continuación, se presenta la metodología para fabricar láminas de silicón con diferentes pesos moleculares, que se realizaron para medir también sus propiedades dieléctricas.

Los materiales para hacer nuestras películas son los siguientes:

- TEOS (Tetraetilortosilicato), marca Aldrich 98% grado reactivo, es un compuesto químico con la fórmula $\text{SiC}_8\text{H}_{20}\text{O}_4$.
- PDMS (polidimetilsiloxano), marca Aldrich, generalmente inerte, inocuo y no inflamable.

- HCl (ácido clorhídrico), marca Ferm.nt, es una disolución acuosa del gas cloruro de hidrógeno, es muy corrosivo.
- C_3H_8O (Alcohol isopropílico), marca Ferm.nt.

Para 25mL de la solución, necesitamos las siguientes cantidades:

11.16 mL de PDMS, 4.97 mL TEOS, 0.53 ml de HCl, 7.47 de alcohol, 0.84 de H_2O desionizada. Para fabricar láminas de diferentes pesos moleculares, se usó, PDMS de varias viscosidades: de 25 Cst, 60 Cst, 65 Cst, 90-150 Cst.



Figura 3.5 Material para realizar las láminas de sol-gel

3.5.1 Elaboración de láminas de silicón de diferentes pesos moleculares

- 1.- Se hicieron los cálculos necesarios para la preparación de las películas.
- 2.- Para la preparación del PDMS se requiere 3 soluciones, a continuación, se enlistan:

Solución 1= TEOS + PDMS + 2 partes de alcohol isopropílico

Solución 2= H_2O + alcohol isopropílico

Solución 3= HCl + alcohol isopropílico

- 3.- Se prepara la primera solución utilizando pipetas graduadas para la extracción de los líquidos y se colocan en un matraz para ponerlos en una parrilla a $90^{\circ}C$, por 15 o 20 minutos.

4.- La segunda solución al igual que la primera no requiere ningún orden en específico, se coloca en un matraz las soluciones y también se pone en la parrilla con agitador magnético por 15 min a 90°C.

5.- Posteriormente la solución dos se vacía a la solución uno, una vez que hayan transcurrido el tiempo correspondiente de cada matraz.

6.- Se prepara la tercera solución bajo una campana de extracción, adicionando el alcohol primero y después el HCl, se deja 15 minutos en la parrilla, igual a una temperatura de 90°C, con agitador magnético.

7.- Se adiciona la tercera solución a la primera solución lentamente, procurando un flujo constante, se tapa el matraz y se deja una hora en la parrilla a la misma temperatura con una velocidad de 200 rpm.

8.- Transcurrido el tiempo, se procede a vaciar la solución de PDMS en los moldes.

9.- La polimerización se da en un lapso de tres a cuatro semanas, en el caso del PDMS de mayor viscosidad tarda un poco más y el volumen final será menor al original.

El proceso sol-gel permite la fabricación de materiales amorfos y policristalinos con características especiales en su composición y propiedades. Su utilidad radica en que necesita menor temperatura en comparación con los métodos tradicionales de fabricación de vidrios por fusión. El sol-gel es una ruta química que inicia con la síntesis de una suspensión coloidal de partículas sólidas o cúmulos en un líquido (sol) y la hidrólisis y condensación de éste sol para formar un material sólido lleno de solvente (gel). El solvente se le extrae al gel simplemente dejándolo reposar a temperatura ambiente durante un periodo de tiempo llamado envejecimiento, en el cual el gel se encogerá expulsando el solvente y agua residual



En el matraz de fondo se adiciona: dos partes de isopropanol (3.73 mL), 11.16 ml de PDMS y 4.97 ml de TEOS, se coloca en una parrilla a 90°C, durante 15 minutos. Este es el matraz uno donde se va ir adicionando los siguientes pasos.



En el matraz dos se vierte 1.86 ml de alcohol y 0.84 mL de agua desionizada, se deja 15 minutos en la parrilla también a 90°C y posteriormente se vacía al primer matraz.



En el tercer y último matraz se pone 1.86 mL de alcohol isopropílico y 0.53 de ácido clorhídrico, se deja 15 min. en la parrilla y se vacía al primer matraz y una vez que ya están todas las soluciones en primer matraz se deja una hora en la parrilla y por último se vacía en el molde.

Figura 3.6 Procedimiento de la fabricación de láminas de silicón

3. 6 Caracterización

3.6.1 Caracterización estructural y microestructural

En espectroscopia infrarroja vamos a identificar los picos de la matriz polimérica y del BT. Este equipo permite la identificación de grupos funcionales de materiales orgánicos, pinturas y determinadas estructuras de muestras sólidas y líquidas. Para esta prueba se utilizó el infrarrojo medio, aproximadamente $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ($2.5-25\mu\text{m}$), en esta región se estudia las vibraciones fundamentales y la estructura rotacional vibratoria asociada. Se utilizó un equipo Modulo FTIR IlliminatIR, modelo IR2, Marca Smiths Detection, Objetivo de ATR de 36x con cristal diamante.

La prueba de ángulo de contacto consiste en depositar suavemente una gota de agua sobre la superficie de las piezas. Se toma una fotografía y sobre la fotografía se mide el llamado ángulo de contacto que es el ángulo entre la superficie y la gota de agua adyacente, tal como se ve en la Figura 3.7. Se utilizó el programa de análisis de imágenes, imageJ, para medir el ángulo. Si la superficie del sólido es hidrófoba, el ángulo de contacto será mayor de 90° , en este tipo de superficies el ángulo puede ser mayor a 150° , incluso llega a ser cercano de 180° . En estos casos el agua reposa sobre la superficie, no la moja ni tampoco se extiende sobre ella.

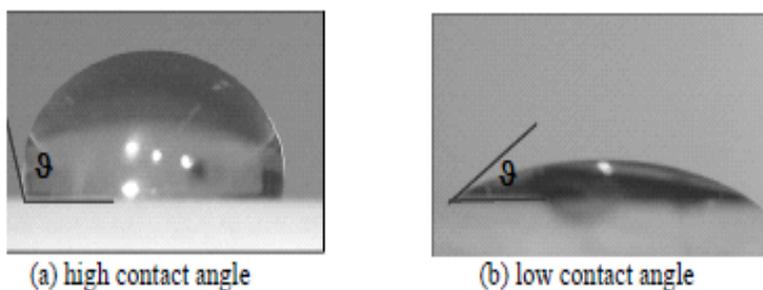


Figura 3.7 Dos ejemplos extremos de ángulo de contacto [30].

3.6.2 Caracterización Eléctrica

Para realizar estas mediciones se utilizaron tanto muestras de silicón puro como compósitos de forma circular de un diámetro de 5.4 cm y un espesor de aproximadamente de 2.91 mm.

La constante dieléctrica se puede despejar una vez que se mide experimentalmente la capacitancia de la pieza, a través de la ecuación:

$$C = \epsilon_0 K \frac{A}{d} \longrightarrow K = \frac{C d}{\epsilon_0 A} \quad (4)$$

Donde:

C= capacitancia ($\frac{C}{V}$)

ϵ_0 = permitividad del vacío ($8.85418 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N.m^2}$)

A= área de las placas (m^2)

d= Distancia entre las placas o espesor (m)

Se mantuvo la señal de la prueba a 1 kHz, a una temperatura de 25°C y se aplicó a todas las muestras de compósitos disponibles y láminas de sol-gel.

Para medir la capacitancia se utilizó el arreglo que se ve en la Figura 3.8 y el uso de un equipo RLC, Dual Display LCR Meter, marca ESCORT, ELC-3133.

Las muestras de $BaTiO_3$ y las láminas de silicón se colocaron entre el par de electrodos paralelos de caras planas del arreglo como se observa en la Figura 3.8. Se midió el espesor de cada muestra para la prueba, ya que se va a medir la capacitancia para obtener la constante dieléctrica y también se mide el ángulo para calcular la pérdida dieléctrica.



Figura 3.8 Arreglo para la medición, Puente RLC

En el equipo RLC se aplica un voltaje senoidal que tiene una frecuencia de 1 kHz. El equipo mide la corriente de un circuito donde participa la muestra y mide el ángulo de desfase entre la señal del voltaje y la corriente llamada θ . Si el capacitor es perfecto, $\theta=90^\circ$. La pérdida dieléctrica es proporcional a $\tan \delta$, donde $\delta= 90-\theta$. La pérdida dieléctrica representa la energía aplicada por el equipo que polariza, que no se utilizó en polarizar el material, es decir que se desperdició en otra cosa típicamente en producir calor.

3.6.3 PLANO INCLINADO

Esta prueba se basa en la norma ASTM-D2303-13, en la Figura 3.9 se muestra el arreglo experimental.

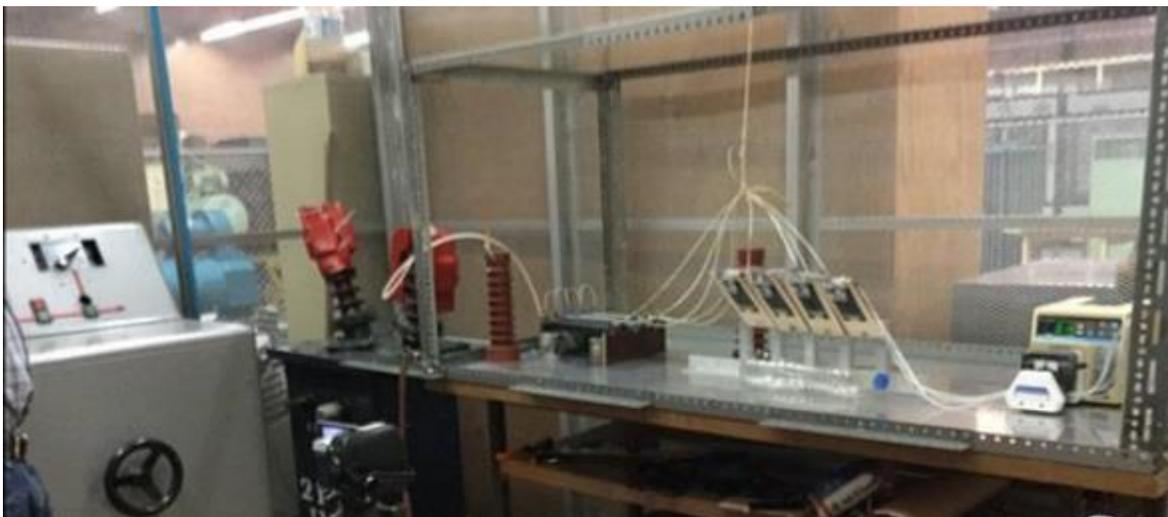


Figura 3.9 Prueba de plano inclinado

La prueba de plano inclinado fue propuesta por Mathes y Gowan en 1961 y fue estandarizada como la ASTM D2303 en 1964. El método del plano inclinado es una de las pocas pruebas que muestran la resistencia de los materiales aislantes sólidos a la erosión y a la formación de trayectorias carbonizadas, causadas por descargas superficiales [40]. El arreglo mostrado en la figura 3.9 fue implementado en el laboratorio de alta tensión de la ESIME Zacatenco. Las fuentes de alto voltaje de corriente alterna y corriente directa, tiene las características mencionadas en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Características del equipo de plano inclinado.

Tensión	Equipo de alimentación	Características
Corriente Alterna	Transformador	Marca New Line Potencial Nominal: 10 kVA Altitud de operación: 3000 msnm Frecuencia de operación: 60 Hz Tensión de entrada: 127 Vrms Tensión de salida: 7500 Vrms Corriente de entrada: 79 A Corriente de salida: 1.39 A
Corriente Directa	Fuente conmutada de alta tensión de CD	Marca: ATDK-Lambda Americas Inc Modelo: series 202 ^a Potencia Nominal: 10 kVA Tensión de entrada: 127 Vrms Tensión de salida: 10000 V, polaridad positiva Corriente de salida: 200 mA

La muestra se fija en un ángulo de 45° y una solución salina compuesto de 0.1% (en peso) de cloruro de sodio grado reactivo y de 0.02 de agente humectante no iónico en 8 pulgadas de agua destilada. Esta solución simula un líquido contaminante que fluye a través de la superficie inferior de la muestra de prueba mientras se aplica un voltaje, ya sea corriente directa o alterna.

La prueba debe tener una tensión constante durante 6 horas.

La tensión se incrementa 250 V por cada hora transcurrida.

Se considera que la muestra pasa la prueba cuando después de 6 horas, el deterioro o carbonización entre los electrodos es menor de 25 mm.

Cuando se aplica tensión y un flujo de líquido contaminante, se forma una banda seca y las descargas eléctricas aparecen, típicamente en el electrodo inferior. Esta actividad de descarga localizada y persistente eleva la temperatura y provoca la degradación del material [42].

El contaminante líquido se suministra por medio de una bomba peristáltica (bomba dosificadora), la cual bombea este líquido con un flujo determinado sobre la muestra polimérica, la muestra se coloca a 45°, de tal manera que las descargas eléctricas se mantengan constantes durante el transcurso de la prueba.

Un esquema del equipo se muestra en la Figura 3.10.

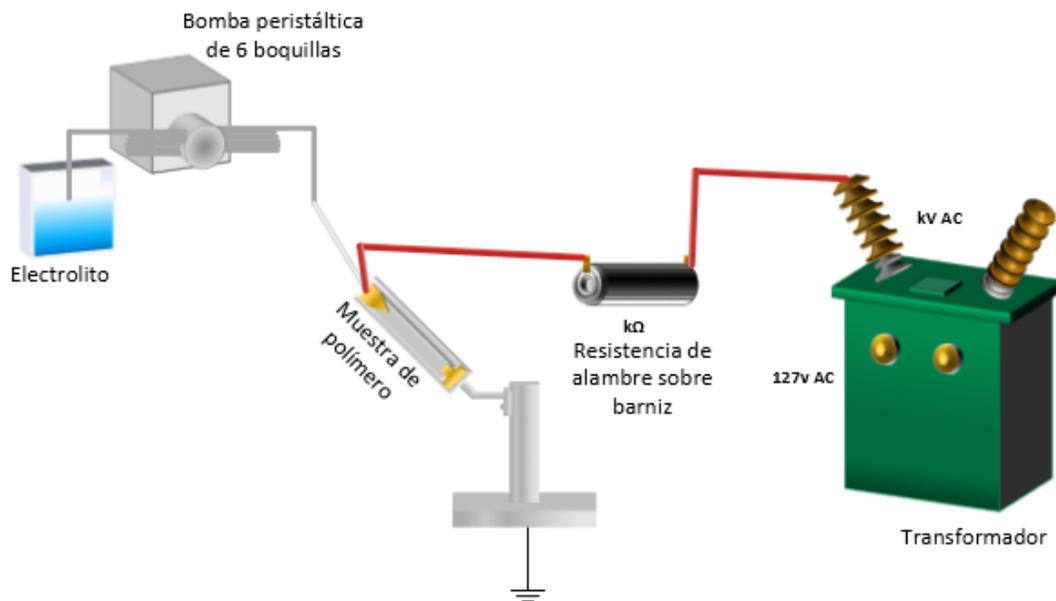


Figura 3.10 Diagrama general de la prueba de plano inclinado[42].

3.6.4 MUESTRAS POLIMÉRICAS PARA LA PRUEBA DE PLANO INCLINADO

Las muestras de polímero para la prueba deben tener una superficie plana de aproximadamente de 120x50x6 mm y éstas deben tener un espesor de entre 6.35 y 12.7 mm como se muestra en la Figura 3.11.

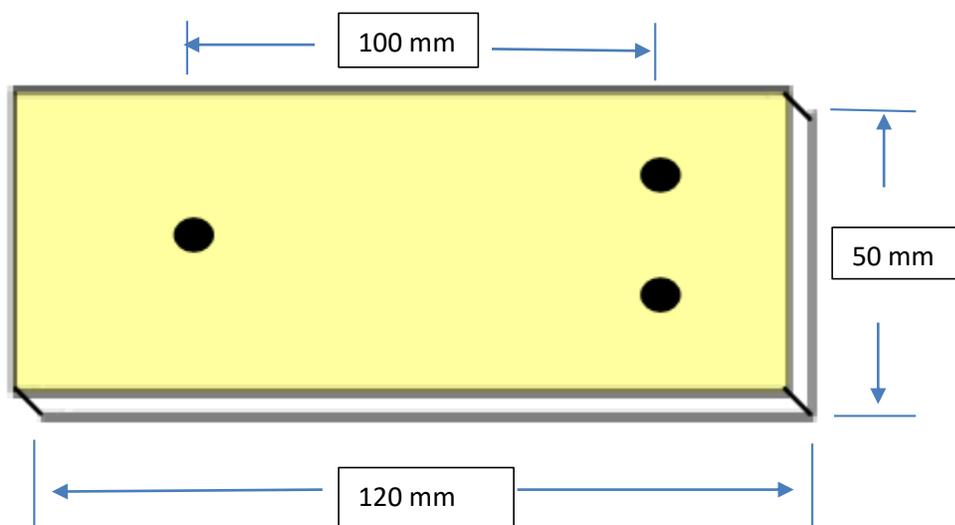


Figura 3.11 Medidas de las muestra poliméricas

Procedimiento que se siguió para la prueba de plano inclinado:

- 1.- Pesado de las muestras de compuesto polimérico.
2. Identificación y montaje de las muestras.
3. La solución contaminante consta 0.1% en peso de cloruro de sodio grado reactivo y de 0.02 de agente humectante no iónico en 8 pulgadas de agua destilada. Esta solución contaminante debe tener una conductividad de 0.25 ± 0.06 [mS]. Esta solución se preparó para la prueba de corriente alterna.

4. Para la elaboración de la solución contaminante para la prueba de corriente directa se prepararon 4 litros de solución contaminante, de acuerdo con lo establecido en la norma NBR 10296. Para esto se utilizó 4.0 g NH_4Cl (cloruro de amonio) y 8.0 g de Triton X-100 como agente humectante no iónico disuelto en agua desionizada. La solución debe tener una conductividad de $3.95 \pm 0.5 \Omega \cdot \text{m}$.
5. Se verificó que el flujo de la solución contaminante fuera constante y de un valor de 0.15 ml/min para tensiones de 2.5 kV.
6. Se aplicó el primer nivel de tensión de 2.5 kV, durante una hora y se fue incrementando a 0.5 kV por cada hora transcurrida, la prueba se detiene una vez que hayan fallado todas las muestras o se haya cumplido las 6 horas transcurridas que indica la norma.
7. Se pesaron las muestras para determinar la cantidad de masa de pérdida por erosión debido a las descargas superficiales.

Esta prueba se llevó a temperatura ambiente.

Para establecer los criterios de que las muestras deben ser retiradas de la prueba, debemos basarnos en dos criterios:

- Si la erosión se propaga 2.5 mm en la superficie de la muestra.
- Cuando la erosión se va haciendo en el interior de la muestra, debemos retirarla antes de que perfora la muestra. Debe tener una profundidad de 3mm para poderla retirar.

3.6.5 PRUEBAS DE RESISTIVIDAD

En esta prueba se ocupó el equipo de High Voltage Amplifier de la empresa Radiant Technologies Inc., a continuación se muestra en la Figura 3.12.



Figura 3.12 Amplificador de alto voltaje [43]



Figura 3.13 Arreglo experimental, amplificador de alto voltaje

En esta prueba se les aplicó alto voltaje a todas las muestras circulares tanto las de sol-gel, como los compósitos de BaTiO_3 . Nuevamente utilizamos el arreglo de placas paralelas para colocar las muestras en medio de los electrodos y de esta manera aplicar el voltaje. Se aplicaron diferentes voltajes pero se decidió trabajar con el más alto que fue de 4000 V. Se observa en la Figura 3.13 el arreglo experimental. Con esta prueba se obtuvo las gráficas de resistividad.

Características del amplificador de alto voltaje

Tabla 3.7 Características del amplificador de alto voltaje.

Canales	HVI – 1 Channel
Tensión nominal máxima	4 kV (AC)
Power	100 – 240 Vac, 47 – 63 Hz
Voltaje de disparo d corriente de protección de alta velocidad	10 amps
Voltaje de disparo de protección de alta velocidad	2.1 V
Tiempo de retardo de protección de baja velocidad	17 ms
Relé de aislamiento de voltaje conmutable	15 kV
Clasificación de aislamiento internacional	>20kV DC

El HVI tiene dos funciones principales, primero actúa como un enrutador de señal, enviando voltajes de estimulación desde el probador al HVA, mientras conecta la salida del HVA a la muestra. La señal de retorno de la muestra también se enruta a través del HVI, en su camino de regreso al probador para su análisis.

La segunda función principal del HVI es proporcionar protección al usuario contra altos voltajes presentes durante las pruebas. La clasificación de voltaje máximo para precisión del HVI es 4 Kv. Todos los cables de alta tensión internos del sistema tienen aislamiento, con una especificación de ruptura superior a 20 Kv. Cuando no se realiza una prueba, las salidas de DRIVE y RETURN de alta tensión de precisión del HVI se desconectan del HVA y se conectan directamente a tierra.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Piezas

En la Figura 4.1 se muestra la apariencia de las muestras de silicón puro en donde se cambió el peso molecular. Como se puede observar, estas muestras les quedó un poco de aire, en la figura se alcanza a ver las burbujas internas.



Figura 4.1 Láminas de sol-gel de diferentes viscosidades

En la Figura 4.2 se muestran las piezas de compósitos donde el relleno es BT, como se puede ver estas muestras son blancas y opacas.



Figura 4.2 Compósitos de hule silicón con diferente contenido de BaTiO_3

4.2 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

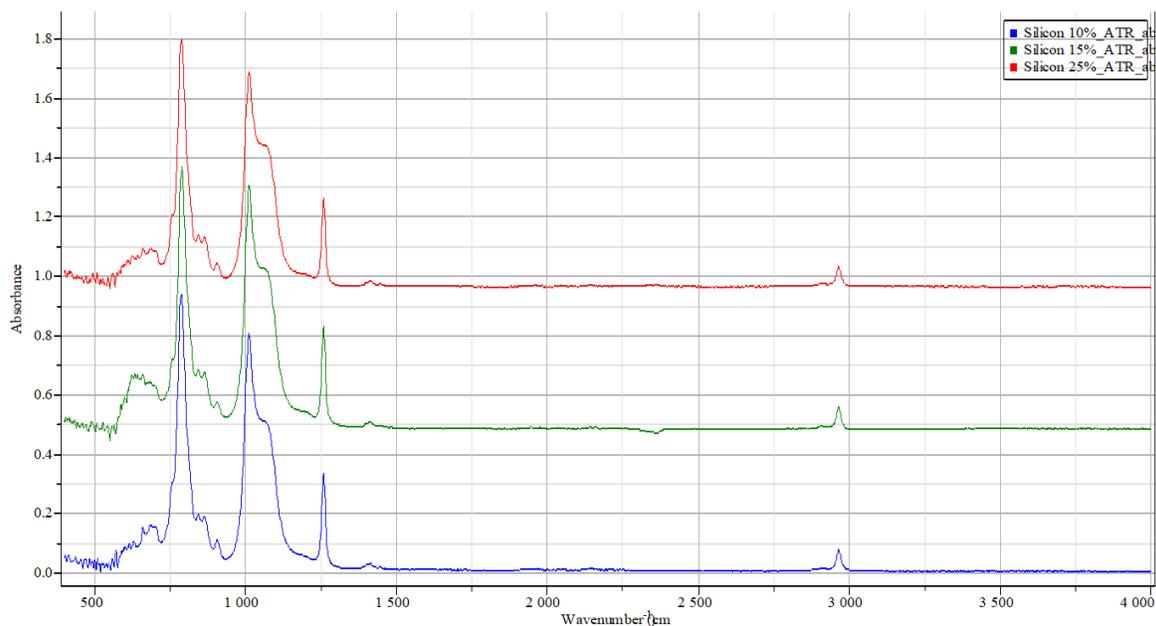


Figura 4.3 Espectro infrarojo de los compósitos de BaTiO₃

En la Figura 4.3 se presenta los espectros IR de absorción para compósitos de diferentes contenidos de BT. Los picos que se observan en la figura corresponden al hule silicón [1]. Los picos correspondientes al BT y al ácido esteárico no se observan probablemente porque estos se encuentran en baja concentración

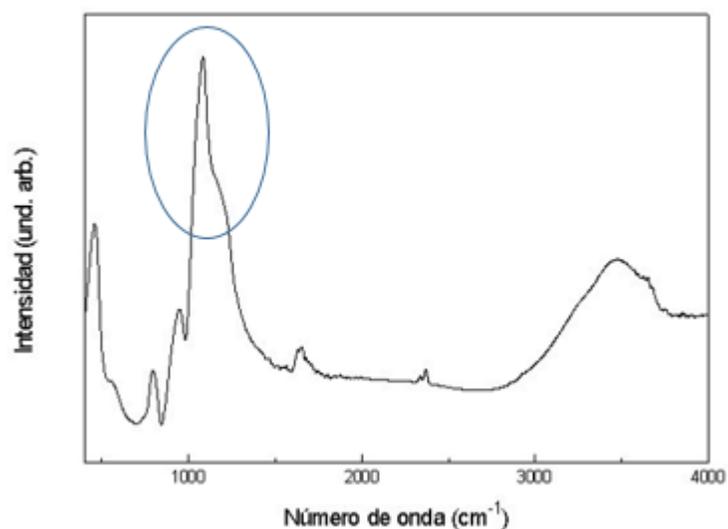
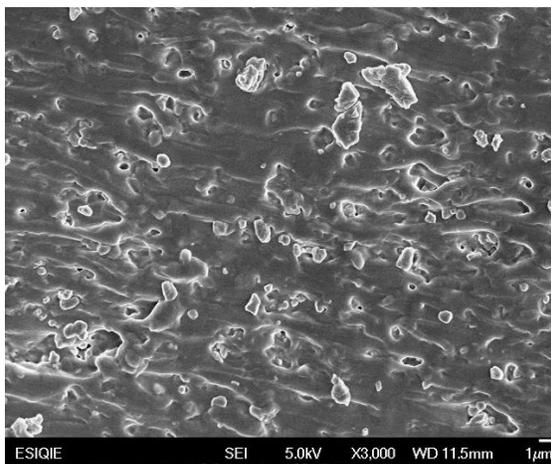


Figura 4.4 Espectro infrarrojo del hule silicón [1]

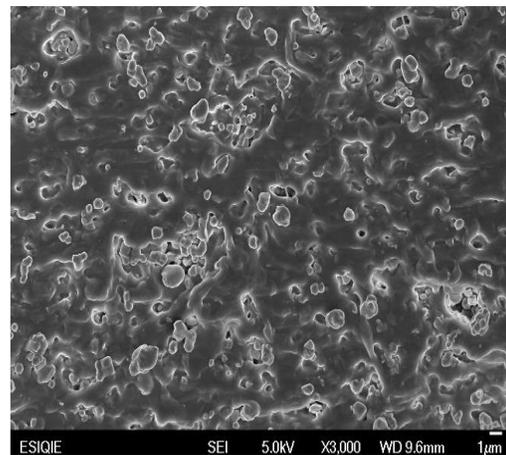
En la Figura 4.4 se observa el espectro infrarrojo del hule silicon, el cual es muy parecido al espectro de los compósitos de BT.

4.3 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

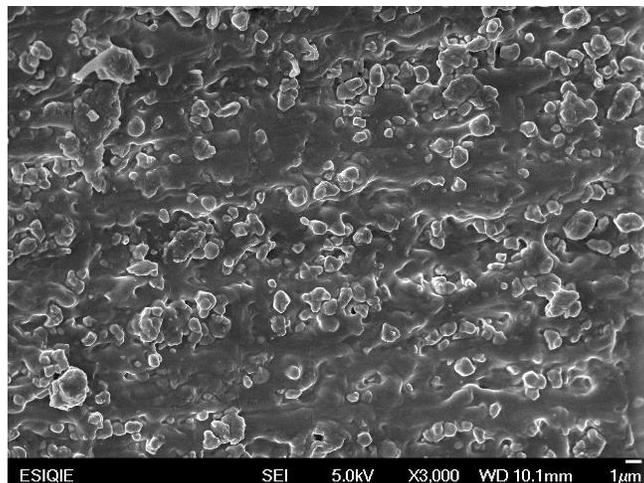
En la Figura 4.4 se presentan micrografías de hule silicon con diversos contenidos de BT. Como se observa en la superficie se ve que algunos poros prevalecieron a pesar de la extracción de aire que se hizo durante el entrecruzado. También se observa que aparentemente la rugosidad de la superficie se incrementa como se incrementa el contenido de BT.



a) 10%



b) 20%



c) 25%

Figura 4.5 Micrografías con aumento de sección transversal de la muestra.

En estas imágenes de MEB del compuesto, se puede observar que hay relativamente una buena dispersión de partículas de BaTiO₃.

4.4 ÁNGULO DE CONTACTO

En la Tabla 4.1 se muestran los valores de ángulo de contacto promedio para cada contenido de BT. Como se puede ver el ángulo de contacto es cercano a los 90°, lo que significa que la superficie del compuesto es hidrofóbica. En la Figura 4.6 se muestra la imagen típica de una gota sobre la superficie de uno de los compósitos.

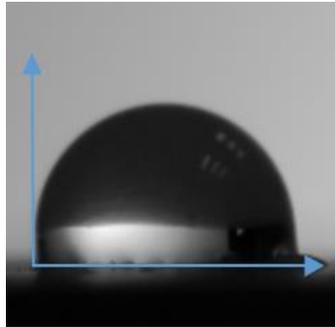


Figura 4.6 Imagen típica de la gota de agua sobre la muestra de compuesto. En este caso, la foto corresponde a la muestra de 20% peso de BT

Tabla 4.1 Ángulo de contacto de los compósitos arriba mencionados

Muestra en % BT	Ángulo de contacto
10%	89.64°
15%	89.6°
20%	89.66°
25%	89.64°

Cuando un material es altamente hidrofóbico las moléculas de agua forman pequeñas gotas en la superficie del aislamiento con ángulos de contacto elevados. A medida que el material polimérico envejece, el grado de hidrofobicidad disminuye y el material se vuelve hidrófilo en la naturaleza, de manera que esto significa que ahora se formarán gotas de agua de ángulo de contacto bajo, lo que puede conducir flujo de corriente en la superficie del aislamiento.

4.5 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE SILICONES DE DIFERENTES PESOS MOLECULARES

A continuación se presentan gráficas de resistividad, constante dieléctrica y pérdida dieléctrica de los silicones puros con diferente peso molecular. Lo que se presenta en el eje horizontal son las viscosidades de los precursores. Asumiendo que entre mayor sea la viscosidad, mayor será el peso molecular del polímero resultante.

La Figura 4.7 sugiere que entre mayor es el peso molecular, menor es la resistividad. En los polímeros lineales, como es el PDMS, la conducción se realiza a lo largo de la cadena principal, pero cuando los portadores de carga alcanzan un extremo del polímero “saltan” al polímero que sigue. Este espacio entre cadena y cadena representa una barrera de potencial lo que a nivel macro significa un punto que ofrece resistencia al paso de corriente. Si las cadenas poliméricas son de bajo peso molecular, el número de barreras de potencial entre cadenas aumenta por lo que la resistividad total aumentará.

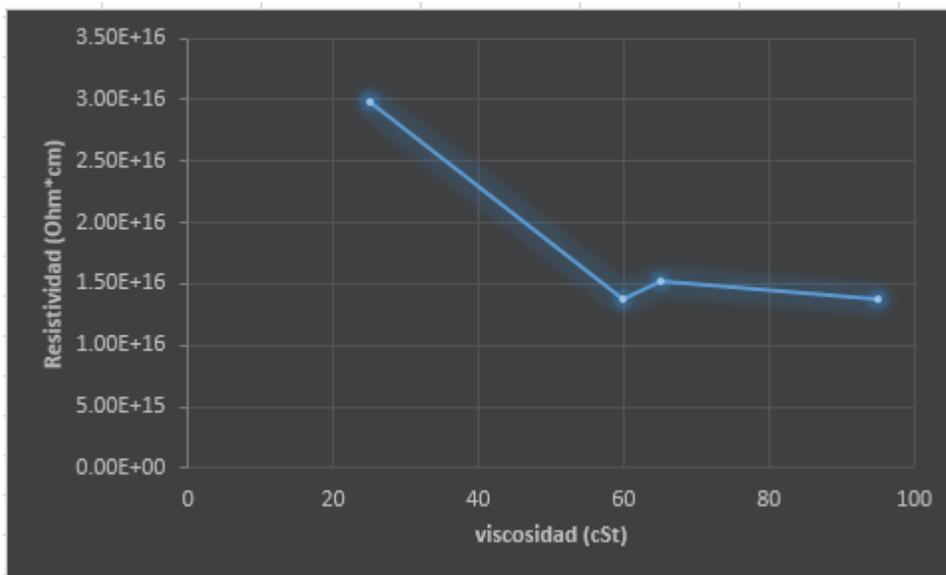


Figura 4.7 Gráfica de viscosidad vs resistividad de láminas de silicón

Podemos ver que hay un paralelismo entre gráfica en la figura 4.8 y de la figura 4.9, lo que sugiere que la fuente de polarización son los portadores de carga, que en este caso deben ser electrones y huecos. Estas entidades son fáciles de polarizar por lo que entre más baja la resistividad (figura 4.7), mayor el número de

portadores de carga y mayor será la constante dieléctrica. Sin embargo los portadores de carga también impiden que las cargas estáticas permanezcan en el tiempo por lo que estas corrientes representan una pérdida dieléctrica.

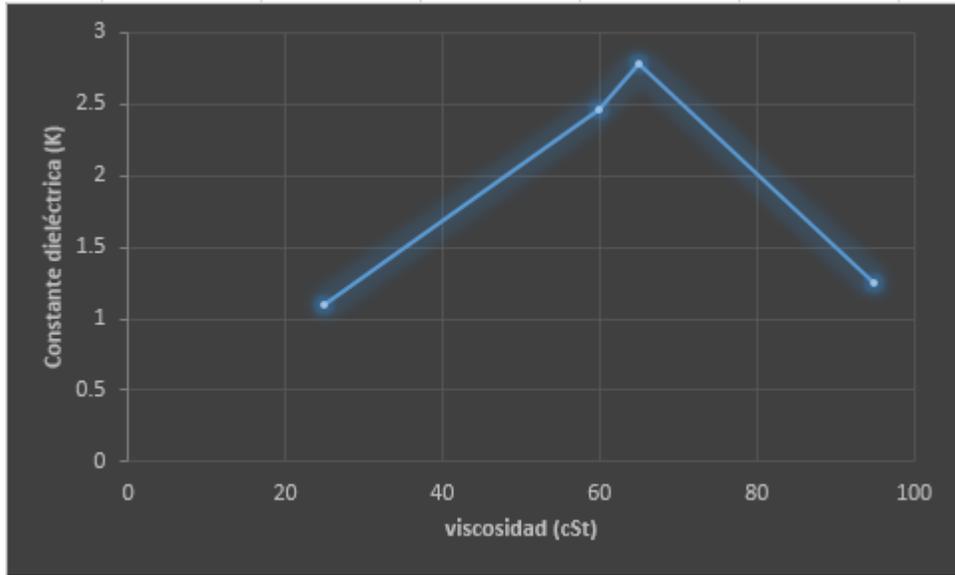


Figura 4.8 Gráfica de viscosidad vs constante dieléctrica de láminas de silicón

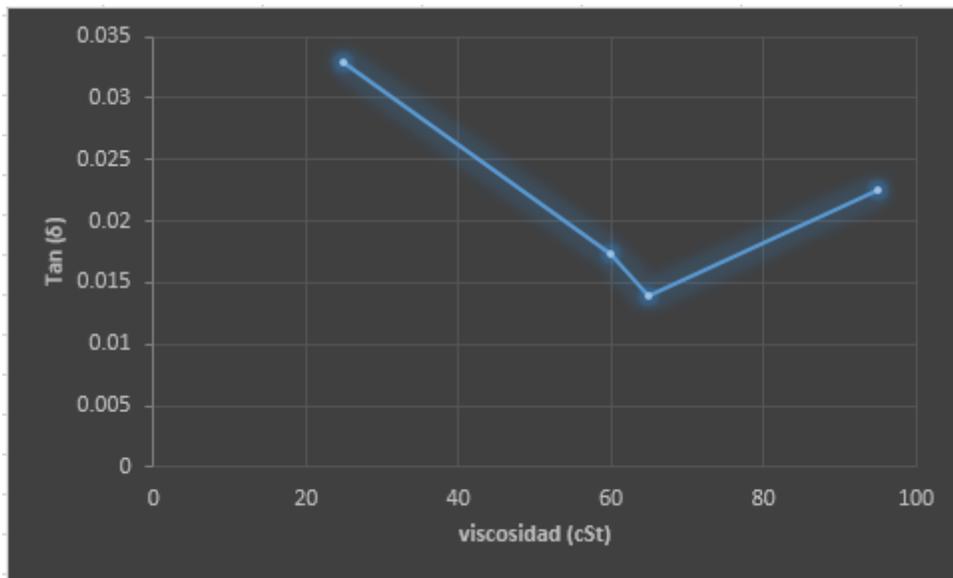


Figura 4.9 Gráfica de viscosidad vs pérdida dieléctrica de láminas de silicón

Los valores de constante dieléctrica (menores de 3) son los típicos para materiales covalentes y los valores de pérdida dieléctrica obtenidos y graficados en la figura

4.9 se consideran pequeños y están en el rango de valores comúnmente observado.

4.6 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE COMPÓSITOS DE HULE SILICÓN CON BaTiO_3

En la figura 4.10 – 4.12 se presenta un análisis de los compósitos como dieléctricos en función del contenido de relleno. Aunque los valores experimentales son el promedio de tres muestras, no es muy claro que el contenido de BT esté modificando la resistividad (figura 4.10) y la pérdida dieléctrica (figura 4.12), sin embargo como era de esperarse, la constante dieléctrica aumenta conforme se agrega mayor contenido de BT (Fig. 4.11).

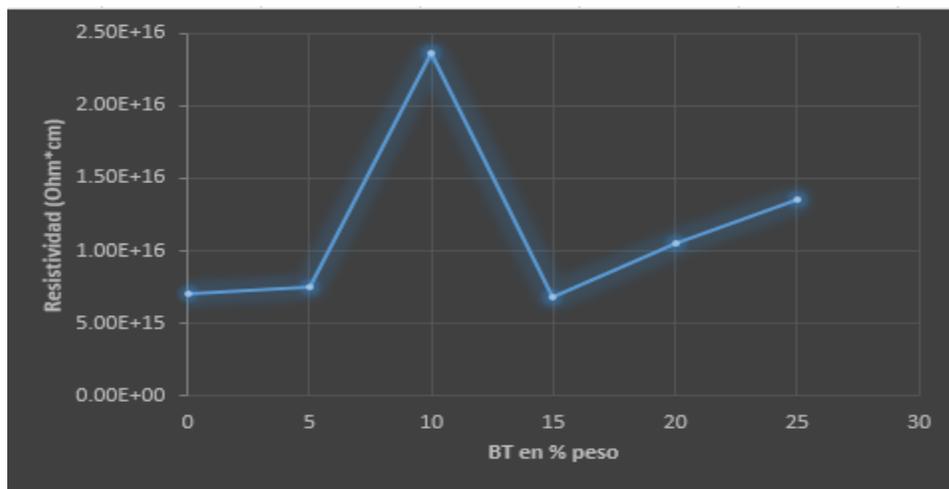


Figura 4.10 Gráfica Resistividad de los compósitos como función del contenido de BT

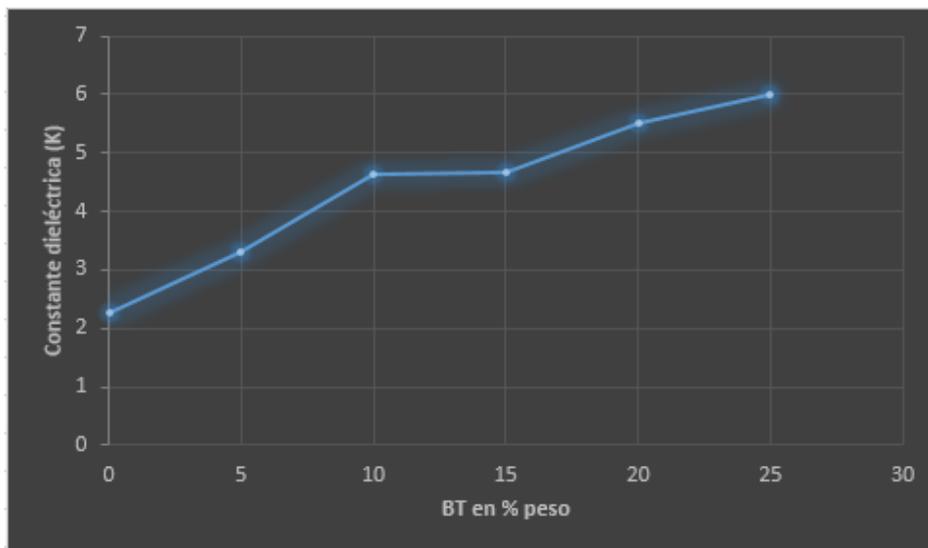


Figura 4.11 Gráfica de la constante dieléctrica de los compósitos como función del contenido de BT

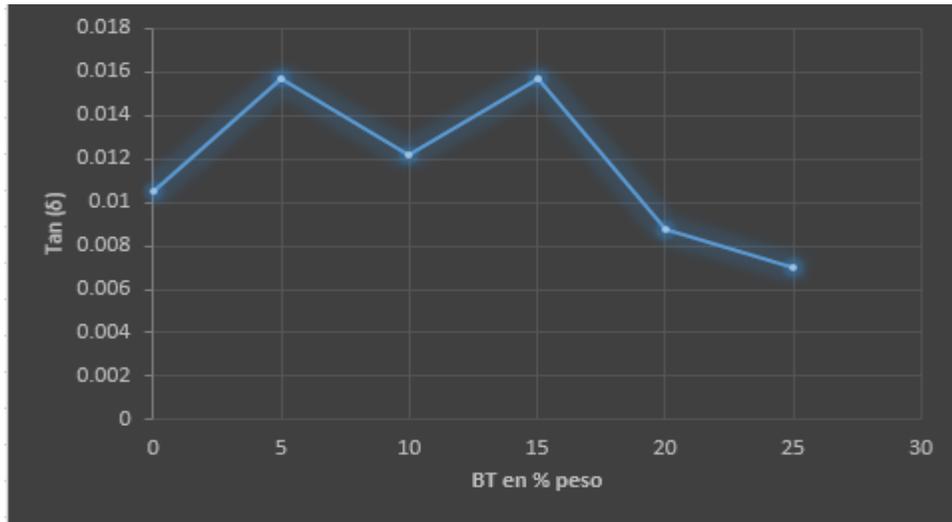


Figura 4.12 Gráfica de la pérdida dieléctrica de los compósitos como función del contenido de BT.

4.7 PRUEBA DE PLANO INCLINADO

4.7.1 Pruebas de corriente directa (CD)

En la prueba se aplicó una tensión inicial de 2.5 kV, un flujo de 0.15 ml/min y una resistencia de 10 k Ω . Ninguna prueba llegó a la 6 horas, el voltaje mayor que se utilizó fue de 2.75 kV, todas las muestras presentaron erosión, en la Figura 4.13 se presentan las muestras con diferente contenido de BT y en cada columna aparecen las réplicas. En estas muestras se observa el tipo de daño sufrido sobre la superficie y es muy claro que la erosión fue del tipo surco, aunque algunas muestras también se observa un daño extendido.

La prueba de plano inclinado tiene como principal objetivo el de evaluar la resistencia a la erosión de los materiales aislantes poliméricos que se encuentran a la intemperie y son dañados por las descargas superficiales. Durante dicha prueba, mediante la generación de arco de banda seca, se erosiona el material de una manera acelerada. La magnitud de la erosión y/o el tiempo en que esta alcanza una longitud determinada es registrada como un parámetro que permite comparar diferentes materiales o verificar que el material cumple con los requerimientos mínimos establecidos en estándares.



Figura 4.13 Resultados de la prueba de plano inclinado en corriente directa, compósitos de BaTiO₃

Aparentemente la masa erosionada es mayor en el silicón sin relleno de acuerdo con la Figura 4.19, sin embargo esto es debido a que el tiempo al que estuvo expuesta la muestra a alto voltaje sin sufrir rompimiento fue mayor. Las muestras con relleno sufrieron menos pérdida de masa pero el tiempo que resistieron fue menos comparado con el silicón puro.

Como se puede apreciar en el Figura 4.15, el tiempo que duró la prueba de CD fue poco tiempo, la descarga de arco de banda seca dio como resultado la formación de punto caliente y pista carbonosa en la superficie del compuesto, en la Figura 4.13 se puede visualizar las pistas que se formaron, lo que provoca que conduzca aún más electricidad y amanecé seriamente la seguridad y estabilidad del sistema.

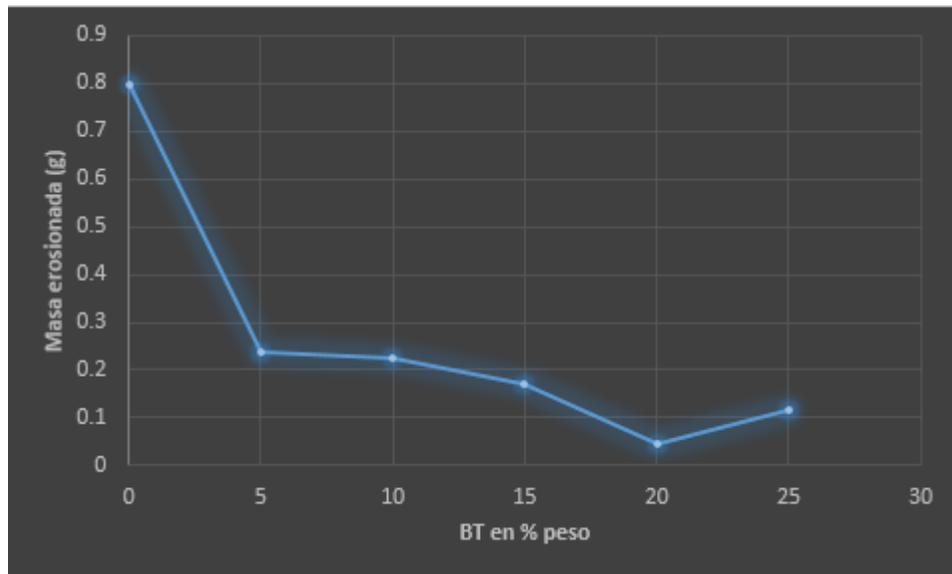


Figura 4.14 Gráfica de la masa erosionada de los compósitos en CD como función del contenido de BT

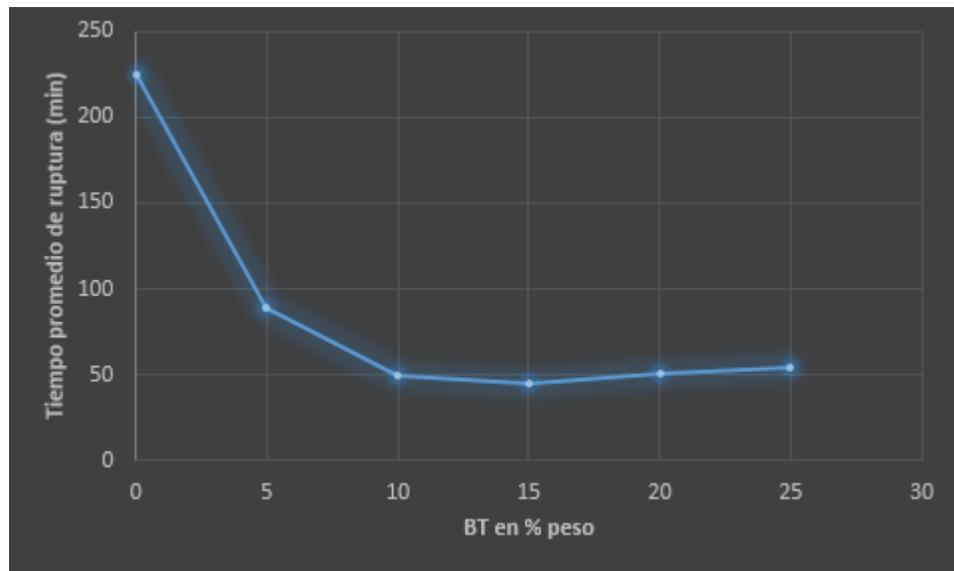


Figura 4.15 Gráfica de tiempo de ruptura de los compósitos en CD como función del contenido de BT

4.7.2 PRUEBAS EN CORRIENTE ALTERNA (CA)

En la figura 4.16 podemos visualizar los resultados de la prueba de plano inclinado en CA. Se puede ver como se formó la erosión volumétrica y esta erosión avanzó hacia el seno del compuesto, de hecho se pueden ver los orificios con una profundidad considerable. La prueba se detiene cuando la erosión interna o volumétrica llega a los 3 mm.

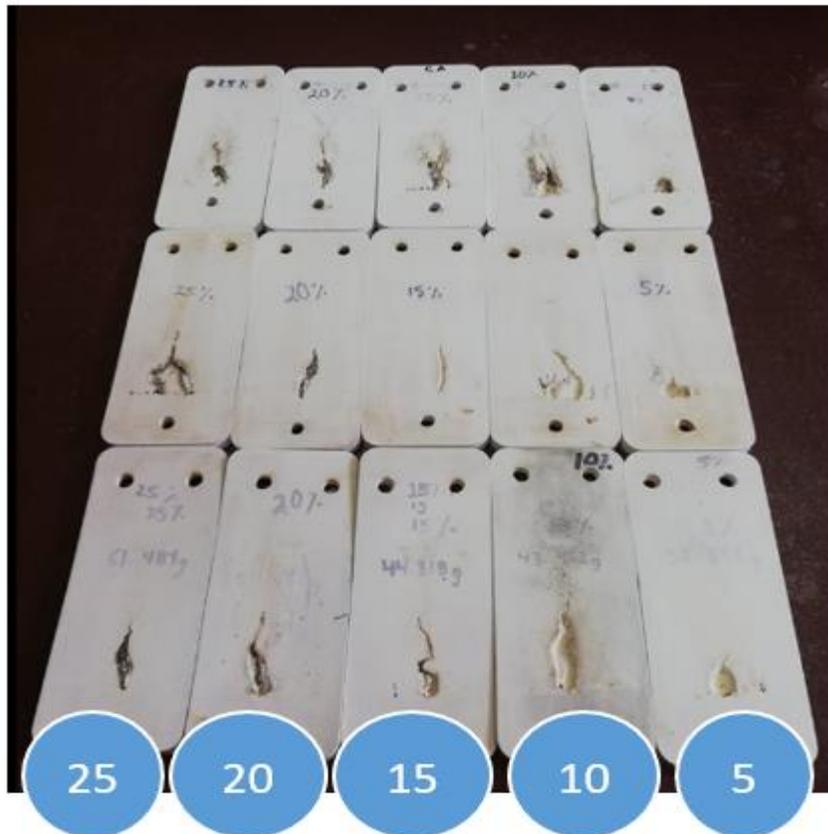


Figura 4.16 Resultados de la prueba de plano inclinado en corriente alterna, compósitos de BaTiO_3

Analizando el tiempo de ruptura como función del contenido de BT, se encuentra algo similar observado en CD Figura 4.13. Sin embargo las muestras con bajo contenido de BT (5% y 10%) resistieron un poco más que en las pruebas de CD. De forma similar, se puede ver a grosso modo que entre mayor sea el contenido de BT menor será la resistencia a la erosión.

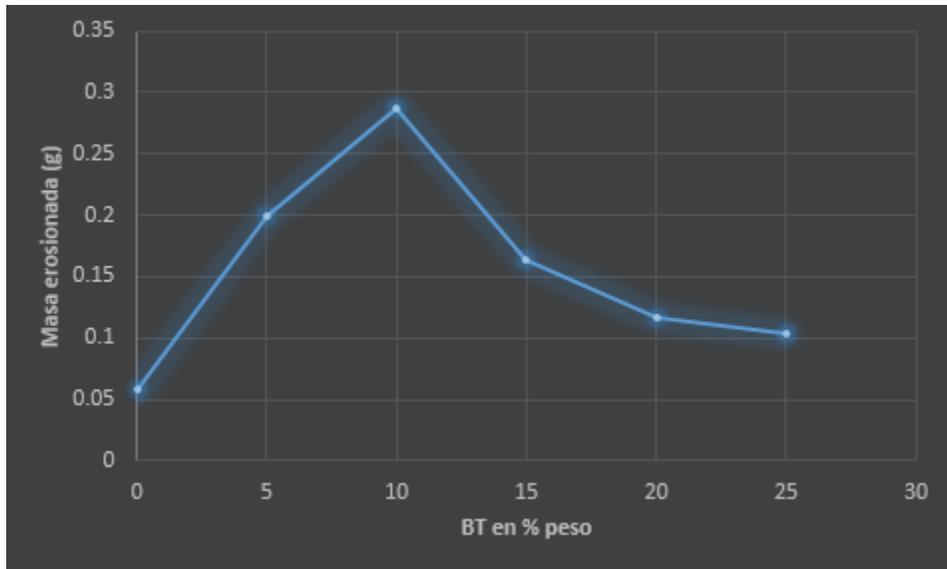


Figura 4.17 Gráfica de la masa erosionada de los compósitos en CA como función del contenido de BT

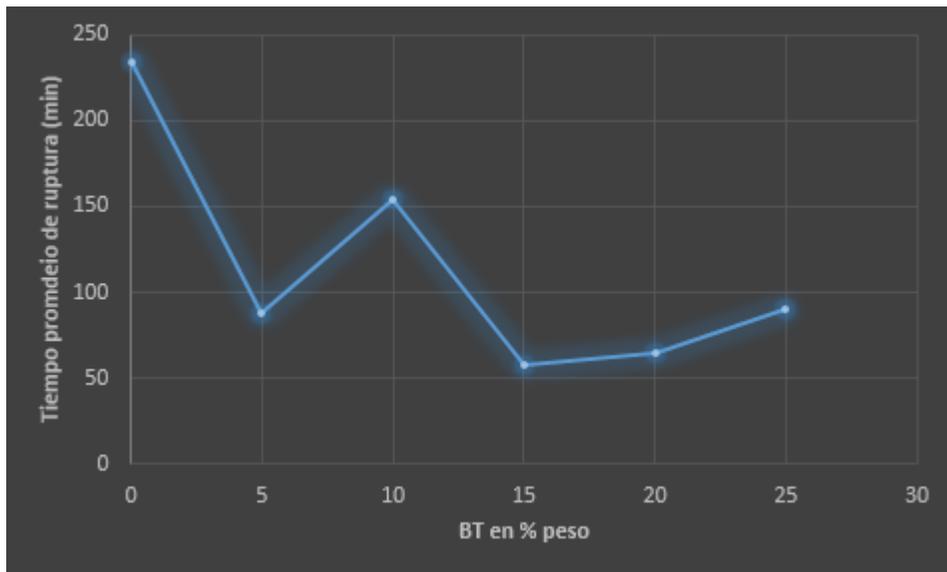


Figura 4.18 Gráfica de tiempo de ruptura de los compósitos en CA, como función del contenido de BT

La prueba de CA duró un poco más que la de CD, muestra de 0% y 5% son las que sobresalieron un poco en cuestión de tiempo y masa erosionada perdió más volumen en CA, se puede apreciar en las Figuras 4.17 y 4.18.

En la comparación de valores experimentales entre las Figuras 4.14 y 4.17 y entre las Figuras 4.15 y 4.18, sugiere que las muestras sufren mayor daño cuando se les somete a corriente directa.

4.7.3 COMPARACIÓN ENTRE LA EROSIÓN PRODUCIDA POR CADA TIPO DE TENSIÓN

En la Figura 4.19 es más claro que el daño causado por alta tensión en CD resulta en un daño más extendido. En esta figura se muestran solamente las muestras de silicón puro porque en ellas se observó más claramente esta diferencia. Cuando hay algún porcentaje de contenido de BT los surcos aparecen como se mostró en las Figuras 4.13 y 4.16.



Figura 4.19 Muestras de silicón puro sometidas a la prueba de plano inclinado. Se puede observar el tipo de daño que causó cada tipo de corriente.

CONCLUSIONES.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo se pueden resumir las siguientes conclusiones:

El silicón PDMS con menor peso molecular, presenta los mejores valores de resistividad, probablemente debido a que el salto entre una cadena polimérica a otra representa una barrera de potencial que se traduce en una mayor resistencia al paso de la corriente. Esto sugiere usar monómeros de baja viscosidad.

Aunque agregar BaTiO₃ como relleno en el silicón, aumenta la constante dieléctrica y esto a su vez disminuye los gradientes de campo eléctrico a lo largo del cuerpo del aislador, parece ir en detrimento de la resistencia a la erosión por descargas parciales superficiales. Esto se observa tanto en altos voltajes CA como CD. Debido a que el relleno usado fue BaTiO₃ el cual es un ferroeléctrico, es decir un material que puede contener una carga electrostática remanente, aun cuando no haya un campo eléctrico externo aplicado. Las partículas de polvo pueden constituirse en una distribución de carga espacial a lo largo de la pieza y que en algún momento reduzca la tensión requerida para iniciar la formación de los surcos de erosión observados durante este trabajo. En este sentido, el uso de partículas de tamaño nanométrico ha resultado benéfico. En nuestro caso se usaron partículas relativamente grandes (0.8 μm) [44].

Fue evidente que el daño causado por los altos voltajes CD es mayor que el causado por los altos voltajes CA. Esto se pudo observar aun en muestras de silicón puro, la razón de este hecho experimental no es clara y sigue siendo objeto de investigación en la comunidad científica.

En CD los aisladores se ven más afectados en este tipo de condiciones que en corriente alterna, esto puede ser porque las partículas contaminantes bajo un campo eléctrico de corriente directa se cargan y son aceleradas hacia el electrodo opuesto donde se acumulan, por este motivo los aisladores en CD pueden acumular mayor contaminación que en CA, por ello el objetivo fabricar aisladores poliméricos con buenas propiedades no conductoras y que soporten descargas parciales [45].

REFERENCIAS

- [1] Hall J. (January 1993). History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications. IEE Nonceramic, vol. 8, pp.1-6
- [2] Paredes-Olguín M., Espino F., González C. (diciembre 2010). Materiales compuestos de alta permitividad para atenuar el campo eléctrico en aisladores poliméricos. Científica, vol. 14, pp.1-8
- [3] Espino F. (septiembre 2015). Caracterización de la descarga corona y estudio de los efectos electromagnéticos de líneas de transmisión en alta tensión de corriente directa. Proyectos conjuntos de investigación, vol. 1, pp. 1-21.
- [4] Notimex. (febrero 2018). La CFE licita una línea de transmisión de Oaxaca al centro de México. 2019, de Obras Sitio web: <https://obrasweb.mx/construccion/2018/02/13/la-cfe-licita-una-linea-de-transmision-de-oaxaca-al-centro-de-mexico>
- [5] Paredes M., Gómez C., Espino F. (2010). Efecto de un agente compatibilizador sobre partículas de BaTiO₃ dopadas con itrio en el comportamiento dieléctrico de compósitos de hule silicón. Metalurgia y Materiales, vol.1, pp.1-5.
- [6] Retana T. (2016). Fabricación de compósitos silicón-cerámico para mejorar la disipación de calor durante descargas eléctricas en aislamiento de alta tensión. Ciudad de México: IPN.
- [7] Paredes M. (2013). Síntesis de compósitos polímero-cerámicos para aislamiento en alta tensión. Ciudad de México: IPN.
- [8] Abdel-Salam M. (2000). High Voltage Engineering: Theory and Practice. Columbus, Ohio: Founding Editor.
- [9] Kuffel E., Kuffel J., Zaengl W. (2000). High Voltage Engineering: Fundamentals. Toronto, Canadá: Fundamentals.
- [10] Mackevich J. Shah M. (1997). Polymer Outdoor Insulating Materials Part I: Comparison of Porcelain and Polymer Electrical Insulation. Feature Article, Vol 13, p.10
- [11] Fierro-Chávez J. (abril 1999). Aisladores no cerámicos para líneas de transmisión. Parte I: experiencias de una tecnología prometedor. 2000, de boletín iie Sitio web: <https://www.ineel.mx/elec99/art1.pdf>

[12] Papailiou K., Schmuk F. (agosto 2012). Silicone Composite Insulators. Germany: Springer.

[13] Anderson J., Ma B., Gubanski S. (2010). Evaluating Resistance of Polymeric Materials for Outdoor Applications to Corona and Ozone. High Voltage Engineering, vol. 17, pp. 1-8

[14] Danikas M. (1999). Polymer Outdoor Insulators. Electrical and computer Engineering, vol. 40, pp.1-10.

[15] Bashir N. Amhad H. (diciembre 2008). Ageing of Transmission Line Insulators: The Past, Present and Future. Power and Energy, vol. 1, p. 5.

[16] Ma B., Anderson J., Gubanski S. (abril 2010). Evaluating Resistance of Polymeric Materials for Outdoor Applications to Corona and Ozone. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, p.10.

[17] Ramón M. (1988). Efecto Corona. 2000, de Multimedia Sitio web: https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_corona

[18] Acevedo-García M. (noviembre 2004). Relación entre la degradación del polietileno por arborescencias de agua y las propiedades eléctricas del material. Aplicación al diagnóstico del aislamiento de los cables de distribución de energía eléctrica. Sevilla: Universidad de Sevilla.

[19] Rodero O. (2010). Arborescencia Eléctrica. 2010, de Wikimedia Sitio web: https://es.wikipedia.org/wiki/Arborescencia_eléctrica

[20] Tongyi W., (noviembre 2018). Efficiently enhancing the tracking and erosion resistance of silicone rubber by the synergism of fluorine-containing polyphenylsilsesquioxane and ureido-containing MQ silicone resin. show affiliations, 459, p. 9.

[21] Ramírez I., Jayaram S., Simón L. (2009). 1070-9878/09/\$25.00 © 2009 IEEE 52 Erosion Resistance and Mechanical Properties of Silicone Nanocomposite Insulation. Instituto de Investigaciones Eléctricas, vol.16, p. 8.

[22] Rowland S., Xiong Y., Robertson J. (2007). Aging of Silicone Rubber Composite Insulators on 400 kV Transmission Lines. National Grid, vol. 14, pp.1-7.

[23] Hernández S., Martínez A. (2009). "Influencia de la humedad y contaminación sobre aisladores EPDM-SILICONADOS". CDMX: ESIME.

- [24] Byron A. (2010). Corriente Directa (CD). 2012, de Open windows to the Universe Sitio web: https://www.windows2universe.org/physical_science/physics/electricity/ac_and_dc_current.html&lang=sp
- [25] Electrónica Fácil. (2010). Corriente Alterna. 2012, de EcuRed Sitio web: https://www.ecured.cu/Corriente_alterna HistoriaC
- [26] Cáceres L., Leyva F., (2012). Silicona (Si). 2012, de Slideshare Sitio web: <https://es.slideshare.net/FranciscaSeplveda/la-silicona>
- [27] Cherney E. A. (december 2005). Silicone Rubber Dielectrics Modified by Inorganic Fillers for Outdoor High Voltage Insulation Applications. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.16, p. 8.
- [28] Caballero A., Fernández J., Duran P., Moure C.. (1994). Titanato de Bario Cerámico. Instituto de cerámica y vidrio, vol.1, 5-21.
- [29] Menoza D., Ortiz J., Gómez C. (2010). CTAB as compatibilizer in composites silicone rubber-BaTiO₃ for outdoor high-voltage applications. Department of Metallurgical and Materials Engineering, vol.1, pp.1-5.
- [30] Togyi W., Xuejun L. (2018 agosto 02). Efficiently enhancing the tracking and erosion resistance of silicone rubber by the synergism of fluorine-containing polyphenylsilsesquioxane and ureido-containing MQ silicone resin. Applied Surface Science, vol.1, p.2.
- [30] W. Hsiao-Lin (2002) Structure and Dielectric Properties of Perovskite: Barium Titanate (BaTiO₃), Submitted in Partial Fulfillment of Course Requirement for MatE 115, Fall 2002 San Jose State University, p. 3-9.
- [31] Jim W. Goodwin, "Colloids and Interfaces with Surfactants and Polymers – An Introduction" John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [33] Bin Ma., Johan A. Gubanski M. (abril 2010). Evaluating Resistance of Polymeric Materials for outdoor Applications to Corone and Ozone. Chalmers University of Technology, vol. 17, pp. 55-557.
- [34] Cherney E. (diciembre 2005). Silicone Rubber Dielectrics Modified By . University of Waterloo, vol. 12, p. 1108.

- [35] T. Zhao and R. A. Bemstorf, "Aging tests of polymeric housing materials for non-ceramic insulators", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 14, pp 26-33, 1998.
- [36] T. Zhao and M. G. Comber, "Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers," IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 1, pp. 313–318, Jan. 2000.
- [37] Paredes-Olgín M., Gómez-Yáñez C., Espino F., Ramírez E.. (2013). Electric Stress Grading on Bushings of combined Instrument Transformers Using High permittivity Polymeric Composites. ESIME-ZACATENCO, vol.1, pp.1-8.
- [38] S. H. Kim, E. A. Chemey and R. Hackam, "Hydrophobic behavior of insulators coated with RTV silicone rubbers", IEEE Trans. EI, Vol. 27, pp. 610-622, 1992.
- [39] Danikas M.. (diciembre 2000). Surface Phenomena on Resin-Type Insulators Under different Electrical and Non-electrical Estresses in the early stage of ageing. Facta Universitatis , vol. 13, pp. 335-240.
- [40] Paredes-Olgín M., Gómez C., Espino F. (2010). Silicone Rubber Compositions with Yttrium - Doped Ceramics for outdoor insulation. National Polytechnic Institute, vol. 1, pp. 1-5.
- [41] Mavrikakis, N.; Siderakis, K.; Mikropoulos, P.: Laboratory investigation on hydrophobicity and tracking performance of field aged composite insulators. In: Power Engineering Conference (UPEC), 2014 49th International Universities, pp. 1–6 (2014).
- [42] K. Sonoda, J. Juuti, Y. Moriya and H. Jantunen (2010) Modification of the dielectric properties of 0-3 ceramic-polymer composites by introducing surface active agents onto the ceramic filler surface, Composite Structures, 92, p. 1052-1058.
- [43] Cuevas J. López M., Sandoval R. (2016). Medición a la resistencia por descargas eléctricas superficiales de materiales poliméricos. Ciudad de México: ESIME.
- [44] Z. Li and B. Du, Polymeric insulation for high-voltage DC extruded cables: Challenges and development directions, IEEE Electric. Insulation, 34 (6), 2018, pp. 30-43.

[45] Takada T., Tohmine T., Tanaka Y., Li J. Space charge accumulation in double layer dielectric systems. Measurements methods and quantum chemical calculations, IEEE Electric Insulation, 35 (5), 2019, pp. 36-45.