

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL USO DE ACEITE MINERAL Y
ACEITE VEGETAL EN TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN**

PRESENTADO POR:

AMIGDAEL OSMIR CALDERÓN CERNA

JUAN ERNESTO PÉREZ LÚE

RAMIRO MOISÉS PÉREZ MENDOZA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2020.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR :

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título :

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL USO DE ACEITE MINERAL
Y ACEITE VEGETAL EN TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN**

Presentado por :

**AMIGDAEL OSMIR CALDERÓN CERNA
JUAN ERNESTO PÉREZ LÚE
RAMIRO MOISÉS PÉREZ MENDOZA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

SAN SALVADOR, FEBRERO 2020

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

NOTA Y DEFENSA FINAL


En esta fecha, miércoles 12 de febrero 2020, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 2:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director


Firma

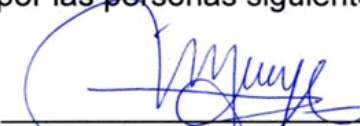


2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- ING. ARMANDO MARTINEZ CALDERÓN
(Docente Asesor)


Firma

- ING. JOSE MIGUEL HERNANEZ


Firma

- MSC. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL USO DE ACEITE MINERAL Y ACEITE VEGETAL EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

A cargo de los Bachilleres:

- CALDERÓN CERNA AMIGDAEL OSMIR

- PÉREZ LÚE JUAN ERNESTO

- PÉREZ MENDOZA RAMIRO MOISÉS

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.1

(nueve punto uno)

AGRADECIMIENTOS

- A DIOS Por darme vida y fuerza para culminar con éxito mis estudios.
- A MIS PADRES Gladis Cerna y Omar Calderón que con mucho esfuerzo me impulsaron a seguir adelante y han sido mi ejemplo de superación, a mi madre principalmente quien me ha acompañado en este camino dándome su apoyo y consejo, gracias por tener fé en que lo lograría y que a pesar de las dificultades siempre ha estado apoyándome.
- A MIS HERMANOS Verónica Cerna, Omar Calderón quien me ha dado su apoyo, Danilo Calderón por su ayuda y apoyo que me brindo incondicionalmente; sin los que no habría podido cumplir mis metas, Fabio Calderón y Paola Calderón por su apoyo y siempre creer en mí.
- ASESOR Ing. Armando Calderón por la oportunidad de trabajar juntos en el desarrollo de este trabajo de graduación.
- A MI TIA Juana Murgas quien siempre me brindó su apoyo y ha estado pendiente de mi bienestar
- AMIGOS Con quienes superamos muchas adversidades, gracias por la amistad que me han brindado y por el apoyo.

GRACIAS A LOS QUE COMPARTIERON ESTA ETAPA CONMIGO
AMIGDAEL OSMIR CALDERÓN CERNA

A DIOS

Gracias al creador del universo por concebirme unos padres que me apoyaron al culminar mi título universitario con sacrificio y esmero para salir adelante.

A MIS PADRES

Antonio Pérez Muzo y Gloria Mercedes Lúe por apoyarme moral y económicamente desde el principio hasta terminar la carrera, infinitas gracias por ayudarme en momentos críticos que me ayudaron a fortalecer los lazos y a no desmayar porque fueron los que me sostuvieron cuando la meta parecía inalcanzable y quizás no hubiese sido posible, pero lo he logrado con persistencia, sacrificio y esmero hoy me siento feliz de alcanzar una meta y todo ha sido posible gracias a ellos.

A MI ABUELA

Rosa Lúe por las grades enseñanzas que me nos dejó porque nos dio las lecciones más importantes de que nos puede regalar el escaso tiempo que habitamos en este planeta, aún recuerdo el día como si hubiese sido ayer, que todo estaba por empezar y allí con tus buenos deseos y oraciones siempre nos tuviste presente, gracias y que descanses en paz y espero volver a coincidir en el infinito.

A TODOS MIS
HERMANOS Y
HERMANAS

En especial a Ceci por acompañarme en este salto al vacío que ayudo a darlo gracias por tu incansable apoyo que recibí de tu parte, me ayudaste también con tus consejos y por velar en parte con la alimentación, al igual que Rini fue gracias al apoyo en conjunto que he recibido de toda mi familia hoy puedo decir gracias por este triunfo tan grande.

A TODOS AMIGOS Y
CONOCIDOS

En especial mi grupo de tesis, Ridis, equipo Determinantes, ASERC tu esquina, porque fueron momentos gratos de tristeza y alegrías compartidas, me da gusto conocer calidad de personas que trabajamos en grupos o no, seremos futuros profesionales y colegas gracias por coincidir en tiempo y espacio

A NUESTRO DOCENTE
ASESOR

Ing. Calderón por todo el apoyo y tiempo brindado y demás docentes que ayudaron a la formación académica profesional, también a reinita por colaborarnos y facilitarnos los procesos académicos gracias

JUAN ERNESTO PÉREZ LÚE

A DIOS

Por demostrarme su amor a través de mi madre.

Por su ayuda a través de mis profesores, amigos y familiares.

Por concederme la sabiduría e inteligencia.

A MI MADRE

Evelin Noemí Mendoza Sánchez, Quien ahora vive en mi corazón y me guía desde el cielo.

A MI PADRE Y
HERMANOS

A mi padre, Ramón Pérez López por enseñarme la disciplina y el respeto. Natalia la chofer oficial, por tus consejos y momentos de desestrés. Suyapa por tu comida y atenciones. Gabriel por tu amistad y confianza. Conchito por todos los momentos en familia y por la computadora, Juan Flores por su apoyo y por compartir nuestra infancia junto con Gabriel e Israel. Diana por tu cariño y alegrías.

A MIS ABUELOS
Y TÍA

A Concepción Mendoza por enseñarnos el respeto, la humildad, la generosidad y la amistad con Dios. A Albertina Sánchez por su amor y todas sus atenciones que solo un rey las podría tener. A mi Tía Ana Mendoza por su cariño y atenciones.

A TODOS AMIGOS Y
CONOCIDOS

A Osmir Calderón y Ernesto Pérez por su entrega y dedicación, a Ridis quienes nunca me dejaron sólo en momentos de dolor, a Nairobi Ventura por su comprensión, Sra. Lidia por sus atenciones, Juancito y Posada por su ayuda en laboratorio, Vanesa García por su amistad y confianza, Reinita por su dedicación y ayuda en nuestro proceso de graduación.

A NUESTRO DOCENTE
ASESOR.

Ing. Armando Calderón por su guía y compartir todos sus conocimientos y experiencia. Ing. Salomón por orientarnos en temas de disciplinas distintas a las nuestras, a nuestro jurado calificador, Ing. Roberto Chévez e Ing., Miguel Hernández por sus observaciones y correcciones

RAMIRO MOISÉS PÉREZ MENDOZA

INDICE

1	CAPITULO I.....	16
1.1	Generalidades de los transformadores.....	16
1.1.1	Transformador.....	16
1.1.2	Partes del Transformador.....	16
1.1.2.1	Bobinados.....	16
1.1.2.1.1	Tipos de devanado utilizados para transformador de tipo núcleo.....	17
1.1.2.1.2	Devanados cilíndricos.....	17
1.1.2.1.3	Bobinas helicoidales.....	19
1.1.2.1.4	Devanados helicoidales individuales.....	19
1.1.2.1.5	Enrollamiento helicoidal multicapa.....	20
1.1.2.1.6	Crossover sinuoso.....	21
1.1.2.1.7	Disco y bobinado de disco continuo.....	21
1.1.2.1.8	Bobinados para Transformador Tipo Shell.....	22
1.1.2.1.9	Tipo Sandwich sinuoso.....	22
1.1.2.1.10	Ventajas de los devanados tipo Shell en transformadores.....	23
1.1.2.2	Núcleo magnético.....	24
1.1.2.3	Aislante.....	24
1.1.2.3.1	Aislamiento sólido.....	25
1.1.2.3.2	Clasificación de los aislamientos sólidos.....	26
1.1.2.3.3	Aislamientos delgados y calientes. (WILLIAM SALVADOR, 2014)].....	26
1.1.2.3.4	Aislamientos delgados y fríos.....	26
1.1.2.3.5	Aislamientos gruesos.....	27
1.1.2.3.6	Características químicas y físicas del papel aislante.....	27
1.1.2.3.7	Características químicas.....	27
1.1.2.3.8	Características físicas.....	27
1.1.2.3.9	Envejecimiento del papel aislante.....	28
1.1.2.4	Aceite.....	28
1.1.2.5	Bornas (bushings) de transformadores.....	29
1.1.2.5.1	Bornas con cuerpo aislante sólido (porcelana).....	31
1.1.2.5.2	Bornas condensadoras.....	34
1.1.2.6	Tap.....	36

2	CAPITULO II.....	37
2.1	Propiedades del Aceite Dieléctrico (descripción y tablas).....	37
2.2	Aceite Dieléctrico para Transformadores	37
2.3	Funciones Desempeñadas por los Aceites en el Transformador (Brettis, 2018)	37
2.3.1	Refrigeración.....	37
2.3.2	Aislamiento	38
2.3.3	Lubricación	38
2.4	Tipos de Aceites para Transformadores.....	38
2.4.1	Aceite Mineral	38
2.4.1.1	Composición de un Aceite Dieléctrico Mineral.....	38
2.4.1.2	Aceites Bases.....	39
2.4.1.3	Aromáticos	39
2.4.1.4	Isoparafínicos	39
2.4.1.5	Nafténicos	39
2.5	Aceite Dieléctrico de Origen Vegetal	41
2.6	Ésteres Sintéticos.....	41
2.6.1	Aceites Siliconados.....	42
2.7	Aplicaciones de Líquidos Aislantes en Transformadores	42
2.8	2.5 Propiedades de los Aceites Dieléctricos Minerales.....	42
2.9	Propiedades Físicas	43
2.9.1.1	Viscosidad	43
2.9.1.2	Punto de Fluidéz.....	43
2.9.1.3	Punto de Inflamación	44
2.9.1.4	Tensión Interfacial.....	44
2.9.1.5	Punto de Anilina	44
2.9.1.6	Color	45
2.10	Propiedades Eléctricas.....	45
2.10.1.1	Factor de Potencia	45
2.10.1.2	Rigidez Dieléctrica	45
2.11	Propiedades Químicas	46
2.11.1.1	Estabilidad a la Oxidación	46

2.12	Características del Aceite Dieléctrico de Origen Vegetal Según IEEE C57-147 (TRADUCCIÓN, 2019)	46
2.12.1	Punto de Inflamación y Combustión.....	46
2.12.2	Densidad Relativa	46
2.12.3	Estabilidad de Oxidación	46
2.12.4	Numero Acido (ASTM D664 y ASTM D974).....	47
2.12.5	Tension Interfacial (ASTM D971).....	48
2.12.6	Contenido de Agua	49
2.12.7	Gasificación de Líquidos Aislantes Bajo Tensión Eléctrica e Ionización. (ASTM D2300)	49
2.12.8	Bifenilos Policlorados (PCB) (ASTM D4059).....	49
2.12.9	Tensión de Ruptura Dieléctrica (ASTM D1816).....	50
2.12.10	Punto de Vertido (ASTM D97, ASTM D5949 [B5] y ASTM D5950 [B6])	50
2.12.11	Resistividad de Volumen (ASTM D1169).....	51
2.13	Valores de las Propiedades Físicas y Químicas de Diferentes Tipos de Aceites Disponibles en el Mercado.....	51
3	CAPITULO III	69
3.1	Comparativa, Ventajas y Desventajas Generales de los Tipos de Aceites.....	69
3.2	Comparación de las Propiedades Generales de los Líquidos Aislantes	69
3.2.1	Propiedades Físico-Químicas.....	69
3.2.2	Color	70
3.2.3	Composición Química	70
3.2.4	Seguridad Medioambiental	70
3.2.5	Oxidación.....	70
3.2.6	Punto de Inflamacion	71
3.2.7	Seguridad Contra Incendios.....	71
3.2.8	Clasificación de los Fluidos según IEC-61100.....	71
3.2.9	Propiedad de los Fluidos	71
3.2.10	Contenido de Agua	72
3.2.11	Solubilidad del Agua.....	72
3.2.12	Humedad de Saturación	72
3.2.13	Viscosidad.....	73
3.2.14	Densidad Relativa	73

3.2.15	Miscibilidad	74
3.2.16	Biodegradabilidad	74
3.2.17	Beneficios Expectativa de Vida	75
3.2.18	Propiedades Eléctricas	76
3.2.19	Tensión de Ruptura	76
3.2.20	Rigidez Dieléctrica en Pruebas de Impulso	76
3.3	Comparación de Precios de Aceites Dieléctricos	76
3.3.1	Gama Electra.....	77
3.3.2	Gama Tensión	77
3.3.3	Gama Bio	77
4	CAPITULO IV	79
4.1	Descripción de las Características del Aceite Vegetal según la normativa IEEE C157-7 79	
4.1.1	Viscosidad Cinemática (TRADUCCIÓN, 2019).....	79
4.1.2	Densidad Relativa (TRADUCCIÓN, 2019)	80
4.1.3	Contenido de Humedad (TRADUCCIÓN, 2019).....	80
4.1.4	Punto de Inflamación (TRADUCCIÓN, 2019)	80
4.1.5	El Punto de Ignición (TRADUCCIÓN, 2019).....	80
4.1.6	Rigidez Dieléctrica (TRADUCCIÓN, 2019).....	80
4.1.7	El Color (TRADUCCIÓN, 2019).....	80
5	CAPITULO V.....	81
5.1	Análisis del Comportamiento Térmico del Transformador Monofásico Tipo Poste Sumergido en Aceite Dieléctrico Vegetal y Mineral.	81
5.2	Fuentes de Calor.....	81
5.2.1	Perdidas en el Cobre	81
5.2.2	Perdidas por Histéresis.....	81
5.2.3	Perdidas de Foucault.	82
5.3	Métodos de Transmisión del Calor.	83
5.3.1	Transferencia de calor por Conducción.	83
5.3.2	Transferencia de calor por convección.	84
5.3.3	5.2.3 Transferencia de Calor por Radiación.	85
5.4	Ciclos de Transferencia de Calor en el Transformador.....	85
5.5	Circuito Térmico del transformador.....	86

5.6	Circuito Simplificado Para la Comparación de Transferencia de Calor.	87
5.7	Temperaturas Máximas	87
5.7.1	Cálculo de la Resistencia de la cuba	89
5.7.2	Determinación de RACEITE Mineral y Vegetal.	90
5.8	Análisis de Resultados	94
6	Estudios Posteriores o Futuras Investigaciones.....	95
7	Conclusiones.....	96
8	Bibliografía.....	98

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Transformador eléctrico ([1]).....	16
Figura 1.2	devanados cilíndricos (TRANSFORMADOR P. D.).....	17
Figura 1.3	devanados cilíndricos multicapa (TRANSFORMADOR P. D.).....	18
Figura 1.4	devanados cilíndricos usando conductores circulares (TRANSFORMADOR P. D.).	18
Figura 1.5	devanados helicoidal individual y doble [(TRANSFORMADOR P. D.)]	19
Figura 1.6	devanados de disco helicoidal (TRANSFORMADOR P. D.).....	20
Figura 1.7	devanados helicoidal multicapa (TRANSFORMADOR P. D.)	20
Figura 1.8	devanados tipo cross over (TRANSFORMADOR P. D.)	21
Figura 1.9	devanados de discos continuos [(TRANSFORMADOR P. D.)].....	22
Figura 1.10	devanados tipo sándwich [(TRANSFORMADOR P. D.)].....	23
Figura 1.11	Interior de un transformador.....	26
Figura 1.12	Composición química del papel aislante [(WILLIAM SALVADOR, 2014).....	27
Figura 1.13	Bornas aceite/aire con cuerpo aislante de silicona y porcelana para rangos de tensión entre 24 y 550 kV y corriente hasta 5000 A [(BUSHINGS)]	29
Figura 1.14	Bornas aceite/SF ₆ para rangos de tensión entre 36 y 550 kV y corriente hasta 4000 A [(BUSHINGS)]	29
Figura 1.15	Bornas aceite/aceite para rangos de tensión entre 72,5 y 550 kV y corriente hasta 4000 A [(BUSHINGS)]	29
Figura 1.16	Borna aceite/aire para rangos de tensión entre 69 y 550 kV y corriente hasta 5000 A, para altos niveles sísmicos [(BUSHINGS)].....	30
Figura 1.17	Gradiente eléctrico en Bornas, (BUSHINGS).....	30
Figura 1.18	Principio de funcionamiento de las Bornas condensadoras [(BUSHINGS)	31
Figura 1.19	Bornas para Transformadores Media Tensión tipo DIN [22]	32
Figura 1.20	Bornas para Transformadores Baja Tensión tipo DIN	33
Figura 1.21	Válvula de toma de muestras de aceite [(BUSHINGS).....	34
Figura 1.22	Toma de pruebas para medidas de aislamiento y capacidad [(BUSHINGS)].....	35
Figura 1.23	Comparación de características constructivas de pasatapas RIP y OIP [(BUSHINGS)].....	35
Figura 1.24	variador de TAP [(GARCÍA)].....	36
Figura 2.1	Aceites para transformadores (mineral)	37

Figura 2.2 Diagrama de fabricación de un aceite dieléctrico [(Brettis, 2018)].....	41
Figura 2.3 Curva de viscosidad vs temperatura de los aceites dieléctricos. [(Brettis, 2018)]	43
Figura 3.1 Temperatura de saturación de líquidos aislantes	72
Figura 3.2 Descomposición dieléctrica vs humedad.....	73
Figura 3.3 Biodegradabilidad de los líquidos aislantes	74
Figura 3.4 Expectativa de vida en años	75
Figura 3.5 Estudios de envejecimiento del papel kraft.....	75
Figura 5.1 Curva de Histéresis.....	82
Figura 5.2 Circuito térmico del transformador	86
Figura 5.3 circuito simplificado.....	87
Figura 5.4 circuito final simplificado.....	88
Figura 5.5 Geometría cilíndrica del transformador.....	89
Figura 5.6	92
Figura 5.7 comportamiento térmico (a) vegetal (b) mineral (TORREGROZA, 2018)	94

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Grado de uso de aceites aislantes. (SIGET, 2003).....	42
Tabla 2.2 . Comparación de la viscosidad cinemática entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([17])].	51
Tabla 2.3 Comparación de la Densidad Relativa entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	52
Tabla 2.4 Comparación del Contenido de Humedad entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	53
Tabla 2.5 Comparación del Punto de Inflamación entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	54
Tabla 2.6 Comparación del Punto de Ignición entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	55
Tabla 2.7 Comparación de la Rigidez Dieléctrica entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	55
Tabla 2.8 Comparación de la Rigidez Dieléctrica en Prueba de Impulso entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	57
Tabla 2.9 Comparación del Color entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	58

Tabla 2.10 Comparación del Numero de Acido (Neutralización) entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	59
Tabla 2.11 Comparación del Azufre Corrosivo entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	60
Tabla 2.12 Comparación del Punto de Anilina entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	61
Tabla 2.13 Comparación del Punto de Vertido de Fluidez entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	62
Tabla 2.14 Comparación de la Tensión Interfacial entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	63
Tabla 2.15 Comparación de la Resistividad Volumétrica entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	64
Tabla 2.16 Comparación del Análisis de Gases entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	65
Tabla 2.17 Comparación de la Bifenilos Policlorados entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].	66
Tabla 2.18 Comparación del Factor de Potencia entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])]	67
Tabla 3.1 Principales propiedades de los líquidos aislantes	69
Tabla 3.2 Punto de flameo	71
Tabla 3.3 Poder calorífico.	71
Tabla 3.4 Propiedades de los líquidos aislantes.	71
Tabla 3.5 Miscibilidad entre líquidos aislantes a temperatura ambiente ([19], 2014)	74
Tabla 3.6 Comparación de las tensiones de ruptura de líquidos aislantes	76
Tabla 4.1 Pruebas establecidas en la IEEE C157-7 para aceite vegetal (TRADUCCIÓN, 2019)	79
Tabla 5.1 (CENGEL, 2005)	93

1 CAPITULO I

1.1 Generalidades de los transformadores

1.1.1 Transformador

Se denomina transformador a un dispositivo electromagnético (eléctrico y magnético) que permite aumentar o disminuir el voltaje y la intensidad de una corriente alterna manteniendo constante la potencia. Los transformadores son dispositivos basados en el fenómeno de la inducción electromagnética; la inducción electromagnética, es la generación de corriente eléctrica inducida en un conductor por medio de un campo magnético.

Un transformador está formado por dos bobinas de conductores con espiras enrolladas (devanado) sobre un núcleo cerrado de hierro dulce (núcleo magnético). Estos conjuntos de vueltas se denominan: Bobina o Devanado Primario al que recibe el voltaje de entrada y Bobina secundaria o Secundario a aquella que entrega el voltaje transformado o de salida ([1]).

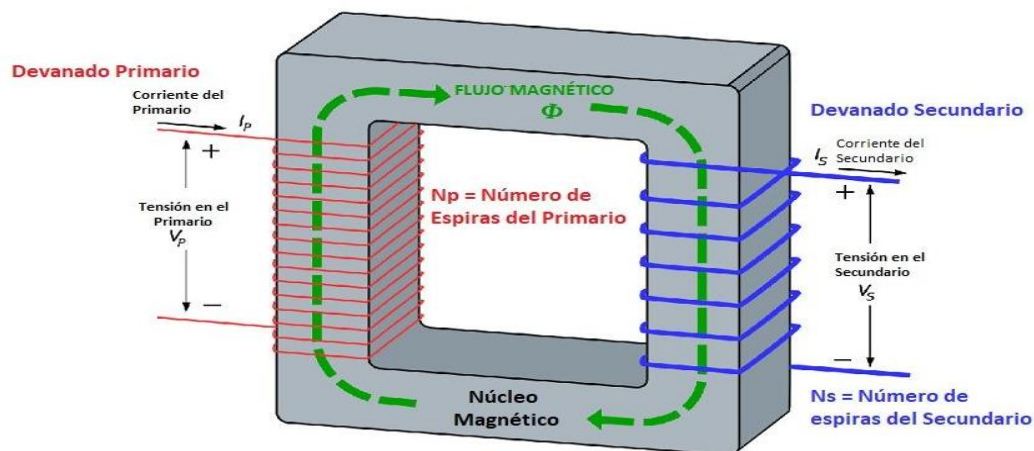


Figura 1.1 Transformador eléctrico ([1])

Se puede observar: El núcleo laminado de hierro, bobina primaria y bobina secundaria.

1.1.2 Partes del Transformador

1.1.2.1 Bobinados

Existen diferentes tipos de devanados utilizados para diferentes aplicaciones y arreglos. Los devanados son los conductores arrollados en varias formas, como helicoidales, de disco, cilíndricas, cruzadas etc., que generan fmm que es transportada por el núcleo a otros devanados para tener diferentes niveles de voltajes. Principalmente hay dos tipos de transformador:

1. Transformador de núcleo
2. Transformador tipo shell

En el tipo de núcleo, se envuelve el devanado primario y el secundario en las extremidades exteriores del núcleo y en el tipo de concha se colocan los devanados primarios y secundarios en las extremidades internas.

Usualmente se utilizan bobinados de tipo concéntrico en los transformadores. Se coloca el bobinado de baja tensión cerca del núcleo. Sin embargo, para reducir la reactancia de fuga, los devanados se pueden entrelazar. El bobinado para el tipo de núcleo depende de muchos factores, como la capacidad de corriente, la capacidad de resistencia a cortocircuitos, el límite de aumento de temperatura, la impedancia, la sobretensión, las instalaciones de transporte, etc (TRANSFORMADOR P. D.).

1.1.2.1.1 Tipos de devanado utilizados para transformador de tipo núcleo

1.1.2.1.2 Devanados cilíndricos

Estos bobinados son de tipo estratificado y utilizan un conductor rectangular o redondo que se muestra en las figuras (a) y (b). Los conductores se enrollan en los lados planos que se muestran en la Fig. (C) y se enrollan en el lado de la costilla en la Fig. (D).

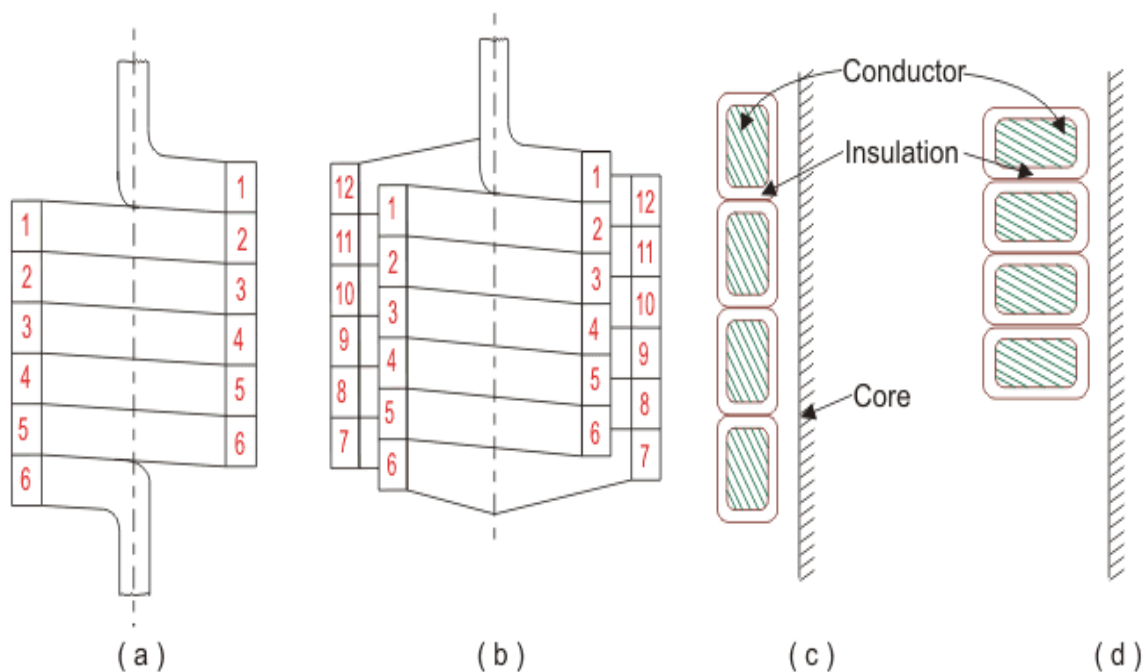


Figura 1.2 devanados cilíndricos (TRANSFORMADOR P. D.)

Devanados cilíndricos se utilizan devanados de bajo voltaje hasta 6,6 kV para kVA hasta 600-750, y una clasificación de corriente entre 10 y 600 A.

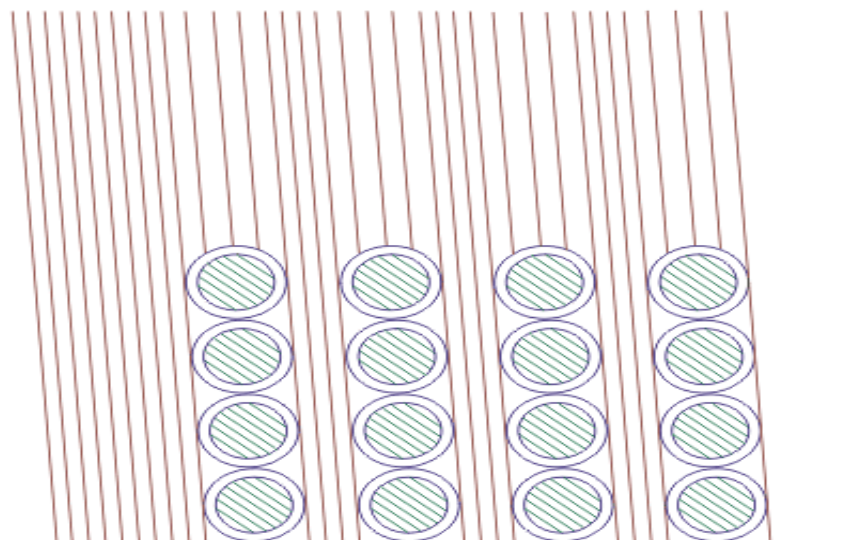


Figura 1.3 devanados cilíndricos multicapa (TRANSFORMADOR P. D.)

A menudo se utilizan bobinas cilíndricas en su forma multicapa. Utilizando conductores rectangulares de tipo de dos capas porque es fácil asegurar los extremos de salida. Los conductos de aceite separan las capas de los devanados; esta disposición facilita el enfriamiento a través de la circulación de aceite en el devanado (TRANSFORMADOR P. D.).

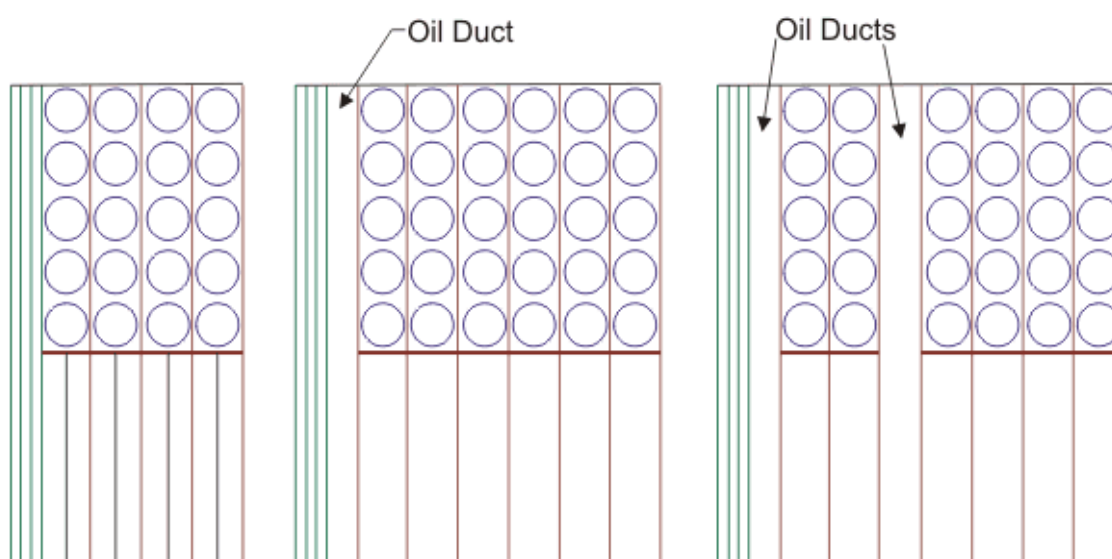


Figura 1.4 devanados cilíndricos usando conductores circulares (TRANSFORMADOR P. D.)

En bobinados cilíndricos multicapa, se utilizan conductores circulares, enrollados en tiras verticales para mejorar las condiciones de enfriamiento. La disposición crea conductos de aceite para facilitar un mejor enfriamiento. Se utiliza este tipo de devanado para clasificaciones de alta tensión hasta 33 kV, 800 kVA y clasificaciones de corriente hasta 80A. El diámetro máximo que utilizado para un conductor desnudo es de 4 mm (TRANSFORMADOR P. D.).

1.1.2.1.3 Bobinas helicoidales

Se utilizan **devanados helicoidales** en baja tensión, transformadores de alta capacidad, donde la corriente es mayor, y al mismo tiempo los giros son menores. La salida del transformador varía de 160 a 1000 kVA de 0.23-15 kV. Para asegurar una resistencia mecánica adecuada, el área de la sección transversal de la banda no debe ser inferior a 75-100 mm cuadrados. El número máximo de tiras utilizadas en paralelo para formar un conductor es de 16 (TRANSFORMADOR P. D.).

Hay tres tipos:

- Enrollamiento helicoidal único
- Enrollamiento helicoidal doble
- Enrollamiento helicoidal de disco

1.1.2.1.4 Devanados helicoidales individuales

consisten en enrollar en una dirección axial a lo largo de una línea de rosca con inclinación. Sólo hay una capa de vueltas en cada devanado. La ventaja del devanado helicoidal doble es que reduce la pérdida de corriente de Foucault en los conductores. Esto se debe a la cantidad reducida de conductores paralelos situados en la dirección radial.

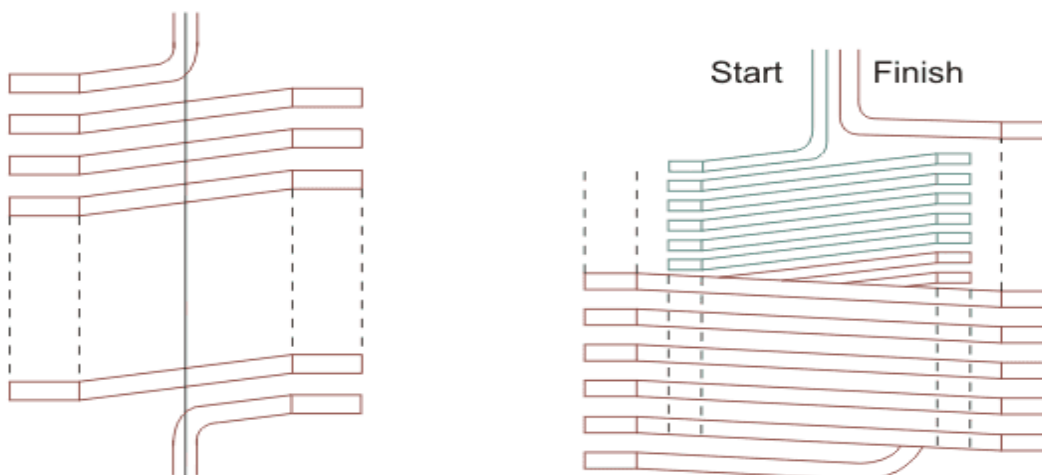


Figura 1.5 devanados helicoidal individual y doble [(TRANSFORMADOR P. D.)]

En Bobinas de disco helicoidal

Las tiras conectadas en paralelo se colocan una al lado de la otra en una dirección radial para ocupar la profundidad radial total del bobinado.

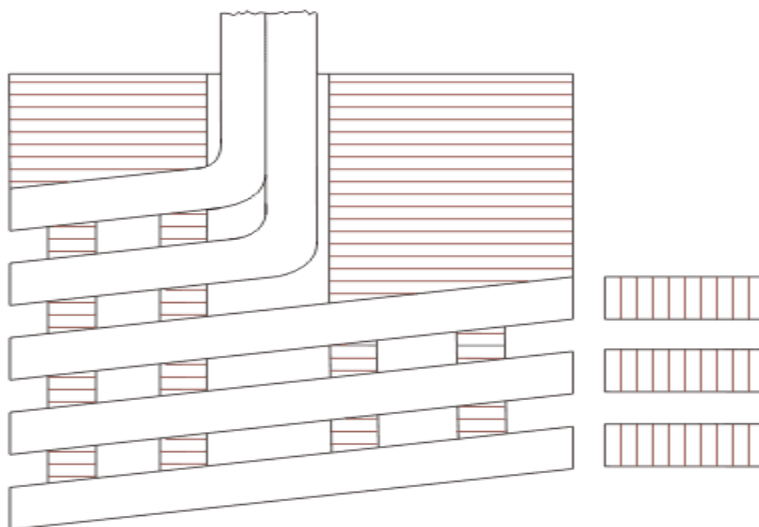


Figura 1.6 devanados de disco helicoidal (TRANSFORMADOR P. D.)

1.1.2.1.5 Enrollamiento helicoidal multicapa

Se usa comúnmente para clasificaciones de alto voltaje para 110 kV y superiores. Estos tipos de devanados consisten en varias capas cilíndricas enrolladas concéntricamente y conectadas en serie.

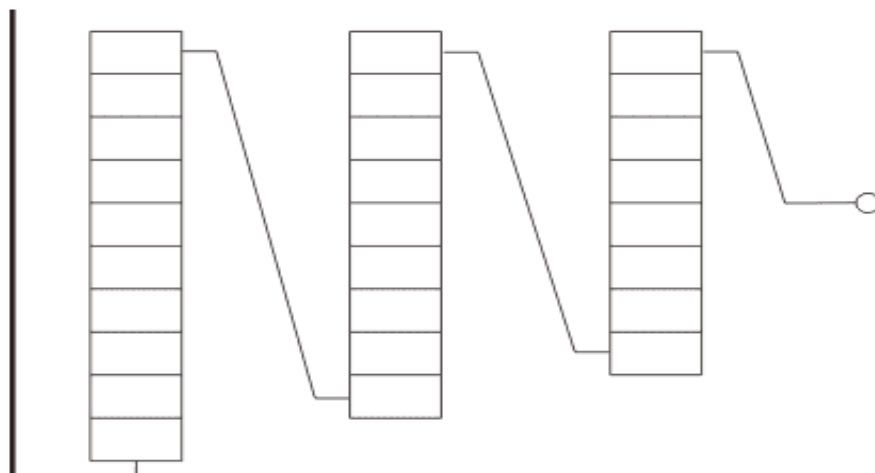


Figura 1.7 devanados helicoidal multicapa (TRANSFORMADOR P. D.)

Se construye de tal forma que las capas externas sean más cortas que las capas internas para distribuir la capacitancia de manera uniforme. Estos devanados mejoran principalmente el comportamiento de sobretensión de los transformadores.

1.1.2.1.6 Crossover sinuoso

Se utilizan estos bobinados para devanados de alta tensión en pequeños transformadores. Los conductores son cables o tiras redondas cubiertas de papel. Los bobinados se dividen en varias bobinas para reducir el voltaje entre las capas adyacentes. Estas bobinas están separadas axialmente por una distancia de 0,5 a 1 mm. Los voltajes entre bobinas adyacentes no deben ser más de 800 a 1000 V (TRANSFORMADOR P. D.).

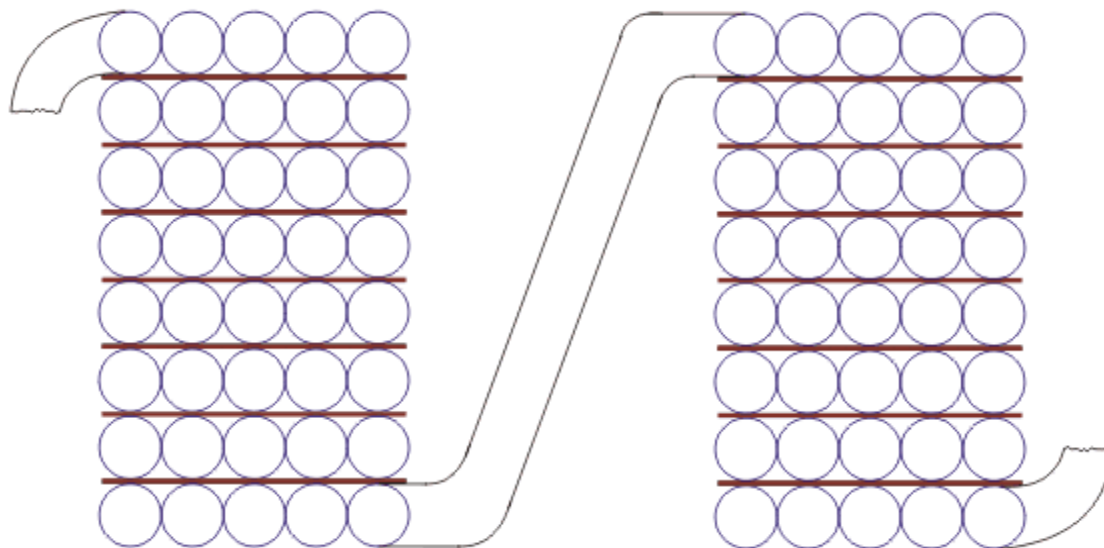


Figura 1.8 devanados tipo cross over (TRANSFORMADOR P. D.)

El extremo interior de una bobina está conectado al extremo lateral de salida del lado adyacente, como se muestra en la Ilustración 1.8. La longitud axial real de cada bobina es de aproximadamente 50 mm, mientras que la separación entre dos bobinas es de aproximadamente 6 mm para acomodar bloques de material aislante. El ancho de la bobina es de 25 a 50 mm. El devanado cruzado tiene una mayor resistencia que el devanado cilíndrico en condiciones normales. Sin embargo, el crossover tiene una fuerza de impulso más fuerte que la cilíndrica. Este tipo también consume más costes laborales (TRANSFORMADOR P. D.).

1.1.2.1.7 Disco y bobinado de disco continuo

Principalmente utilizado para un transformador de alta capacidad. El bobinado consiste en una serie de bobinas planas o discos en serie o en paralelo. Las bobinas están formadas con tiras rectangulares enrolladas en espiral desde el centro hacia afuera en la dirección radial, como se muestra en la Ilustración 1.9 (TRANSFORMADOR P. D.).

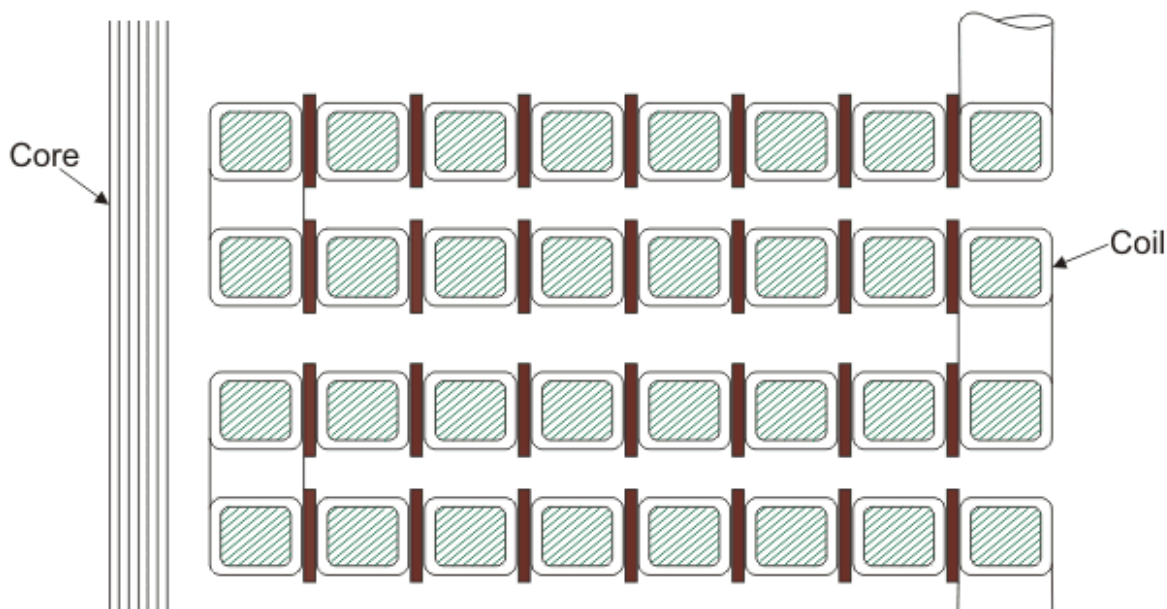


Figura 1.9 devanados de discos continuos [(TRANSFORMADOR P. D.)]

Los conductores pueden ser una sola tira o múltiples tiras en una hendidura paralela en el lado plano. Esto hace que la construcción sea más robusta para este tipo de devanados. Los discos están separados entre sí con sectores de cartón prensado unidos a tiras verticales. Los espaciadores verticales y horizontales proporcionan conductos radiales y axiales para la libre circulación del aceite que entra en contacto con cada giro. El área del conductor varía de 4 a 50 mm cuadrados y los límites para la corriente son de 12 a 600 A. El ancho mínimo del conducto de aceite es de 6 mm para 35 kV. La ventaja del disco y los devanados continuos es su mayor resistencia mecánica y su bajo costo (TRANSFORMADOR P. D.).

1.1.2.1.8 Bobinados para Transformador Tipo Shell

1.1.2.1.9 Tipo Sandwich sinuoso

Permite un control fácil sobre la reactancia en la que se encuentran juntas las dos bobinas más cercanas. Para el mismo eje magnético, mayor es la proporción de flujo mutuo y menor es el flujo de fuga. Las fugas pueden reducirse subdividiendo las secciones de baja y alta tensión. Las secciones finales de baja tensión contienen la mitad de las vueltas de las secciones normales de baja tensión denominadas medias bobinas.

Para equilibrar las fuerzas magnetomotrices de secciones adyacentes, cada sección normal, ya sea alta o baja tensión, lleva el mismo número de amperios-vueltas. Cuanto mayor sea el grado de subdivisión, menor será la reactancia (TRANSFORMADOR P. D.).

1.1.2.1.10 Ventajas de los devanados tipo Shell en transformadores

- Alta capacidad de resistencia al cortocircuito.
- Alta resistencia mecánica
- Alta resistencia dieléctrica
- Excelente control de flujo magnético de fugas.
- Capacidad de enfriamiento eficiente
- Diseño flexible
- Tamaño compacto.
- Diseño altamente confiable

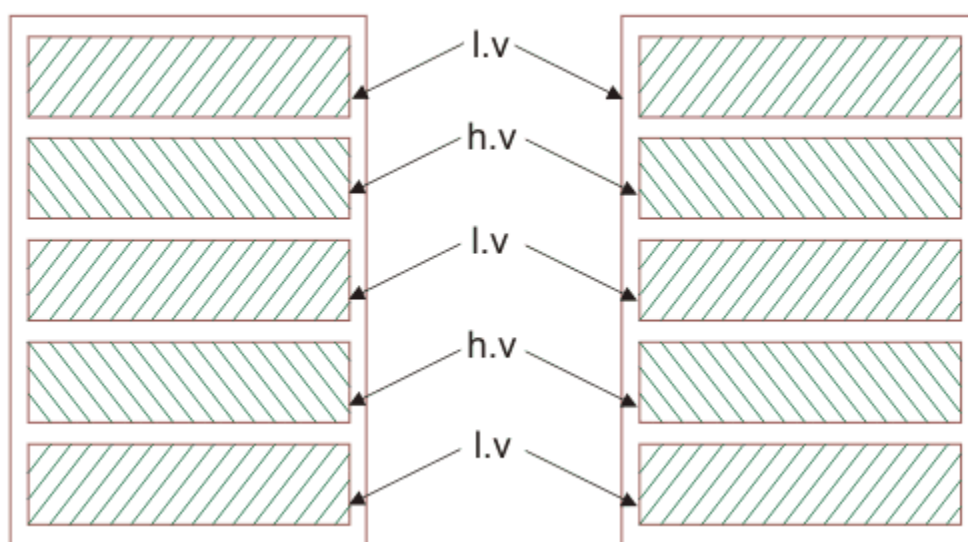


Figura 1.10 devanados tipo sándwich [(TRANSFORMADOR P. D.)]

Estos devanados están formados por bobinas primaria y secundaria, y en algunos casos de terciarias. Los conductores son normalmente de cobre electrolítica, aislados con esmalte y cubiertos con cintas de algodón o papel especial, eventualmente se usa conductor de aluminio.

De acuerdo con la clase de aislamiento pueden ser:

Clase	A	–	Límite	105°C
Clase	E	–	Límite	120°C
Clase	B	–	Límite	130°C
Clase	F	–	Límite	155°C
Clase H – Límite 180°C				

1.1.2.2 Núcleo magnético

Este núcleo está constituido de una gran cantidad de placas de acero al silicio de granos orientados, montadas en superposición, estas chapas de acero tienen un espesor variable y se fabrican de acuerdo con estándares internacionales, cuya nomenclatura más común es la de la Armco, que presentan códigos dados por los números 5, 6, 7 y 8. El número más bajo expresa placas que requieren menor corriente de excitación y menores pérdidas por histéresis. Las placas de acero al silicio son aleaciones que contienen al rededor del 5% de silicio, cuya función es reducir las pérdidas por histéresis y aumentar la resistencia del acero, permitiendo con esto reducir las corrientes parásitas (TRANSFORMADOR P. C.).

Las placas de acero al silicio son laminadas en frío, seguidas de un tratamiento térmico adecuado que permite que los granos magnéticos se orienten en el sentido de la laminación, están cubiertas por una fina capa de material aislante y se fabrican dentro de los límites máximos de pérdidas electromagnéticas, que varían entre 1.28 W/Kg y una densidad de flujo de 1.50 Tesla a 1.83 W/Kg, que corresponde a una densidad de flujo de 1.7 Tesla a la frecuencia industrial (60 Hz).

Las pérdidas específicas de las placas de acero al silicio de Armco usadas en la fabricación de **transformadores** y referidas a una inducción magnética de 15000 Gauss (15000 líneas/cm²) o bien 1.5 T. La eficiencia magnética del **transformador** depende en mucho de la calidad de la mano de obra en el armado del núcleo, el corte de la laminación y de las uniones. En transformadores de gran potencia se aplica un baño de un compuesto de resina epóxica para reducir las vibraciones magnéticas que pueden producir daños a la fina capa aislante que cubre a las placas; las vibraciones se detectan por lo general por un ruido intermitente en el interior del transformador (TRANSFORMADOR P. C.).

Cuando el aislamiento de las placas se ve afectado, las pérdidas del **transformador** aumentan en forma significativa debido a las corrientes de Foucault.

Las dimensiones del núcleo magnético se deben hacer equilibrando el número de espiras de la bobina con las dimensiones del núcleo de hierro. Si se usan bobinas con pocas espiras, entonces se debe emplear un núcleo magnético de grandes dimensiones. Por el contrario, si se usan bobinas con muchas espiras entonces el núcleo de acero reduce sus dimensiones (TRANSFORMADOR P. C.).

1.1.2.3 Aislante

Los transformadores están constituidos principalmente por dos sistemas de aislamiento, el sólido y el líquido. El aislamiento líquido es un aislamiento de un fácil mantenimiento y tratamiento para la recuperación de sus propiedades, de hecho, si está muy deteriorado se podrá sustituirlo con un costo moderado. Además, el aceite actúa como elemento refrigerante conduciendo el calor desde la parte activa del transformador, núcleo y arrollamiento, hacia el exterior. Sin embargo, el

aislamiento solido es el encargado de recubrir el cobre del interior del transformador, por lo que no es pensable la sustitución del mismo o tratarlo. La no accesibilidad del aislamiento solido del transformador hace más complicado el diagnostico, por lo que dicho diagnostico se realiza por medio del aceite aislante (aislante liquido). El estado de envejecimiento de un transformador es de vital importancia para poder planificar su sustitución. Si un transformador se pone fuera de servicio antes de tiempo se está desaprovechando dicha máquina, lo que supone usos de recursos poco eficientes. Si por lo contrario no fuese retirado de servicio un transformador que esta al final de su vida útil se correrá los riesgos de fallos y a causa del mismo puede conllevar a perjuicios económicos por reclamos de usuarios, multas, etc. El conocimiento de la vida de un transformador no es algo simple ya que la pérdida de vida depende de muchos factores tal como la calidad de fabricación, calidad de mantenimiento, temperatura ambiente, grado de carga, etc (WILLIAM SALVADOR, 2014).

Así teniendo un buen seguimiento continuo y adecuado de mantenimiento dará como resultado un aproximado de su estado y así poder prestar a sus usuarios, un servicio de energía eléctrica que cumpla con los índices o indicadores de calidad exigidos por las normas de la SIGET. Esto lleva a poner una particular atención al estado de transformador y a sus aislantes, especialmente al aislante líquido, ya que a través de él se puede dar cuenta del buen o mal funcionamiento que presente el transformador, y así poder prevenir futuras fallas o perturbaciones a los usuarios, también así poder prever el reemplazo del mismo (WILLIAM SALVADOR, 2014).

1.1.2.3.1 Aislamiento sólido.

El sistema de aislamiento solido de los transformadores de potencia sumergidos en aceite está constituido por papel Kraft y Carton Prensado (o pressboard), y debido a su función es considerada la parte más importante del sistema de aislamiento ya que separa los devanados en la parte activa, los cuales si sufren degradación reducen considerablemente la vida útil del transformador. El aislamiento solido está diseñado a base de celulosa tratados por el método Kraft, el cual es un proceso que consiste en la cocción de troncos de madera con una solución alcalina de sulfato de sodio e hidróxido de sodio, usando el primero como solución catalizadora, y de este procedimiento resultan papeles térmicamente mejorados para usarse como aislamientos sintéticos, que en general poseen diferentes espesores y densidades acordes a los esfuerzos dieléctricos y mecánicos a los que son sometidos durante la operación del transformador. Su función en la operación del transformador es aislar las partes metálicas con tensión, dividir los espacios de aceite en volúmenes más pequeños aptos para soportar mayores gradientes de campo y soportar mecánicamente los conductores y arrollamientos con el resto de la estructura. El aislamiento sólido también se utiliza para formar sistemas de barreras divisorias en el aceite, dividiendo el espacio entre arrollamientos en canales y aumentando así la rigidez dieléctrica del aceite en los canales. El aislamiento a partir de pura celulosa "kraft" proporciona excelentes características de impregnación de aceite, por lo tanto un excelente rendimiento en los campos eléctricos, tiene una buena estabilidad geométrica en aceite, es fácil de moldear, de alta densidad, uniforme, alta rigidez mecánica, buena flexibilidad, alta rigidez dieléctrica (mayor que la del aceite mineral), resistencia térmica, buena transferencia

de calor y es, con mucho, el aislamiento sólido más económico para la refrigeración en aceite de transformadores de potencia (WILLIAM SALVADOR, 2014).

1.1.2.3.2 Clasificación de los aislamientos sólidos.

En el siguiente esquema se muestra como está constituido el aislamiento de un transformador de potencia. En el interior del transformador existen distintos aislamientos celulósicos papeles y cartones prensados,

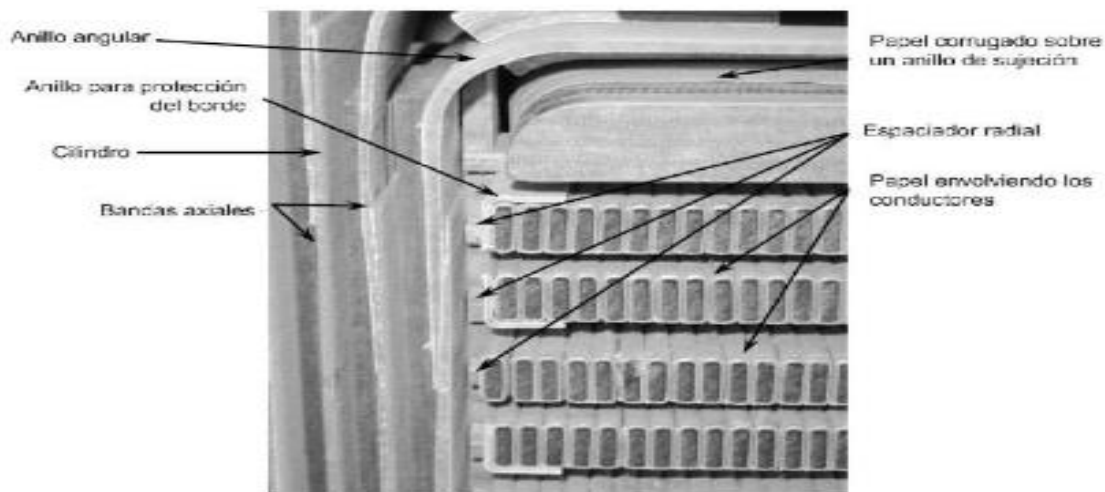


Figura 1.11 Interior de un transformador

Estos aislamientos se suelen clasificar en aislamientos delgados y calientes, aislamientos delgados y fríos, y aislamientos gruesos.

1.1.2.3.3 Aislamientos delgados y calientes. (WILLIAM SALVADOR, 2014)]

Son los aislamientos que están en contacto directo con los conductores y suelen estar constituidos por papel Kraft, por lo que son los aislamientos menos densos. En total suponen alrededor de un 20% de la masa total del aislamiento sólido. Su temperatura se mantiene próxima a la del conductor, y se estima que un 5% de ellos está a una temperatura próxima a la del punto caliente (WILLIAM SALVADOR, 2014).

1.1.2.3.4 Aislamientos delgados y fríos

Dentro de esta categoría se clasifican todos los cartones prensados, y en general todos los elementos dieléctricos de los arrollamientos que no están en contacto directo con los conductores. La temperatura de estos aislamientos es similar a la del aceite. Los aislamientos delgados y fríos tienen una densidad entre media y baja. Suponen entre el 20% y el 30% de la masa total del aislamiento sólido (WILLIAM SALVADOR, 2014).

1.1.2.3.5 Aislamientos gruesos

Son las piezas celulósicas utilizadas para sujetar mecánicamente los conductores. Representan alrededor del 50% de la masa total de aislamiento sólido. Están constituidos por materiales celulósicos de elevada densidad y suelen presentar temperaturas más reducidas que otras zonas del transformador (WILLIAM SALVADOR, 2014).

1.1.2.3.6 Características químicas y físicas del papel aislante

1.1.2.3.7 Características químicas.

El papel está formado por fibras de celulosa extraída de compuestos, tales como las fibras de algodón, la madera, etc. Sin embargo, la celulosa no se encuentra en estado puro en la naturaleza. La fibra de algodón es, probablemente, la fuente natural de celulosa más pura que existe ya que contiene un 95% de ésta. Aun así, contiene, aproximadamente un 5% de otras sustancias

El papel además de celulosa contiene ligninas y hemicelulosas. Las ligninas son polímeros aromáticos complejos. Las hemicelulosas no son derivados de las celulosas y constituyen un gran número de polisacáridos unidos a las fibras de celulosa a través de enlaces de hidrógeno. Dependiendo de las especies, la madera contiene, en seco, entre un 40% y un 50% de celulosa, entre un 15% y un 35% de lignina y entre un 25% y un 40% de hemicelulosas (WILLIAM SALVADOR, 2014)

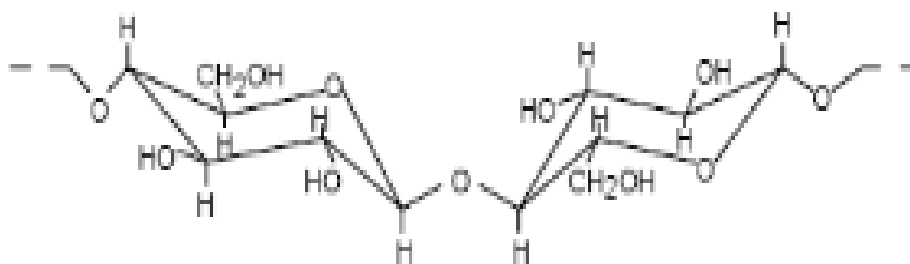


Figura 1.12 Composición química del papel aislante [(WILLIAM SALVADOR, 2014)

Después del tratamiento, la composición química del papel es la siguiente: 89% de celulosa, 7-8% de pentosas y 3 -4% de lignina

1.1.2.3.8 Características físicas.

El papel aislante usado en los transformadores de potencia tiene que tener unas características específicas. Se utiliza papel con un espesor entre 30 y 120 μm , y una densidad aproximada entre 0.7 y 0.8 g/cm^3 . Es una práctica común especificar la masa por unidad de superficie (g/m^2), la

cual es el producto del espesor por la densidad; por ejemplo, la masa por unidad de superficie de un papel de 30 μm de espesor y 0.7 g/cm^3 de densidad es 21 g/m^2 (WILLIAM SALVADOR, 2014)

1.1.2.3.9 Envejecimiento del papel aislante

El proceso de envejecimientos del papel es esencialmente una despolimerización. Cuando los vínculos entre las unidades en las cadenas de celulosa se rompen, el grado de polimerización y la resistencia mecánica se reducen.

Cuando se obtiene el papel, éste presenta un grado de polimerización (DP) aproximadamente de 1200. Después de pasar por el proceso de secado en la fábrica éste DP se reduce a 1000 con un contenido en agua de 0,5%, comúnmente cuando el DP a caído cerca del 200, La resistencia a la tracción se reduce en torno a un 20 % de su valor original. La resistencia a la tracción mecánica del papel depende de su grado de polimerización. Por debajo de un grado de polimerización de 200 no se garantiza que el transformador sea capaz de soportar los esfuerzos de repulsión de cortocircuitos y el transformador debe destruirse. En un transformador de potencia se producen muchos procesos de envejecimiento debido a factores internos que se dan cuando el transformador está en servicio. El aislamiento sufre principalmente por reacciones químicas tales como pirolisis (degradación térmica), la oxidación (oxígeno en el aislante) y la hidrólisis (humedad) (WILLIAM SALVADOR, 2014)

1.1.2.4 Aceite

La función primaria del aceite aislador es proporcionar un medio dieléctrico que actúa como aislante que rodea los conductores energizados. Otra función del aceite aislador es proporcionar una capa protectora a las superficies metálicas en el dispositivo. Esta capa protege contra reacciones químicas, tales como oxidación, que puede influenciar la integridad de conexiones, afectar a la formación de moho, y contribuir a la contaminación consiguiente del sistema. Una función secundaria del líquido aislador es servir como disipador del calor. Esto es de particular importancia en los transformadores, donde el calentamiento localizado de las bobinas y el núcleo suelen ser severas. La ayuda del aceite está en la eliminación del calor de estas áreas y distribución de energía térmica sobre una masa generalmente grande de aceite y el tanque del dispositivo. El calor del aceite se puede entonces transferir mediante la conducción, la convección, y la radiación al ambiente circundante.

Para asegurarse de que un aceite dado realice satisfactoriamente la función de disipación de calor, varias especificaciones se ponen en el aceite; las cuales, se basan sobre ciertos factores que influyen en la capacidad de disipar calor sobre una amplia gama de condiciones de funcionamiento posibles. Estos factores incluyen propiedades tales como: viscosidad, punto de congelación, y punto de inflamación (WILLIAM SALVADOR, 2014).

1.1.2.5 Bornas (bushings) de transformadores

Uno de los elementos fundamentales del transformador son las bornas o pasa tapas, que como es sabido tienen como función la de servir de interconexión entre los bobinados y las redes externas, y que, por una parte, han de conducir la corriente y por otra, aislar el conductor a su paso a través de la tapa o cuba del transformador y conseguir evitar el escape del dieléctrico.

Se pueden establecer las siguientes clasificaciones:

- Según estructura del cuerpo aislante: bornas con aislamiento sólido (tipo DIN) y bornas condensadoras.
- En función de los medios que interconectan: bornas aceite-aire, aceite-aceite y aceite-gas SF6 (Figura 1.13-1.16).



Figura 1.13 Bornas aceite/aire con cuerpo aislante de silicón y porcelana para rangos de tensión entre 24 y 550 kV y corriente hasta 5000 A [(BUSHINGS)]



Figura 1.14 Bornas aceite/SF6 para rangos de tensión entre 36 y 550 kV y corriente hasta 4000 A [(BUSHINGS)]



Figura 1.15 Bornas aceite/aceite para rangos de tensión entre 72,5 y 550 kV y corriente hasta 4000 A [(BUSHINGS)]

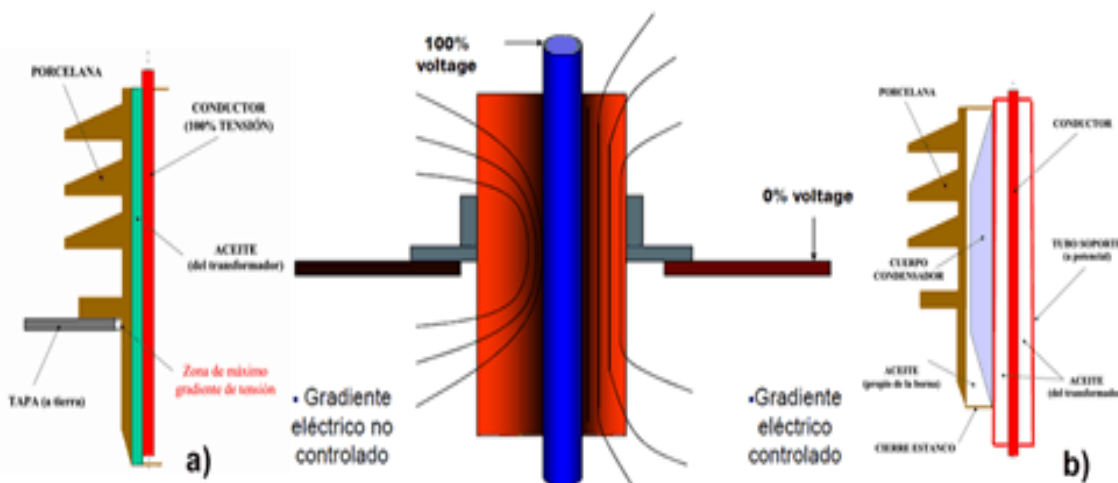


Figura 1.16 Borna aceite/aire para rangos de tensión entre 69 y 550 kV y corriente hasta 5000 A, para altos niveles sísmicos [(BUSHINGS)]

En las bornas con aislamiento sólido, el máximo gradiente de potencial se produce al paso del conductor por el orificio practicado en la tapa; este gradiente lo soporta tanto la porcelana como el aceite existente entre aquélla y el conductor, de ahí, que actualmente no se utilicen para tensiones superiores a los 52 kV de tensión máxima de red; puesto que, para tensiones más elevadas, el gran tamaño de la porcelana y la cantidad de aceite interpuesto las hacen prácticamente inviables.

Para poder elevar el nivel de tensión en las líneas de transporte se requería diseñar bornas para los transformadores de dimensiones adecuadas y fiables.

Estos requerimientos dieron lugar al desarrollo de la borna tipo condensador, el principio de funcionamiento está basado en reducir de forma progresiva el gradiente de potencial hasta hacerlo cero a su paso por el orificio de la tapa (figuras 1.17) (BUSHINGS).



a) Borna sin condensador.

b) Borna con condensador.

Figura 1.17 Gradiente eléctrico en Bornas, (BUSHINGS)

La borna condensadora está compuesta por los mismos elementos que la borna con aislamiento sólido, pero incorporando una estructura condensadora.

El condensador (ubicado en el interior del cuerpo aislante de porcelana o silicona y rodeando al conductor) está formado por varias capas metálicas separadas por láminas aislantes. La primera capa del condensador se conecta al conductor, es decir está al 100% de potencial, y la más externa se une a tierra, de esta forma la tensión se reparte entre todas las capas del condensador de manera uniforme (figura 1.18) (BUSHINGS).

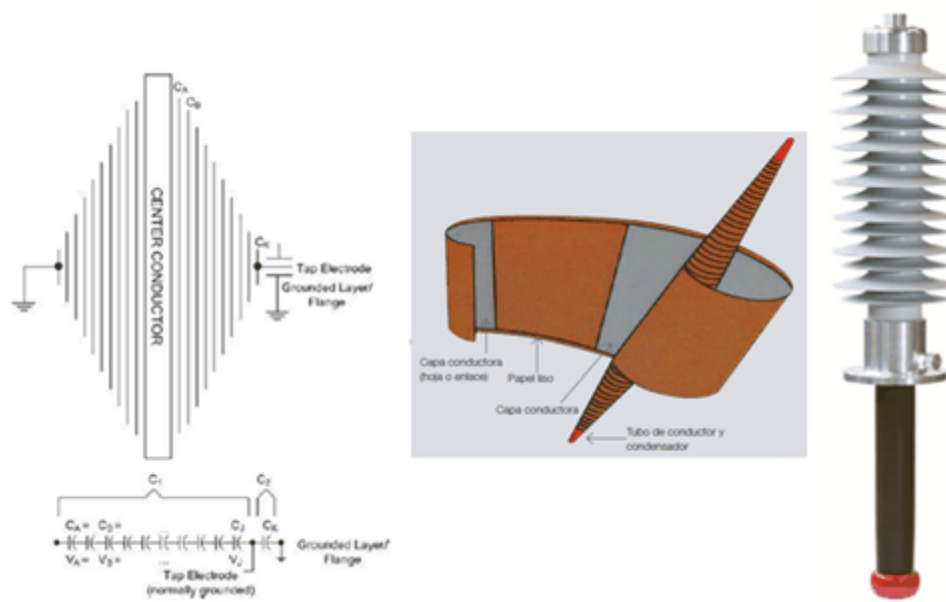


Figura 1.18 Principio de funcionamiento de las Bornas condensadoras [(BUSHINGS)

En este tipo de bornas, el cuerpo de porcelana o silicona básicamente realizan una función mecánica, es decir se utiliza para proteger el condensador y hacer más rígido el conjunto.

1.1.2.5.1 Bornas con cuerpo aislante sólido (porcelana)

Estas bornas, denominadas también tipo “DIN”, están compuestas básicamente por los siguientes elementos.

- Un cable o varilla conductora elemento de unión entre el bobinado y la línea exterior.
- Un cuerpo de porcelana que envuelve a conductor aislándolo a su paso por la tapa.
- Una carcasa metálica dotada de un sistema de apriete, que mediante una junta anular semi-tórica de neopreno realiza un cierre hermético con la porcelana y evita la salida del aceite del transformador. La caperuza dispone de un orificio normalmente tapado con un tornillo roscado que permite efectuar el purgado de aire.

Suele llevar también otro taladro roscado para alojar el descargador superior.

- En unos casos una brida metálica, y en otras piezas de presión (“garras”) individuales que sirven de elemento de presión para mantener rígidamente unida la borna a la tapa del transformador.
- Una junta (plana o toroidal) se monta entre borna y la tapa para asegurar la estanqueidad y evitar el derrame de aceite.

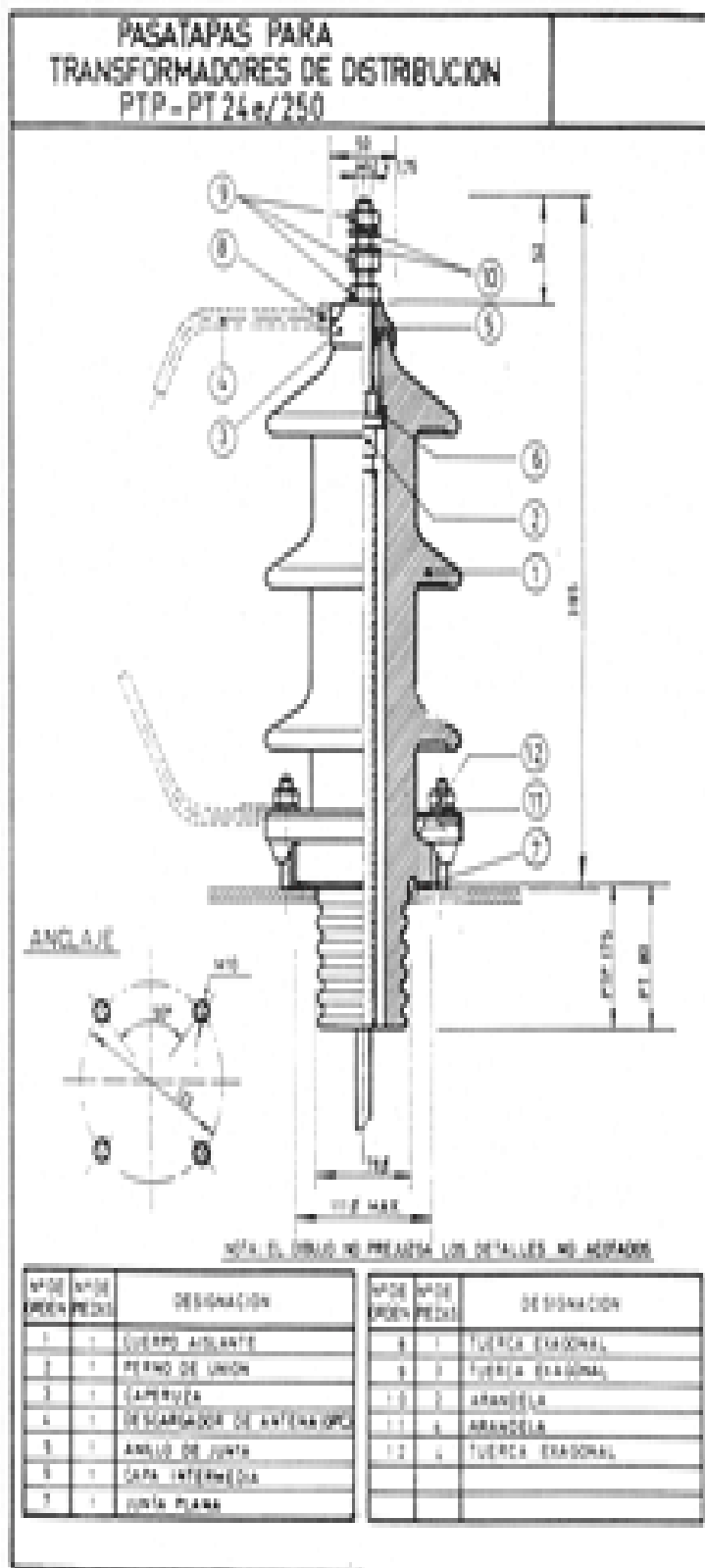
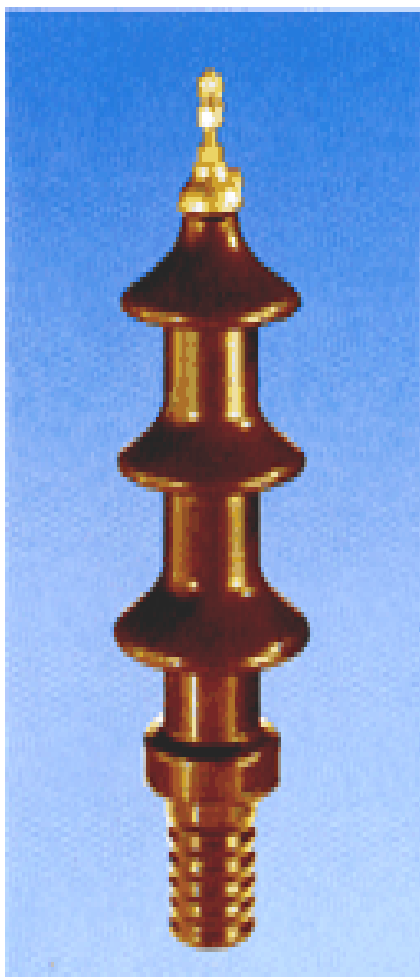


Figura 1.19 Bornas para Transformadores Media Tensión tipo DIN [22]

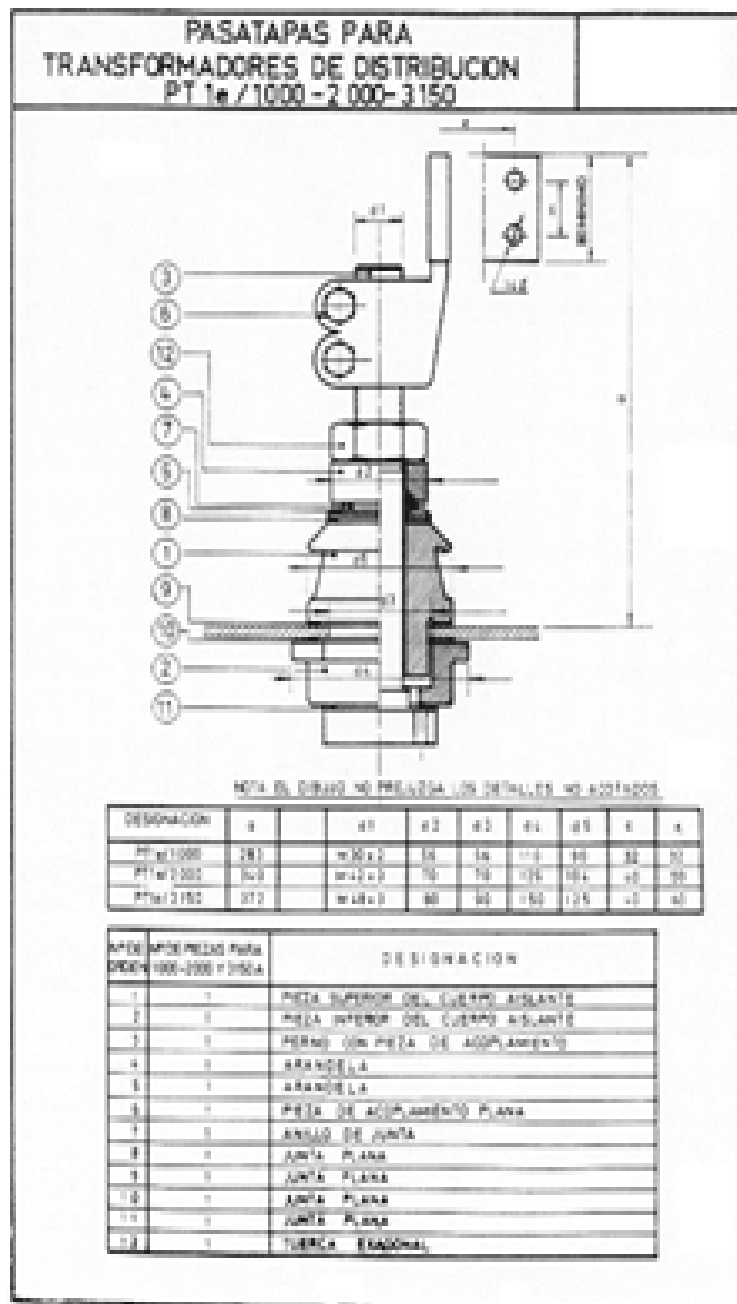


Figura 1.20 Bornas para Transformadores Baja Tensión tipo DIN

El aceite del transformador (excepto en transformadores de distribución del tipo “hermético de llenado integral”) debe bañar totalmente el espacio entre la parte interior de la porcelana y el conductor, de ahí la necesidad de disponer de un tornillo de purga que permita evacuar el aire que pueda quedar ocluido en el interior de la borna (BUSHINGS).

Actualmente la gama de utilización de estas bornas se extiende desde 1 kV a 52 kV de tensión máxima de red y desde 250 a los 3.150 A de intensidad nominal.

1.1.2.5.2 Bornas condensadoras

Las bornas condensadoras constan básicamente de los siguientes elementos:

- Cable o varilla conductora: por un extremo mediante un conductor, se une al bobinado y por el otro se conecta a una pieza metálica terminada en un perno externo para efectuar la conexión a la línea exterior con un conector de presión. Generalmente se utiliza cable flexible hasta los 800 A, y varilla rígida para intensidades mayores. Esta varilla termina en un deflector, elemento metálico de forma redondeada y puesto a potencial con objeto de uniformizar el campo eléctrico en torno a la unión (BUSHINGS).
- En este último caso, la unión del cable del bobinado a la borna queda dentro de un receptáculo
- Condensador: bobinado sobre un tubo metálico puesto a potencial y que rodea al conductor (cable o varilla).
- Cuerpo de porcelana o silicona que envuelve al condensador protegiéndolo y haciendo rígido el conjunto y bañado por aceite propio. Incorpora una brida metálica como elemento de unión a la tapa del transformador.
- Carcasa: que sirve como depósito conservador para la expansión del aceite de la borna; generalmente dispone de un indicador de nivel y un tapón para relleno del aceite propio de la borna. Este mismo orificio (situado en la parte superior de la carcasa) sirve para la verificación del nivel de aceite de la borna cuando ésta carece de nivel (BUSHINGS).



Figura 1.21 Válvula de toma de muestras de aceite [(BUSHINGS)

- Toma capacitiva: es un dispositivo que permite (a voluntad) el conectar o desconectar a tierra la última capa del condensador con objeto de verificar el estado del aislamiento del mismo. Consiste en una pequeña caja dentro de la cual se ubica un terminal unido internamente al condensador; un tapón roscado (o atornillado) a la caja, protege al terminal y lo pone a tierra mediante una pinza interna. Para efectuar medidas de aislamiento y capacidad se desmonta el tapón quedando entonces el terminal libre y a la vista, y por tanto el condensador aislado y dispuesto para medidas.

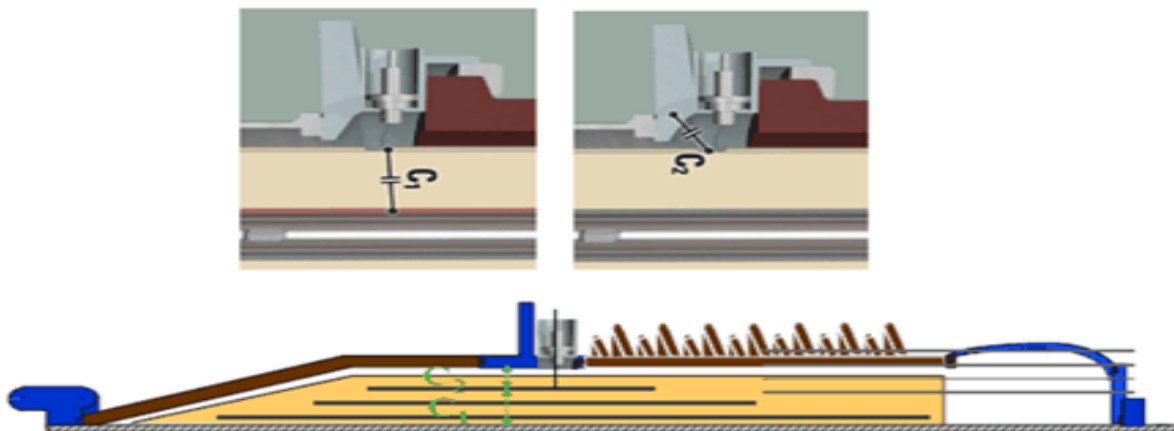


Figura 1.22 Toma de pruebas para medidas de aislamiento y capacidad [(BUSHINGS)]

El aislamiento del condensador puede ser de tres tipos:

- **RBP** (resin-bonded paper): para el condensador de estas bornas se utiliza papel tratado con resina (papel bakelizado). Durante la fabricación del bobinado del condensador se da calor al conjunto con objeto de conseguir la polimerización de la resina que impregna el papel. Actualmente las bornas de este tipo han dejado de fabricarse, aunque existen muchas unidades aún en servicio.
- **RIP** (resin impregnated paper): son aquéllas en las que se utiliza papel sin tratamiento alguno, y posteriormente una vez finalizado el bobinado sufren un proceso de impregnación y secado en resina bajo vacío.
- **OIP** (oil-impregnated paper): este tipo utiliza igualmente papel sin tratar, y finalizado el bobinado tras un cuidadoso secado se impregna de aceite también bajo vacío.

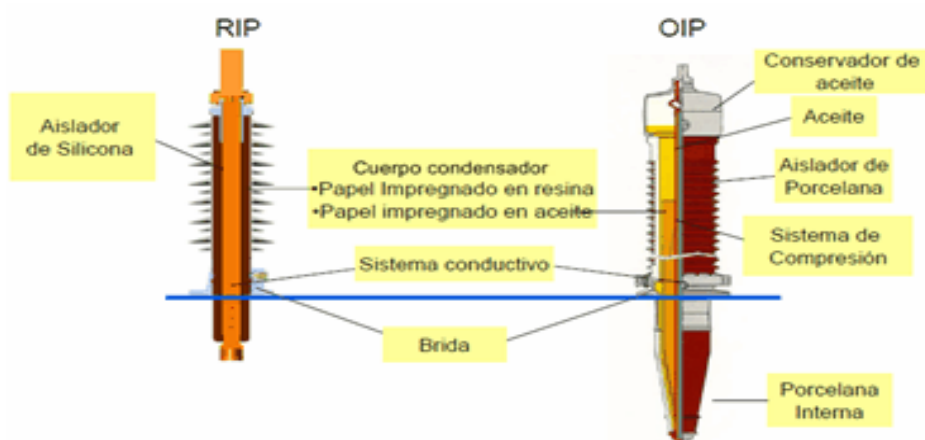


Figura 1.23 Comparación de características constructivas de pasatapas RIP y OIP [(BUSHINGS)]

El cuerpo aislante de porcelana o silicona de las bornas del tipo aceite-aceite o aceite-SF6 son lisas, es decir carecen de “rizos” ya que el dieléctrico en que van inmersas tiene una capacidad aislante muy superior a la del aire.

Las Bornas se fabrican hasta las tensiones que el mercado solicite, donde 1100 kV en CA y 800 kV en CC son las tensiones mayores que actualmente se utilizan en sistemas eléctricos, para fines de pruebas se han fabricado hasta tensiones de 1800 kV en CA con longitud de aisladores de 15 m (BUSHINGS).

1.1.2.6 Tap

El TAP de un transformador es un selector mecánico de se sobrepone al bobinado primario un numero de espiras para que la tensión de salida sea la adecuada según la regulación de tensión que se ha de operar. Los transformadores están normalmente equipados con un conmutador de 5 posiciones en el lado de media tensión generalmente con el mando situado sobre la cuba del transformador (GARCÍA).

En transformadores de distribución con TAP siempre se deben operar cuando el transformador no se encuentra energizado; puesto que, si llegase a operar energizado, la descarga que produciría en toda la red podría dañar todas las cargas conectadas (GARCÍA).



Figura 1.24 variador de TAP [(GARCÍA)]

2 CAPITULO II

2.1 Propiedades del Aceite Dieléctrico

2.2 Aceite Dieléctrico para Transformadores

El aceite en los transformadores desempeña la función de servir como aislante y refrigerantes. Su mecanismo de operación es impregnar el papel que envuelve el cobre de las bobinas en el transformador y transportar el calor generado en este punto por las variaciones de corrientes, al exterior. El aceite evita la formación de arcos eléctricos, la ruptura eléctrica de los gases acompañados por la descarga y la ionización resultante conocida como corona, protege al equipo frente a descargas eléctricas en su interior las que pueden dañar la aislación, sus partes, o en el peor de los casos, provocar una pérdida total del transformador.



Figura 2.1 Aceites para transformadores (mineral)

La eficiencia de un transformador no solo depende de su diseño y la forma de operación, sino también de las características del lubricante utilizado para su refrigeración y aislamiento. De hecho, tal como ocurre en otras aplicaciones, los lubricantes para transformadores deben cumplir una variedad de funciones.

2.3 Funciones Desempeñadas por los Aceites en el Transformador (Brettis, 2018)

2.3.1 Refrigeración

La función más importante que debe desarrollar un aceite dieléctrico es la de enfriamiento y disipación del calor generado durante la operación de los transformadores. Para cumplir de una forma eficaz con este propósito, el aceite debe poseer no solo una buena fluidez, sino también excelente estabilidad térmica y a la oxidación que le permita circular libremente sin dejar depósitos. Para esto se requiere un aceite de baja viscosidad cuidadosamente refinado para prevenir la formación de lodos.

2.3.2 Aislamiento

La función eléctrica de un aceite para transformador es prevenir la formación de arco entre dos conductores con una diferencia de potencial grande. Solamente con un aceite que esté esencialmente libre de contaminantes y permanezca así a través de todo el periodo de su vida de servicio pueden cumplirse totalmente los requisitos de aislamiento eléctrico. Para ser un excelente aislante el aceite debe tener baja viscosidad, buenas propiedades dieléctricas y buena capacidad de disipar el calor.

2.3.3 Lubricación

El aceite debe proveer una película químicamente inerte y de naturaleza apolar que asegure la protección de las partes metálicas y de los materiales presentes en un transformador, sin reaccionar con ellos.

2.4 Tipos de Aceites para Transformadores

2.4.1 Aceite Mineral

Los aceites dieléctricos de origen mineral se obtienen de un derivado secundario del petróleo en cuya composición predominan los hidrocarburos nafténicos.

Las propiedades de un buen aceite de transformador no son propias o no están presentes, en forma exclusiva, en un determinado tipo de hidrocarburo, sino que por el contrario se encuentran repartidas entre varios (Nafténicos, parafínicos y aromáticos). Una composición típica de un buen aceite dieléctrico responde a las siguientes proporciones:

- Hidrocarburos Aromáticos: 4 a 7%
- Hidrocarburos Isoparafínicos: 45 a 55%
- Hidrocarburos Nafténicos: 50 a 60%

Los aceites minerales representan el 90% del volumen de ventas de aceites dieléctricos a nivel mundial, casi todo usado en transformadores e interruptores de potencia. Una cantidad menor es usada en capacitores y cables.

2.4.1.1 Composición de un Aceite Dieléctrico Mineral

La mayoría de los lubricantes dieléctricos están basados en aceites minerales sin aditivos y sólo en caso de aplicaciones severas se emplean aceites aditivados con inhibidor de oxidación.

El proceso de fabricación involucra la destilación del crudo y su posterior refinación mediante algunos de los siguientes tratamientos: Por ácidos, extracción por solventes o hidrogenación.

2.4.1.2 Aceites Bases

Son hidrocarburos que como su nombre lo indica solo contienen carbono e hidrógeno, como componentes principales, además de las impurezas inherentes a los derivados del petróleo que son el azufre, y en una menor proporción, el nitrógeno. Es conveniente mencionar que no todos los hidrocarburos que normalmente se encuentran en los productos o fracciones del petróleo pueden realizar eficazmente las funciones que los aceites dieléctricos deben cumplir en los transformadores e interruptores de potencia.

Los aceites dieléctricos son una mezcla de hidrocarburos nafténicos, Isoparafínicos y aromáticos, cuya composición varía de acuerdo con el crudo del que se destilan y del método de refinación empleado. Cada uno de estos tipos de hidrocarburos tienen diferentes características que le aportan al producto final, estas son:

2.4.1.3 Aromáticos

Bajo coeficiente de expansión, que dificulta la disipación de calor y con ello la función de refrigeración o enfriamiento que le corresponde al aceite dieléctrico, cuando están en exceso.

Baja estabilidad a la oxidación, pero forman compuestos químicos estables que no presentan subsiguientes reacciones de oxidación, actuando como "capturadores" de oxígeno.

Alto poder de solvencia frente a las lacas y resinas (bajo punto de anilina), que puede fácilmente arruinar el aislamiento de los devanados, dependiendo de las especificaciones de las lacas y resinas del recubrimiento.

Conviene recordar que el lodo, originado en la oxidación prematura de los aromáticos, se acumula en los conductos por donde debe circular el aceite y dificulta su función refrigerante. Sin embargo, algunos compuestos aromáticos actúan como INHIBIDORES NATURALES de oxidación, y por lo tanto, su presencia en pequeña proporción es siempre deseable y necesaria.

2.4.1.4 Isoparafínicos

Punto de fluidez es menor que en los parafínicos, permitiendo que el aceite fluya fácilmente a bajas temperaturas y ejerza su función refrigerante.

Tienen menor tendencia a la formación de gases lo cual es muy conveniente para la operación de los transformadores.

Buena estabilidad a la oxidación.

2.4.1.5 Nafténicos

Buena estabilidad a la oxidación.

Excelente fluidez a baja temperatura.

Baja tendencia a la formación de gases y carbones ante descargas eléctricas.

Aceptable coeficiente de expansión.

Alta tensión interfacial.

Lo aceites minerales con un balance de hidrocarburos adecuado tienen un buen comportamiento por muchos años y a menudo por toda la vida del transformador. Sin embargo, en transformadores que operan bajo condiciones severas, el problema de la oxidación del aceite puede ocurrir en un tiempo más corto. Para los transformadores que operan bajo esas condiciones es preferible usar un aceite que contenga aditivo antioxidante o inhibidor de oxidación.

Estos aditivos son sustancias que alargan considerablemente el tiempo de inducción de oxidación. El inhibidor de oxidación más comúnmente utilizado en los aceites dieléctricos es un compuesto conocido con el nombre genérico de Di-Butil Paracresol, del cual existen pequeñas variaciones en composición, de acuerdo con su procedencia o método empleado en su producción

Al igual que los aceites no inhibidos, éstos deben estar libres de cualquier otra clase de aditivos.

No todos los aceites dieléctricos se comportan de la misma manera frente a los inhibidores de oxidación y, por tanto, siempre resulta conveniente conocer la “susceptibilidad del aceite frente al inhibidor de oxidación”, puesto que algunas veces, cuando se agregan cantidades adicionales de inhibidor se pueden obtener resultados contrarios a los esperados. Otro aspecto a tener en cuenta es la toxicidad de los inhibidores.

En la figura se ilustra el proceso completo de fabricación de un aceite dieléctrico, ya sea que se utilice tratamiento con ácidos, extracción por solventes o la hidrogenación, que es el método más aceptado hoy día, por su mínimo efecto sobre el medio ambiente.



Figura 2.2 Diagrama de fabricación de un aceite dieléctrico [(Brettis, 2018)]

2.5 Aceite Dieléctrico de Origen Vegetal

Está basado en semillas oleaginosas y aditivos de mejoría de desempeño de clase comestible. Es un refrigerante dieléctrico que se degrada rápido y totalmente en el suelo y en ambientes acuáticos. Es de color verde para destacar su perfil ambiental favorable, y distinguirlo del aceite mineral. Los ésteres son una amplia clase de compuestos orgánicos, sintetizados químicamente a partir de precursores orgánicos (ésteres sintéticos) o disponibles a partir de productos agrícolas (ésteres naturales).

2.6 Ésteres Sintéticos

La aplicación de aceites sintéticos como aislantes dieléctricos ha sido muy limitada. Recientemente se han empleado fluidos sintéticos a base de silicona y ésteres de falato en aplicaciones especiales donde un alto grado de seguridad y muy amplio tiempo de servicio es requerido. También, últimamente, se están ensayando aceites dieléctricos de naturaleza predominantemente parafínica. Las pruebas y su interpretación son prácticamente las mismas para un aceite sintético a base de silicona que para un aceite mineral. El test de oxidación no se requiere para las siliconas debido a que este material no se oxida (no forma lodos).

2.6.1 Aceites Siliconados

Este tipo de aceite es a base de silicona dimetílica (polímero de dimetil siloxano compuesta por cadenas alternadas de átomos de silicio y oxígeno y grupos de metilo unidos a los átomos de silicio), en la actualidad es uno de los compuestos menos peligrosos y uno de los mejores sustitutos de los PCB's.

Este tipo de aceite es altamente estable, con una capacidad de resistencia al fuego más alta que los aceites minerales y además es un refrigerante dieléctrico y no contaminante.

Si a un transformador proyectado para aceite mineral o PCB se lo refrigera con líquido siliconado, la potencia del transformador se reduce en 5-10% debido a su mayor viscosidad.

Se han empleado fluidos sintéticos a base de silicona en aplicaciones especiales donde un alto grado de seguridad y muy amplio tiempo de servicio es requerido¹.

2.7 Aplicaciones de Líquidos Aislantes en Transformadores

En la actualidad hay varios tipos de fluidos empleados como medio aislante en transformadores de distribución y potencia, en la tabla 2.1 se muestra un resumen de la aplicación de líquidos aislantes en transformadores.

Tabla 2.1 Grado de uso de aceites aislantes. (SIGET, 2003)

TRANSFORMADORES	ACEITE MINERAL	SILICONAS	ÉSTERES SINTETICOS	ÉSTERES NATURLES (aceites vegetales)
POTENCIA	USADO	NO USADO	USADO	USADO
DISTRIBUCIÓN	USADO	USADO	USADO	USADO
MEDICIÓN	USADO	NO USADO	NO USADO	NO USADO

2.8 2.5 Propiedades de los Aceites Dieléctricos Minerales

Para que un aceite dieléctrico cumpla adecuadamente con su trabajo debe tener ciertas características físicas, químicas y eléctricas. Las principales son:

¹ Gamez, 2016

2.9 Propiedades Físicas

2.9.1.1 Viscosidad

Por definición, la viscosidad de un fluido es la resistencia que dicho fluido presenta al moverse o deslizarse sobre una superficie sólida. Mientras más viscoso es el aceite, mayor será la resistencia que ofrecerá a moverse dentro del transformador y será menos efectiva su función de refrigeración.

Por esta razón, los aceites dieléctricos deben tener una baja viscosidad para facilitar la disipación del calor generado en la operación del transformador. Las viscosidades máximas de aceites minerales a temperaturas de evaluación, mediante el método ASTM D-445 o D-88, son:

100°C 3 cSt. “centistokes” (mm^2/s)

40°C 12 cSt.

0°C 76 cSt.

establecidas para aceites dieléctricos, a las diferentes

La ilustración 2.3 muestra el comportamiento típico de la viscosidad de un aceite dieléctrico con las variaciones de temperatura.

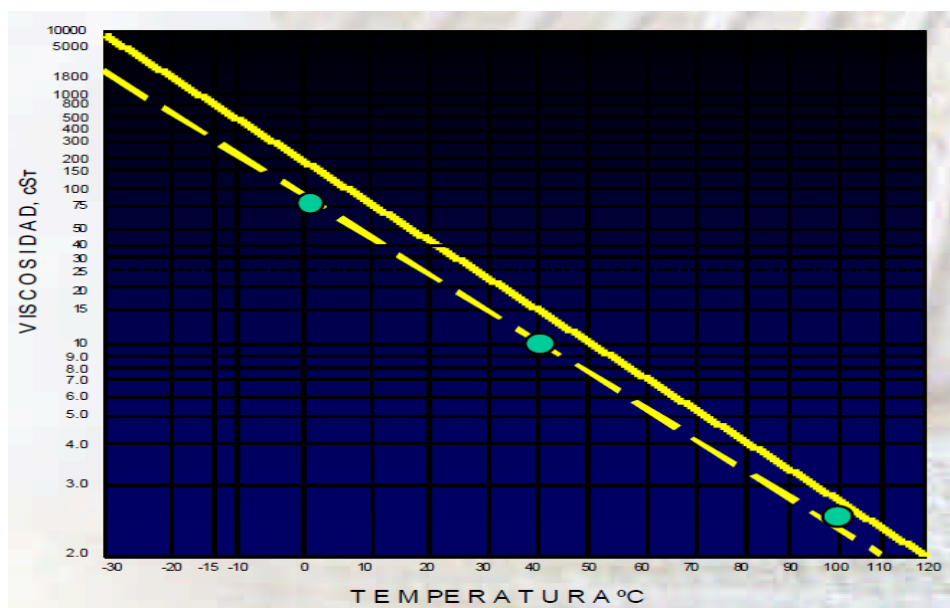


Figura 2.3 Curva de viscosidad vs temperatura de los aceites dieléctricos. [(Brettis, 2018)]

2.9.1.2 Punto de Fluides

Se define como la temperatura a la cual el aceite deja de fluir, mientras se somete a un proceso de enfriamiento progresivo. Este dato sirve para identificar diferentes tipos de aceites aislantes. Un punto de fluides igual o mayor que 0°C indica la presencia dominante de hidrocarburos

parafínicos, en tanto que puntos de fluidez del orden de -10°C son propios de las fracciones de petróleo en las cuales predominan los hidrocarburos isoparafínicos. Las fracciones de hidrocarburos nafténicos tienen puntos de fluidez entre -20 a -35°C y las fracciones de hidrocarburos aromáticos llegan a tener puntos de fluidez del orden de los -40 a -60°C .

Puntos de fluidez aceptables para aceites dieléctricos, evaluado mediante el método ASTM D-97, es de -40°C a -50°C .

2.9.1.3 Punto de Inflamación

Se define como la mínima temperatura a la cual el aceite emite una cantidad de vapores que es suficiente para formar una mezcla explosiva con el oxígeno del aire en presencia de una llama. El punto de inflamación de los aceites dieléctricos se ha fijado con un valor mínimo de 145°C y mientras más alto, será más segura su utilización en transformadores e interruptores de potencia.

2.9.1.4 Tensión Interfacial

Conviene recordar que la solubilidad de un líquido en otro y también la viscosidad de ellos dependen, en buena parte, de su tensión superficial. Así, por ejemplo, cuando dos líquidos tienen una tensión superficial muy diferente son insolubles, tal como sucede con el aceite y el agua. Ahora bien, en la interface o superficie de contacto de dos líquidos insolubles, se sucede una interacción molecular que tiende a modificar la tensión superficial de ambos líquidos en la zona de contacto; en este caso se habla de tensión interfacial, la cual casi siempre es referida al agua, como patrón de comparación.

Existen compuestos que se forman de la descomposición natural de los aceites dieléctricos de origen mineral, que son igualmente solubles tanto en el agua como en el aceite, modificando su tensión interfacial, causando un aumento considerable de la humedad de saturación del aceite y haciéndolo más conductor de la electricidad.

La tensión interfacial mínima aceptada para aceites dieléctricos, evaluada por el método

ASTM D-971, es de 40 dinas/cm.

2.9.1.5 Punto de Anilina

Temperatura a la cual un aceite dieléctrico se disuelve en un volumen igual de anilina. Sirve como parámetro de control de calidad, ya que un aceite dieléctrico con alto contenido de aromáticos disuelve la anilina a menor temperatura.

Temperaturas de disolución entre 78 y 86°C corresponden a un buen dieléctrico. El punto de anilina aceptado para aceites dieléctricos, evaluado mediante el método ASTM D-611, es de 63 a 84°C .

2.9.1.6 Color

La intensidad de color del aceite dieléctrico depende de los tipos de hidrocarburos que predominen en dicho aceite. Así, por ejemplo, las fracciones parafínicas e isoparafínicas son blancas y transparentes, color agua.

Las nafténicas varían de amarillo claro a amarillo verdoso. Las aromáticas poseen coloraciones que van desde el amarillo rojizo (naranja) al marrón oscuro.

Para los aceites dieléctricos se ha fijado un color máximo de 0,5 (amarillo claro), buscando que el aceite sea predominantemente nafténico. El color se determina mediante el método ASTM D-1500.

2.10 Propiedades Eléctricas

El aceite dieléctrico mineral es utilizado en transformadores como aislante para evitar el flujo de corriente entre las diferentes partes que están a diferentes niveles de tensión, evitar la ruptura eléctrica de los gases acompañados por la descarga y la ionización conocida como efecto corona, también desempeña la función de regular la temperatura de operación, enfriando las partes más calientes mediante el flujo del aceite.

2.10.1.1 Factor de Potencia

El factor de potencia mide las pérdidas de corriente que tienen lugar dentro del equipo cuando se encuentra en operación. Estas pérdidas de corriente son debidas a la existencia de compuestos polares en el aceite y a su vez son la causa de los aumentos anormales de temperatura que se suceden en los equipos bajo carga.

El factor de potencia máximo permisible (%), evaluado mediante el método ASTM D-924, es:

25°C0,05%

100°C0,3%

2.10.1.2 Rigidez Dieléctrica

La rigidez dieléctrica de un aceite aislante es el mínimo voltaje en el que un arco eléctrico ocurre entre dos electrodos metálicos. Indica la habilidad del aceite para soportar tensiones eléctricas sin falla. Una baja resistencia dieléctrica indica contaminación con agua, carbón u otra materia extraña. Una alta resistencia dieléctrica es la mejor indicación de que el aceite no contiene contaminantes. Los contaminantes que disminuyen la rigidez dieléctrica pueden usualmente ser removidos mediante un proceso de filtración (filtro prensa) o de centrifugación.

2.11 Propiedades Químicas

2.11.1.1 Estabilidad a la Oxidación

Los aceites dieléctricos, en razón de su trabajo, están expuestos a la presencia de aire, altas temperaturas y a la influencia de metales catalizadores tales como hierro y cobre, lo cual tiende a producir en el aceite cambios químicos que resultan en la formación de ácidos y lodos. Los ácidos atacan el tanque del transformador y reducen significativamente la capacidad aislante del aceite con las consecuentes pérdidas eléctricas. Los lodos interfieren en la transferencia de calor (enfriamiento), haciendo que las partes del transformador estén sometidas a más altas temperaturas, situación que también conduce a pérdidas de potencia eléctrica.

Como resulta obvio, es importante reducir al mínimo posible la presencia de estas sustancias perjudiciales (ácidos y lodos). Por esta razón es esencial el uso de aceites refinados que posean óptima resistencia a la oxidación y estabilidad química que garanticen amplios periodos de funcionamiento y alarguen la vida de los equipos.

2.12 Características del Aceite Dieléctrico de Origen Vegetal Según IEEE C57-147 (TRADUCCIÓN, 2019)

2.12.1 Punto de Inflamación y Combustión.

El punto de inflamación de un líquido inflamable es la temperatura más baja a la cual la presión de vapor es suficiente para formar una mezcla inflamable con aire cerca de la superficie del líquido. El punto de combustión es la temperatura más baja a la que se calienta un líquido en un recipiente abierto y obtiene suficientes vapores combustibles para encender y mantener un fuego durante 5s.

2.12.2 Densidad Relativa

La densidad relativa (gravedad específica) de un líquido aislante es la relación de los pesos de volúmenes iguales de líquido y agua a 15 ° C (60 ° F). La densidad relativa no es significativa para determinar la calidad de un líquido; se puede usar para determinar la idoneidad para el uso en aplicaciones específicas. En ciertos climas fríos, se puede formar hielo en equipos expuestos a temperaturas bajo cero (<0 ° C) y pueden flotar en líquidos que tienen densidades superiores a 0.91. Aunque las mediciones de densidad son demasiado insensibles para ser útiles para detectar muchos problemas de contaminación, cuando los resultados son significativamente

2.12.3 Estabilidad de Oxidación

Los ésteres naturales no son tan resistentes a la oxidación como los aceites minerales. Por esta razón, no se recomienda su aplicación en transformadores de respiración libre y otros equipos (por ejemplo, diseño de conservador sin cámara). Se deben tomar todas las medidas prácticas para evitar

la exposición continua a largo plazo al intercambio de aire ilimitado, especialmente a temperaturas de funcionamiento.

La oxidación se produce esencialmente solo en la superficie del líquido expuesto al aire, por lo que la exposición a una película delgada es más preocupante que el líquido en el tanque del transformador. Se recomienda minimizar el tiempo y la temperatura a la que las superficies con películas delgadas de ésteres naturales están expuestas al aire, incluidos núcleos y bobinas sin limpiar, radiadores, intercambiadores de calor, mangueras, accesorios, etc. Por ejemplo, la resistencia dieléctrica de la superficie de La celulosa impregnada con éster natural puede reducirse si su superficie se expone al oxígeno durante el tiempo suficiente para causar la polimerización. Los diferentes tipos de formulaciones de ésteres naturales pueden tener diferentes límites recomendados de tiempo de exposición al aire según el tipo de aceites base y el tipo y la cantidad de inhibidores de la oxidación.

La exposición al aire también debe limitarse para evitar la contaminación por humedad. Si la exposición al aire ambiente durante períodos prolongados es preocupante, se deberá consultar las recomendaciones del fabricante del líquido aislante sobre los límites de exposición al aire, la detección y el mantenimiento de los métodos de antioxidantes, la eliminación de la humedad y la guía de prevención de la exposición para cada marca de líquido en particular. Los ésteres naturales se oxidan de manera diferente a los aceites minerales. La oxidación provoca la polimerización de los líquidos, formando moléculas más grandes que permanecen en solución, cuya velocidad es altamente dependiente de la temperatura. A la inversa, la oxidación del aceite mineral forma ácidos reactivos de cadena corta y lodos carbonosos, que pueden precipitarse fuera del aceite. Sin embargo, si la superficie del líquido a granel está expuesta a un intercambio continuo de aire en el espacio de la cabeza durante varios años, la viscosidad de los ésteres naturales puede aumentar considerablemente, lo que resulta en una menor capacidad de enfriamiento del líquido. Esto puede requerir algún tipo de acción correctiva. Dicha polimerización de los ésteres naturales en el tanque del transformador no debe afectar la rigidez dieléctrica del sistema de aislamiento.

2.12.4 Numero Acido (ASTM D664 y ASTM D974)

El número de ácido (neutralización) para líquidos aislantes no utilizados y envejecidos en servicio es, en general, una medida de la cantidad de constituyentes ácidos en el líquido. La formación de componentes ácidos se asocia comúnmente con la oxidación del aceite mineral. Los componentes ácidos formados a partir de aceite mineral se consideran indeseables, ya que pueden contribuir al envejecimiento del aislamiento sólido y la formación de lodos. El índice de acidez se ha utilizado como una guía general para determinar cuándo se debe reemplazar o recuperar el aceite mineral.

En los aceites vegetales, los componentes ácidos surgen de diversos procesos y pueden no estar asociados con efectos adversos. La fuente de estos componentes, así como su magnitud, deben considerarse al determinar qué acción se debe tomar. Los componentes ácidos se producen principalmente a partir de la hidrólisis, pirólisis y oxidación del éster natural. La hidrólisis de los

enlaces éster naturales libera ácidos grasos. Los ácidos grasos libres introducidos por este proceso son ácidos orgánicos de cadena larga. La mayoría de estos ácidos tienen una longitud de 18 carbonos, C18, mientras que unos pocos son 16 secuencias de carbono, C16. La fuerza de los ácidos orgánicos está inversamente relacionada con la longitud de la cadena. Ácidos de cadena corta como el ácido acético, Los C2 son fuertes y, en cantidad suficiente, pueden ser perjudiciales para el estado de otros materiales en contacto con el líquido aislante. Los ácidos de cadena larga como el ácido esteárico, C18, son débiles y no se han asociado con ningún efecto perjudicial. La presencia de agua disuelta en el líquido facilita la reacción de hidrólisis. Es común que el índice de acidez aumente significativamente durante los primeros meses de la operación del transformador, atribuible a la reacción de hidrólisis con la humedad inicial del papel aislante. La pirólisis de los enlaces éster también produce ácidos grasos. El calor que causa la liberación de los ácidos grasos también causa que algunos de ellos se descompongan aún más. En consecuencia, los incrementos en el índice de acidez de este proceso corresponden directamente a incrementos en los gases de hidrocarburos disueltos y de óxido de carbono. Al igual que con la hidrólisis, los ácidos grasos introducidos por este proceso son ácidos orgánicos de cadena larga y no se consideran perjudiciales. La oxidación de los líquidos de éster da como resultado la producción de ácidos de cadena más corta. Los sitios oxidados más fácilmente en los líquidos de ésteres naturales producen ácidos con longitudes de cadena en el rango de C7 a C11. También se pueden producir ácidos con longitudes de cadena aún más cortas. Los componentes ácidos producidos por la oxidación son los componentes de mayor preocupación. Al igual que con cualquier líquido aislante, los constituyentes ácidos también pueden surgir de la contaminación o reacciones de materiales distintos al propio líquido. Los cambios significativos en el número de ácido que no son atribuibles al hidrólisis, pirólisis u oxidación deben investigarse por estas causas.

2.12.5 Tension Interfacial (ASTM D971)

La tensión interfacial entre los líquidos de aislamiento eléctrico y el agua es una medida indirecta del contenido de surfactante del líquido aislante que migra bajo la atracción de carga en el agua en la interfaz. Los surfactantes son productos polares o iónicos de contaminación soluble o deterioro de líquidos que disminuyen el valor de la tensión interfacial. Las moléculas de agua se atraen fuertemente entre sí y requieren una cierta fuerza para romper su tensión interfacial. A medida que los surfactantes en el aceite se atraen a través de la interfaz de agua y aceite, obstruyen algunas de las atracciones de agua a agua que debilitan las fuerzas de tracción de la interfaz de agua. La cantidad y el tipo de surfactantes determina la cantidad de debilitamiento de estas fuerzas. Este debilitamiento se mide como una disminución en el valor de la tensión interfacial. La tensión interfacial se mide en milinewtons por metro (mN / m).

ASTM no ha publicado un límite de valor de aceptación para la tensión interfacial aceites vegetales. Los líquidos de ésteres naturales tienen una tensión interfacial inherentemente más baja que los aceites minerales no utilizados. antes de la energización.

2.12.6 Contenido de Agua

El agua puede estar presente en un líquido aislante en varias formas. La presencia de agua libre puede detectarse mediante un examen visual en forma de gotitas separadas o como una nube (turbidez) dispersa por todo el líquido.

Este tipo de agua produce invariablemente una disminución de la resistencia dieléctrica. El agua en la solución no se puede detectar visualmente y normalmente se determina por medios físicos o químicos. La resistencia dieléctrica del líquido disminuye a medida que aumenta el agua disuelta, más significativamente a medida que el nivel se acerca al punto de saturación. El método de ASTM D1533, Método de prueba estándar para agua en líquidos aislantes mediante la valoración Karl Fischer de Coulometric, es adecuado para la determinación de agua en líquidos aislantes y, según las condiciones de manejo de la muestra y el método de análisis, se puede utilizar para estimar el contenido total de agua de los líquidos. La medida unitaria del agua es en miligramos / kilogramo (mg / kg). Esta prueba es importante porque puede indicar la presencia de agua incluso si la presencia de agua puede no ser evidente en las pruebas eléctricas.

Algunos reactivos que son adecuados para aceites minerales pueden no ser adecuados para líquidos de ésteres naturales. Como se indica en ASTM D1533, según el documento "Sistemas de solventes alternativos", pueden ser necesarios reactivos alternativos para ciertas formulaciones de ésteres naturales.

2.12.7 Gasificación de Líquidos Aislantes Bajo Tensión Eléctrica e Ionización. (ASTM D2300)

Para ciertas aplicaciones, cuando un líquido aislante se somete a esfuerzos en gradientes de alto voltaje, puede ser deseable determinar la tasa de evolución o absorción de gas en condiciones de prueba específicas. En la actualidad, la correlación de los resultados de la prueba ASTM D2300 con el rendimiento del equipo es limitada, independientemente del tipo de líquido. Los ésteres naturales tienen una tendencia inherentemente más baja a la gasificación que los aceites minerales, muy por debajo del rango inferior de los aceites minerales y en general bastante negativos (absorción de gas). El rango típico para los ésteres naturales es de $-50 \mu\text{L} / \text{min}$ a $-90 \mu\text{L} / \text{min}$.

2.12.8 Bifenilos Policlorados (PCB) (ASTM D4059)

Los líquidos de ésteres naturales utilizados no deben contener PCB. Las regulaciones gubernamentales típicas pueden requerir que los aparatos eléctricos y los líquidos aislantes eléctricos que contienen PCB se manejen y eliminen mediante el uso de procedimientos específicos. El procedimiento a utilizar para un aparato particular o una cantidad de líquido aislante está determinado por el contenido de PCB del líquido. Los resultados de esta técnica analítica pueden ser útiles para seleccionar los procedimientos de manejo y eliminación apropiados (consulte 40 CFR 761.1 [B11]).

2.12.9 Tensión de Ruptura Dieléctrica (ASTM D1816)

La tensión de ruptura dieléctrica de un líquido aislante es importante como una medida de su capacidad para soportar tensiones eléctricas. Es la tensión a la que se produce la ruptura entre dos electrodos bajo las condiciones de prueba prescritas. La norma ASTM D1816 prescribe el uso de electrodos con tapones esféricos del tipo Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE). Sirve principalmente para indicar la presencia de agentes contaminantes (por ejemplo, agua, suciedad y partículas conductoras en el líquido), uno o más de los cuales pueden estar presentes cuando se encuentran bajos valores de ruptura dieléctrica en la prueba.

Se debe tener cuidado al llenar la celda de prueba con líquidos de ésteres naturales para evitar que las burbujas de aire queden atrapadas, lo que puede generar voltajes confusos y bajos. Debido a su mayor viscosidad, se recomienda un mayor tiempo de reposo de la muestra (igual o superior a 15 min a temperatura ambiente) para líquidos de ésteres naturales que para aceites minerales para permitir que las burbujas de aire se escapen.

NOTA: La prueba de voltaje de ruptura dieléctrica de ASTM D877 está en proceso de ser eliminada en los estándares de líquidos aislantes de ASTM y ha sido eliminada en otras normas y guías IEEE.

2.12.10 Punto de Vertido (ASTM D97, ASTM D5949 [B5] y ASTM D5950 [B6])

La temperatura más baja a la que fluye un líquido aislante en las condiciones prescritas se conoce como punto de fluidez.

El punto de fluidez de un líquido aislante es importante porque indica la temperatura por debajo de la cual la circulación del líquido puede ser difícil e incluso imposible.

Incluso por encima de la temperatura del punto de vertido, la circulación del líquido puede estar limitada por la viscosidad. Los líquidos de ésteres naturales tienen viscosidades más altas que el aceite mineral convencional y viscosidades más bajas que los HMWH y los líquidos dieléctricos de silicona a temperaturas normales de operación. Para transformadores utilizando ésteres naturales con accesorios internos operativos (particularmente mecánicos), puede requerirse una temperatura mínima más alta antes de la operación que la requerida para el aceite mineral. Además, es posible que los ésteres naturales dejen de fluir si se dejan en reposo durante largos períodos a bajas temperaturas, incluso por encima de sus temperaturas de punto de vertido establecidas mediante pruebas.

El punto de fluidez tiene poca importancia en lo que se refiere a la contaminación o el deterioro; pero puede ser útil para la identificación del tipo de líquido y para determinar el tipo de equipo en el que se puede utilizar. El punto de fluidez y la viscosidad, junto con el rango de temperaturas

ambientales posibles, deben tenerse en cuenta en la selección del equipo de procesamiento (por ejemplo, bombas) para reacondicionamiento o recuperación.

2.12.11 Resistividad de Volumen (ASTM D1169)

La resistividad de volumen (resistencia específica) de un líquido es una medición de corriente directa en caras opuestas de un cubo centimétrico y de su capacidad de aislamiento eléctrico. La resistividad en ohmios / centímetro (Ω / cm) de un líquido es la relación del gradiente de potencial directo en voltios / centímetro (V / cm) paralelo al flujo de corriente dentro de la muestra a la densidad de corriente en amperios / centímetro cuadrado (A / cm^2), en un instante dado de tiempo y bajo condiciones prescritas. Una resistencia más baja normalmente indica la presencia de contaminantes conductores, pero la prueba no se ha aplicado ampliamente a líquidos envejecidos en servicio. Los ésteres naturales no utilizados tienen una resistividad de volumen inherentemente menor que los aceites minerales.

2.13 Valores de las Propiedades Físicas y Químicas de Diferentes Tipos de Aceites Disponibles en el Mercado

Tabla 2.2 . Comparación de la viscosidad cinemática entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6]- ([17])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MAXIMO SEGUN NORMA (mm ² /s)	VISCOSIDAD CINEMATICA (mm ² /s)
1	UNIVOLT N 61 B (40°C-100°C)	ASTM D 445	40°C ---12	9.2
			100°C---3	2.3
2	DIELECTRICO S-40 (40°C)	SIN ESPECIFICACION		12
3	PUMA INSULATING INNIBID OIL	ASTM D-445 40°C	12	12.0 max
4	IPIELECTRIC_501_TDS (40°C)	ASTM D-445	12	7.89 max
5	DIALA S3 ZX-IG (40°C)	ISO 3104	12	8.0 max
6	DIALA S3 ZX-I 40°C)	ISO 3104	12	8.0 max

7	DIALA S2 ZX-A	ASTM D 445	12---40°C	8.0
			3----40°C	2.2
8	DIALA S2 ZU-I (40°C)	ISO 3104	12	9.4
9	EMVIROTEMP FR3 (40°C-100°C) (VEGETAL)	ASTM D-445	40°C ---50	33
			100°C --15	8
10	REPSOL ELECTRA SYNTH(40°C) (VEGETAL)	ISO 3104		< 35
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC GE VG 100	ASTM D-445	40°C ---50	31
			100°C --15	6
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB (40°C-100°C)	ASTM D-445	40°C ---50	42
			100°C --15	9

Tabla 2.3 Comparación de la Densidad Relativa entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MAXIMO	DENSIDAD
1	UNIVOLT N 61 B	ASTM D 1298	0.91--15°C	0.91
2	DIELECTRICO S-40(20°C)	-----		0.8530
3	PUMA INSULATING INNHIBID OIL 15°C	ASTM D-1298	0.91--15°C	0.91
4	IPIELECTRIC_501_TDS 20°C	ASTM D-1298	0.91--15°C	0.878
5	DIALA S3 ZX-IG	ISO 3675	---	15°C --0.890
			0.895--20°C	20°C --0.886
6	DIALA S3 ZX-I	ISO 3675	---	15°C --0.881
			0.895--20°C	20°C --0.878

7	DIALA S2 ZX-A (15°C-20°C)	ASTM D 1298	--- 0.91--20°C	15°C --890

8	DIALA S2 ZU-I	ISO 3675	--- 0.895--20°C	15°C --0.884
				20°C --0.881
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	ASTM D 1298	0.96--15°C	0.92
10	ACEITE VEGETAL DE PROLEC	ASTM D1298	0.96--15°C	0.916
11	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	ASTM D1298	0.96--15°C	0.919

Tabla 2.4 Comparación del Contenido de Humedad entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6]- ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MAXIMO PERMITIDO POR LA NORMA (ppm)	CONTENIDO DE AGUA (ppm)
1	UNIVOLT N 61 B	ASTM D 1533	35	35
2	DIELECTRICO S-40	-----		-----
3	PUMA INSULATING INHIBID OIL	ASTM D-1533	35	35
4	IPIELECTRIC_501_TDS	ASTM D-1533	35	13 Maximo
5	DIALA S3 ZX-IG	-----		-----
6	DIALA S3 ZX-I	-----		----
7	DIALA S2 ZX-A	ASTM D-1533	35	<30
8	DIALA S2 ZU-I	-----		-----

9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	ASTM D-1533B	200	50
10	ACEITE VEGETAL DE PROLEC GE	ASTM D-1533	200	50
11	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	ASTM D-1533	200	150

Tabla 2.5 Comparación del Punto de Inflamación entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6]) - ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MINIMO PERMITIDO POR LA NORMA	PUNTO DE INFLAMACION
1	UNIVOLT N 61 B	ASTM D 92	145	151 °C
2	DIIECTRICO S-40	-----	145	150°C
3	PUMA INSULATING INNHIBID OIL	ASTM D 92	145	145 °C
4	IPIELECTRIC_501_TDS	ASTM D 92	145	146
5	DIALA S3 ZX-IG	ISO 2719	135	136
6	DIALA S3 ZX-I	ISO 2719	135	140
7	DIALA S2 ZX-A	ASTM D 92	145	150
8	DIALA S2 ZU-I	ISO 2719/ ASTM D93	135	144
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	ASTM D 92	275	330
10	ACEITE VEGETAL DE PROLEC GE	ASTM D 92	275°C	330°C
11	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	ASTM D 92	275°C	330°C

Tabla 2.6 Comparación del Punto de Ignición entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MINIMO PERMITIDO POR LA NORMA	PUNTO DE IGNICION
1	UNIVOLT N 61 B	----		----
2	DIELECTRICO S-40	----		MAYOR A 320 °C
	PUMA INSULATING INNHIBID OIL	----		----
4	IPIELECTRIC_501_TDS	----		----
5	DIALA S3 ZX-IG	----		----
6	DIALA S3 ZX-I	----		----
7	DIALA S2 ZX-A	----		----
8	DIALA S2 ZU-I	----		----
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	ASTM D 92	300°C	>360
10	ACEITE VEGETAL DE PROLEC GE	ASTM D 92	300°C	360
11	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	ASTM D 92	300°C	352

Tabla 2.7 Comparación de la Rigidez Dieléctrica entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MINIMO PERMITIDO	RIGIDEZ DIELECTRICA
--	--------	-------------------------------	------------------------	---------------------

			POR LA NORMA kV	kV
1	UNIVOLT N 61 B	ASTM D 877	≥ 30	30
		ASTM D1816 1 mm gap	28	----
		ASTM D1816 2 mm gap	56	----
2	DIELECTRICO S-40	-----	-----	-----
3	PUMA INSULATING INNIBID OIL	ASTM D 877	≥ 30	30 MINIMO
		ASTM D1816 1 mm gap	28	20 MIN
		ASTM D1816 2 mm gap	56	----
4	IPIELECTRIC_501_TDS	ASTM D 877	≥ 30	43
		ASTM D1816 1 mm gap	28	30
		ASTM D1816 2 mm gap	56	55
5	DIALA S3 ZX-IG	-----	----	-----
6	DIALA S3 ZX-I	IEC 60156	30	> 30
7	DIALA S2 ZX-A	ASTM 1816	35	40
8	DIALA S2 ZU-I	IEC 60156	30	70
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	ASTM D 877	30	47
		ASTM D1816 1 mm gap	20	

		ASTM D1816 2 mm gap	35	56
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC GE	ASTM D 877	30	
		ASTM D1816 1 mm gap	20	
		ASTM D1816 2 mm gap	35	62
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	ASTM D 877	30	52
		ASTM D1816 1 mm gap	20	36
		ASTM D1816 2 mm gap	35	

Tabla 2.8 Comparación de la Rigidez Dieléctrica en Prueba de Impulso entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6]) - ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MINIMO PERMITIDO POR LA NORMA	RIGIDEZ EN PRUEBA DE IMPULSO
1	UNIVOLT N 61 B	ASTM D3300	145 kv	-----
2	DIELECTRICO S-40	ASTM D3300	145 kv	-----
3	PUMA INSULATING INNIBID OIL	-----	-----	----
4	IPIELECTRIC_501	-----	-----	---
5	DIALA S3 ZX-IG	---	----	---
6	DIALA S3 ZX-I	----	----	---
7	DIALA S2 ZX-A	ASTM D3300	145	>300
8	DIALA S2 ZU-I	-----	-----	-----

9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	ASTM D3300	130 kV	226 kV
10	REPSOL BIO ELECTRA SYNTH (VEGETAL)	----		-----
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC	ASTM D3300	130 kV	142 KV
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	----		-----

Tabla 2.9 Comparación del Color entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])-([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MAXIMO PERMITIDO POR LA NORMA	COLOR
1	UNIVOLT N 61 B	ASTM D 1500	1.0	L0.5
2	DIELECTRICO S-40	-----		ASTM o it-08-09 0.5
3	PUMA INSULATING INNIBID OIL	ASTM D 1500	1.0	it-08-04 brillante y transparente
4	IPIELECTRIC_501_TDS	ASTM D 1500	1.0	L 0.5
5	DIALA S3 ZX-IG	----		----
6	DIALA S3 ZX-I	----		----
7	DIALA S2 ZX-A	----		----
8	DIALA S2 ZU-I	----		----
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	ASTM D 1500	1.0	L 0.5

10	REPSOL BIO ELECTRA SYNTH (VEGETAL)	ISO 2211		Máx. 200 Hazen
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC	ASTM D 1500	1.0	L 0.5
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	ASTM D 1500	1.0	L 0.5

Tabla 2.10 Comparación del Numero de Acido (Neutralización) entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6]) - ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	NIVELES MINIMOS REQUERIDOS SEGUN LA NORMATIVA	NIVEL DE OXIDACION (mgKOH/g)
1	UNIVOLT N 61 B	ASTM D974	<0.03	0.013
2	DIELECTRICO S-40	-----		----
3	PUMA INSULATING INNIBID OIL	ASTM D-664	<0.03	0.030
4	IPIELECTRIC_501_TDS	ASTM D-974	<0.03	0.0056
5	DIALA S3 ZX-IG (500 h)	IEC 62021-1		0.01 maximo
6	DIALA S3 ZX-I (500h/120°C)	IEC 61125 C		Menor a 0.02
7	DIALA S2 ZX-A(500 h)	ASTM D 2440		Menor a 0.03
8	DIALA S2 ZU-I (164h/121°C)	IEC 61125 C		Menor a 0.03
9	REPSOL BIO ELECTRA SYNTH (VEGETAL)	IEC 61125C		-----
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	ASTM 2440		0.085

Tabla 2.11 Comparación del Azufre Corrosivo entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6]) - ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MAXIMO PERMITIDO	AZUFRE CORROSIVO
1	UNIVOLT N 61 B	ASTM D 1275	NO CORROSIVO	NO CORROSIVO
2	DIELECTRICO S-40	-----		-----
3	PUMA INSULATING INNHIBID OIL	ASTM D 1275	NO CORROSIVO	NO CORROSIVO
4	IPIELECTRIC_501_TDS	ASTM D 1275	NO CORROSIVO	NO CORROSIVO
5	DIALA S3 ZX-IG	IEC 62535/ASTMD1275B	NO CORROSIVO	NO CORROSIVO
6	DIALA S3 ZX-I	IEC 62535/ ASTM D 1275 B	NO CORROSIVO	NO CORROSIVO
7	DIALA S2 ZX-A	IEC 62535/ ASTM D 1275 B	NO CORROSIVO	NO CORROSIVO
8	DIALA S2 ZU-I	IEC 62535/ ASTM D 1275 B	NO CORROSIVO	NO CORROSIVO
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	-----		-----
10	REPSOL BIO ELECTRA SYNTH (VEGETAL)	-----		-----
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC	-----		-----
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	-----		-----

Tabla 2.12 Comparación del Punto de Anilina entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MAXIMO SEGUN LA NORMATIVA °C	PUNTO DE ANILINA °C
1	UNIVOLT N 61 B	ASTM D 611	63-84	75.8
2	DIELECTRICO S-40	----		----
3	PUMA INSULATING INNHIBID OIL	ASTM D 611	63-84	-----
4	IPIELECTRIC_501_TDS	ASTM D 611	63-84	76.1
5	DIALA S3 ZX-IG	----		-----
6	DIALA S3 ZX-I	----		-----
7	DIALA S2 ZX-A	ASTM D 611	63-84	69
8	DIALA S2 ZU-I	----		-----
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	----		-----
10	REPSOL BIO ELECTRA SYNTH (VEGETAL)	----		-----
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC	----		-----
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	----		-----

Tabla 2.13 Comparación del Punto de Vertido de Fluidez entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6]- ([18])].].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MAXIMO °C	PUNTO DE VERTIDO FLUIDEZ °C
1	UNIVOLT N 61 B	ASTM D 97	-40 a-50	-50
2	DIELECTRICO S-40	-----	-----	-26 °C
3	PUMA INSULATING INNHIBID OIL	ASTM D 97	-40 a-50	-40
4	IPIELECTRIC_501_TDS	ASTM D 97	----	-57
5	DIALA S3 ZX-IG	ISO 3016	---	-57
6	DIALA S3 ZX-I	ISO 3016	-----	-60
7	DIALA S2 ZX-A	ISO 3016	-----	-57
8	DIALA S2 ZU-I	ISO 3016	---	-57
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	ASTM D97	-10	-21
10	REPSOL BIO ELECTRA SYNTH (VEGETAL)	ISO 3016		-45 °C
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC	ASTM D97	-10	-12°C
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	---	--	-25 A -15

Tabla 2.14 Comparación de la Tensión Interfacial entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6]) - ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	TENSION INTERFACIAL Dina/cm @ 25°C mínimo	TENSION INTERFACIAL Dina/cm
1	UNIVOLT N 61 B	ASTM D 971	40	48
2	DIELECTRICO S-40	-----	----	-----
3	PUMA INSULATING INNIBID OIL	D-2285	----	40
4	IPIELECTRIC_501_TDS	D-2285	----	48
5	DIALA S3 ZX-IG	----	----	----
6	DIALA S3 ZX-I	-----	-----	----
7	DIALA S2 ZX-A	ASTM D 971	40	42
8	DIALA S2 ZU-I	----	----	---
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL) 25°C	ASTM D971	-----	27
10	REPSOL BIO ELECTRA SYNTH (VEGETAL)			
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC	ASTM D 2285	2-30	24-29
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	-----	---	---

Tabla 2.15 Comparación de la Resistividad Volumétrica entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6]) - ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA		RESISTIVIDAD VOLUMÉTRICA TΩ/cm
1	UNIVOLT N 61 B	----	---	----
2	DIELECTRICO S-40	-----	----	-----
3	PUMA INSULATING INHIBID OIL	D1169 @2.5 kV		250 mínimo
4	IPIELECTRIC_501_TDS	-----	-----	-----
5	DIALA S3 ZX-IG	----	----	----
6	DIALA S3 ZX-I	---	---	----
7	DIALA S2 ZX-A	---	---	---
8	DIALA S2 ZU-I	---	---	----
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	ASTM D1169	---	30
10	REPSOL BIO ELECTRA SYNTH (VEGETAL)	-----	----	---
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC	ASTM D1169	----	28
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	-----	----	15

Tabla 2.16 Comparación del Análisis de Gases entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6])- ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MAXIMO PERMITIDO POR LA NORMA	ANÁLISIS DE GASES $\mu\text{L}/\text{min}$
1	UNIVOLT N 61 B	----	-----	-----
2	DIIELECTRICO S-40	-----	-----	-----
3	PUMA INSULATING INHIBID OIL	ASTM D 2300 @ 10 kV	-----	30
4	IPIELECTRIC_501_TDS	ASTM D 2300 @ 10 kV	-----	8
5	DIALA S3 ZX-IG	IEC 60628 A		-14
6	DIALA S3 ZX-I	-----	-----	-----
7	DIALA S2 ZX-A	-----	-----	-----
8	DIALA S2 ZU-I	-----	-----	-----
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)	ASTM D2300	0	-79
10	REPSOL BIO ELECTRA SYNTH (VEGETAL)	----	----	----
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC	ASTM D2300	0	-49.7
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB	-----	----	----

Tabla 2.17 Comparación de la Bifenilos Policlorados entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. . [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6]- ([18])].

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MAXIMO PERMITIDO POR LA NORMA	BIFENILOS POLICLORADOS
1	UNIVOLT N 61 B			NEGATIVO
2	DIIECTRICO S-40			NEGATIVO
3	PUMA INSULATING INNHIBID OIL	D-4059	NO DETECTABLES	NEGATIVO
4	IPIELECTRIC_501_TDS			NO DETECTABLES
5	DIALA S3 ZX-IG			NEGATIVO
6	DIALA S3 ZX-I			NEGATIVO
7	DIALA S2 ZX-A			NEGATIVO
8	DIALA S2 ZU-I			NEGATIVO
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL)			NEGATIVO
10	REPSOL BIO ELECTRA SYNTH (VEGETAL)			NEGATIVO
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC			NEGATIVO
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB			NEGATIVO

Tabla 2.18 Comparación del Factor de Potencia entre aceites comerciales de origen mineral y vegetal con los requerimientos de las normas ASTM, IEEE. [(Brettis, 2018)], [(D-6871, 2003)], [([6]) - ([18])]

	ACEITE	NORMATIVA DE PRUEBAS APLICADA	VALOR MAXIMO PERMITIDO POR LA NORMA	FACTOR DE POTENCIA
1	UNIVOLT N 61 B	---	--	--
2	DIIECTRICO S-40			
3	PUMA INSULATING INNHIBID OIL	D-924 @ 60 Hz., 2,5 kV @ 25 °C, %	0.05%	0.050 máximo
		D-924 @ 60 Hz/., 2,5 kV @ 100 °C, %	0.03%	0.300 máximo
4	IPIELECTRIC_501_TDS	D-924 @ 60 Hz., 2,5 kV @ 25 °C, %	0.05%	0.004
		D-924 @ 60 Hz/., 2,5 kV @ 100 °C, %	0.03%	0.070
5	DIALA S3 ZX-IG 90°C	IEC 60247	0.005@ 90°C	0.002
6	DIALA S3 ZX-I	IEC 60247	0.005@ 90°C	0.001
7	DIALA S2 ZX-A	ASTM D924	0.3 @ 100°C	0.1
8	DIALA S2 ZU-I	IEC 60247	0.005@ 90°C	0.02
9	EMVIROTEMP FR3 (VEGETAL) 60HZ	ASTM D924	0.20 @ 25°C	0.05
			4.0 @ 100°C	---

10	REPSOL BIO ELECTRA SYNTH (VEGETAL) 50HZ 90°C 100°C	IEC 60247	4.0	0.03
11	ACEITE VEGETAL DE PROLEC 60HZ	ASTM D924	0.20 @ 25°C	0.08
			4.0 @ 100°C	0.29
12	ACEITE VEGETAL BIOTEMP ABB		0.20 @ 25°C	0.09
			4.0 @ 100°C	---

3 CAPITULO III

3.1 Comparativa, Ventajas y Desventajas Generales de los Tipos de Aceites

3.2 Comparación de las Propiedades Generales de los Líquidos Aislantes

Por claridad de la exposición se han establecido dos grandes grupos de propiedades físico-químicas y eléctricas.

3.2.1 Propiedades Físico-Químicas

La tabla 3.1 permite comparar de manera rápida las propiedades físico-químicas de especial relevancia para un fluido aislante de un transformador.

Tabla 3.1 Principales propiedades de los líquidos aislantes

Nombre	Aceite mineral	Aceite de silicona	Éster sintético	Éster natural
Tipo	Destilado del petróleo	Sintético	Sintético	Aceite vegetal refinado
Componentes principales	Mezcla compleja de hidrocarburos	Siloxanos o polisiloxanos polimerizados	Un poliol con ácidos carboxílicos naturales o sintéticos enlazados	Cadena central de glicerol con 3 ácidos grasos naturales enlazados
Fuente	Petróleo	Producto químico	Producto químico	Extraído de cultivos
Biodegradabilidad	Muy baja	Muy Baja	Muy alta	Muy alta
Estabilidad frente a la oxidación	Aceite de silicona (Exc.)> éster sintético (Exc.)> aceite mineral (Buena)> éster natural (susceptible)			
T de inflamación	160-170	>300	>250	>300
T de ignición	170-180	>350	>300	>350
Clasificación frente al fuego(IEC 61100)	O	K3	K3	K2
Saturación de agua a Tamb (ppm)	55	220	2600	1100
Viscosidad	Aceite mineral < silicona baja viscosidad < éster sintético < silicona < éster natural			

3.2.2 Color

El color del aceite vegetal generalmente verde y para el aceite mineral es transparente para ambos casos cambia según los años de servicio que lleve, el verde por representar que es amigable con el medio ambiente y como lo presenta el fabricante como biodegradable y que no necesita un proceso complejo para el desecho con respecto al aceite mineral.

3.2.3 Composición Química

Se puede señalar que el aceite mineral es una mezcla compleja de hidrocarburos producida a partir de destilación del petróleo. En cambio, tanto el aceite de silicona como los esteres sintéticos son productos químicos: el aceite de silicona consiste en una mezcla de polímeros inorgánicos-orgánicos y los esteres sintéticos se forma por la unión química de un alcohol con un ácido graso. Esta última reacción química se produce también en los ésteres naturales, que se obtienen por refinado de una amplia variedad de aceite (soya, colza, aceite de girasol).

3.2.4 Seguridad Medioambiental

Los líquidos aislantes con una biodegradabilidad elevada y baja toxicidad son considerados como amigables con el medio ambiente. Estos dos factores son importantes cuando se considera el uso de líquidos aislantes en áreas donde el ambiente no es normal e intervienen otros factores. Los esteres naturales y sintéticos están clasificados como biodegradables y no dañinos para el medioambiente, mientras los aceites minerales y silicona tienen más baja la biodegradación y más nocivos para el medioambiente.

3.2.5 Oxidación

La estabilidad de los líquidos aislantes frente a la oxidación es un aspecto clave, ya que está puede modificar las propiedades físico-químicas (propiedades dieléctricas, capacidad de corrosión, viscosidad, etc) de los fluidos, afectando negativamente al funcionamiento del transformador. En el aceite de silicona químicamente inerte tiene buena resistencia a la oxidación. Este proceso se produce muy lentamente y a temperaturas mayores de 175°C no generándose ácidos ni lodos peligrosos. En cambio, en el caso de los esteres sintéticos, el proceso se produce con temperaturas de 125°C en adelante, generándose además ácidos orgánicos. Por lo que respecta al aceite mineral, se comienza a oxidar y volatilizar con temperaturas superiores a 105°C, produciéndose muchos subproductos resultado de la degradación entre ellos, ácidos orgánicos y lodos. Estos subproductos pueden reducir las propiedades dieléctricas del líquido aislante y corroer los metales. Por último, los esteres naturales son los más susceptibles a la oxidación, dependiendo su grado de estabilidad de su composición química. No obstante, independientemente de su composición, esta reacción produce líquidos gelatinosos y otros productos (alcoholes, ácidos, etc.) que aumentan además se viscosidad, reduciendo así su capacidad refrigerante.

3.2.6 Punto de Inflamación

Para determinar el punto de inflamación se aplica la norma ASTM D 92 en esta característica el valor cambia drásticamente el menor valor lo presenta el aceite mineral permitido de 145°C y el mayor valor lo tiene el aceite vegetal permitido de 275°C. Los fabricantes ponen mucho énfasis en esta característica que a simple vista se observa que la temperatura del líquido inflamable la soporta mejor el aceite vegetal en ambientes donde la temperatura es alta.

3.2.7 Seguridad Contra Incendios

La seguridad contra incendios desempeña un papel clave en aplicaciones específicas donde el ambiente puede haber explosiones y fuego donde puede poner en riesgo la vida humana o generar elevados costes económicos. Así son los líquidos alternativos los ofrecen una mayor ventaja y que ofrecen un alto grado de seguridad contra incendios (clase K) por su baja susceptibilidad al fuego. Esto supone, además, que las instalaciones dotadas con estos fluidos tengan menores costes de instalación y mantenimiento de los equipos de seguridad, que su riesgo de incendio sea mucho menor en caso de fallo eléctrico importante (IEC 61100) y que producido no sea tóxico y de baja densidad.

3.2.8 Clasificación de los Fluidos según IEC-61100

Tabla 3.2 Punto de flameo

clase	punto de fuego
O	$\leq 300^{\circ}\text{C}$
K	$> 300^{\circ}\text{C}$
L	NO MEDIBLE

Tabla 3.3 Poder calorífico

Clase	Valor neto calorífico
1	$\geq 42 \text{ MJ/Kg}$
2	$\leq 42 \text{ MJ/kg} \geq 32 \text{ MJ/Kg}$
3	$< 32 \text{ MJ/Kg}$

3.2.9 Propiedades de los Fluidos

Tabla 3.4 Propiedades de los líquidos aislantes.

TIPO DE FLUIDO	PUNTO DE INFLAMCION °C	PUNTO DE FUEGO °C	CLASE
ACEITE MINERAL	160 – 170	170 - 180	O
FLUIDO DE SILICONA	>300	>350	K3
ESTER NATURAL	>300	>350	K2
ESTER SYNTHETIC	>250	>300	K3

3.2.10 Contenido de Agua

El contenido de agua es de las características más importantes para ambos tipos de aceites la norma ASTM 1533 permite valores de 35 ppm para aceites minerales y el valor asciende para aceites vegetales a 200 ppm, destacar que el aceite vegetal retiene más contenido de agua, los fabricantes presentan esto como ventaja, debido a que aumenta la vida útil del aislamiento sólido.

3.2.11 Solubilidad del Agua

Los esteres sintéticos y naturales, por su mayor grado de polaridad, son capaces de disolver mayor cantidad de agua que los aceites minerales y de silicona. Esta propiedad es clave para determinar la tensión de ruptura de estos fluidos.

3.2.12 Humedad de Saturación

Los esteres tienen límites mucho más altos de saturación en todas las temperaturas que el aceite mineral

En condiciones normales, la saturación de agua de los aceites éster natural es de 5 a 8 veces la de aceite mineral. Los esteres tienen una mayor afinidad por el agua que el aceite mineral. En los sistemas éster/papel, el papel retiene menos agua que en sistemas aceite mineral/papel.

Los transformadores llenos con esteres permitirá la reducción del tiempo de secado en las unidades en campo usando secado por aceite caliente. El límite permisible de humedad en los aceites éster puede ser mucho mayor que el permitido para el aceite mineral.

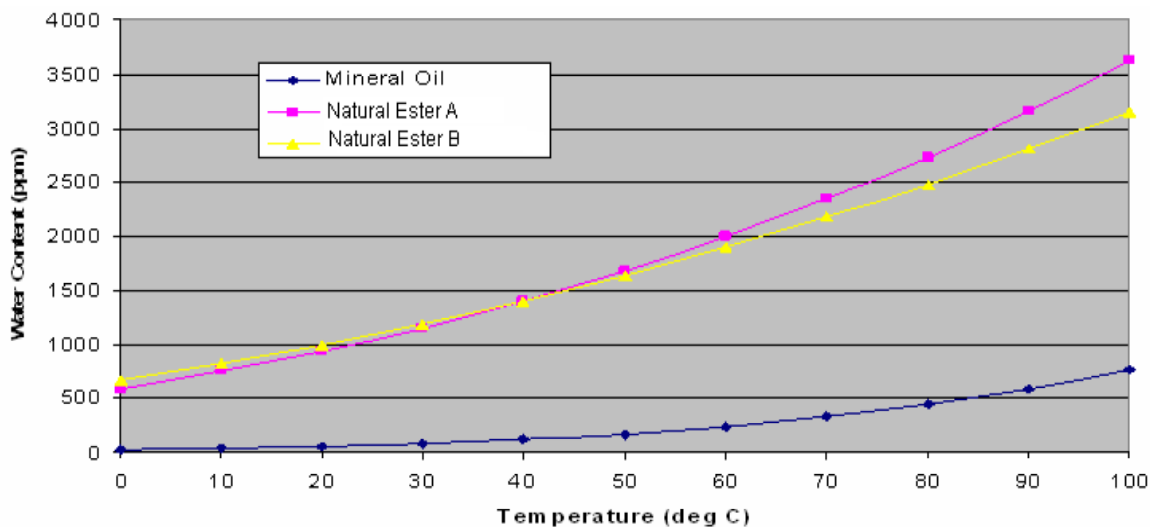


Figura 3.1 Temperatura de saturación de líquidos aislantes

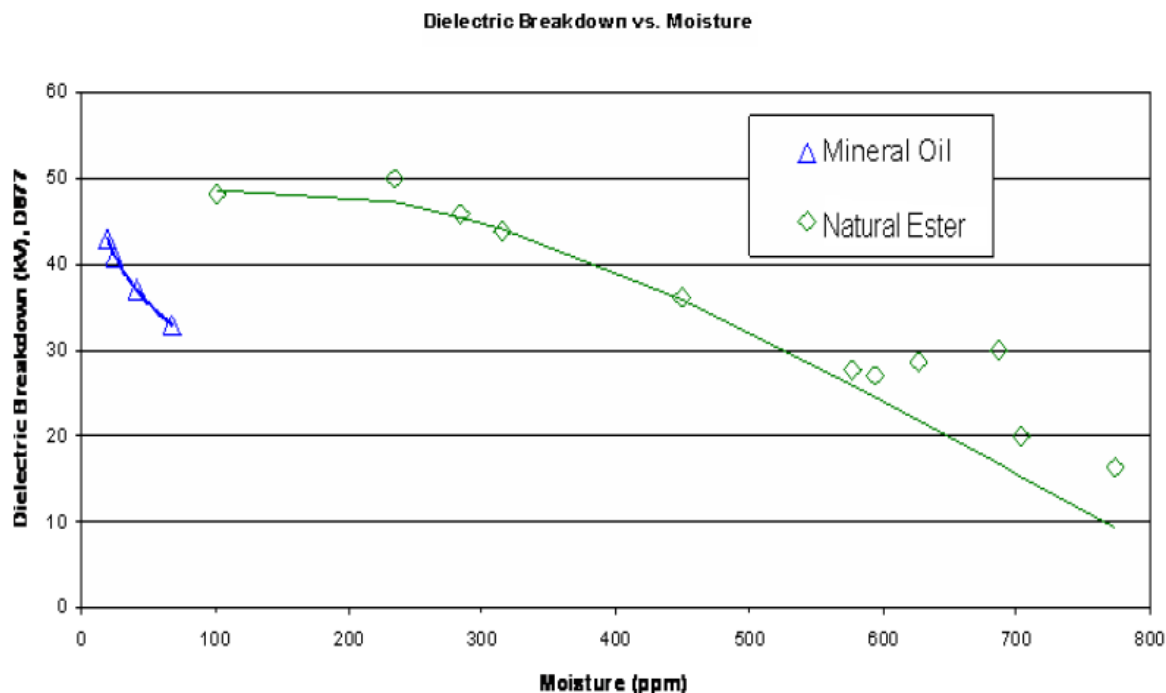


Figura 3.2 Descomposición dieléctrica vs humedad

3.2.13 Viscosidad

La viscosidad de un fluido juega un papel clave en la determinación de su capacidad de refrigeración. Salvo el aceite de silicona de baja viscosidad, el resto de fluidos alternativos son más viscosos que el aceite mineral. Como consecuencia, su capacidad de refrigeración será menor, aumentando la temperatura de funcionamiento del transformador. Además, la impregnación de los aislantes de celulosa durante el proceso de fabricación del transformador se verá dificultada por esa alta viscosidad.

La viscosidad cinemática es una característica que presenta un valor significativo en el cambio de aceite pues los valores presentan un aumento para aceites vegetales a temperatura normal de operación, presentan un rango que varía desde los $31.0 \frac{mm^2}{s}$ hasta alcanzar valores de $42 \frac{mm^2}{s}$ en relación con aceites minerales presentan valores de $9 \frac{mm^2}{s}$ hasta valores máximos de $12 \frac{mm^2}{s}$ se puede observar que los aceites vegetales tienen una mayor viscosidad que puede presentar problemas al desarrollar la función de refrigeración con respecto al aceite mineral.

3.2.14 Densidad Relativa

La densidad relativa no presenta un cambio significativo los valores mantienen un margen que permanece en valores cercanos a 0.9 para ambos tipos de aceites los cuales cumplen con la norma ASTM1298 que permite un valor máximo para aceite vegetal de 0.96 a una temperatura de 15°C.

3.2.15 Miscibilidad

La miscibilidad de los líquidos alternativos, con el aceite mineral y entre sí, es una propiedad importante al momento de proceder a la sustitución de uno de ellos: el procedimiento de lavado del transformador será más eficaz si el líquido usado es miscible con el líquido sustitutivo. Esto no quiere decir que un procedimiento de rellenado pueda llevarse a cabo con fluidos inmiscibles, pero sí debería tenerse más cuidados en estos casos.

Tabla 3.5 Miscibilidad entre líquidos aislantes a temperatura ambiente ([19], 2014)

	ACEITE MINERAL	ACEITE DE SILICONA	ÉSTER SINTETICO	ÉSTER NATURAL
ACEITE MINERAL	X	MISCIBLE	MISCIBLE	MISCIBLE
ACEITE DE SILICONA	MISCIBLE	X	NO MISCIBLE	NO MISCIBLE
ÉSTER SINTETICO	MISCIBLE	NO MISCIBLE	X	MISCIBLE
ÉSTER NATURAL	MISCIBLE	NO MISCIBLE	MISCIBLE	X

A temperatura ambiente tanto los esteres como el aceite de silicona son miscibles con el aceite mineral. En cambio, los esteres no son miscibles con aceite de silicona. Pequeñas cantidades de aceite de silicona en los esteres puede causar la formación de espuma. Este mismo efecto se produce, pese a ser miscibles entre el aceite de silicona y mineral como se observa en la tabla 3.5 para los distintos líquidos dieléctricos.

3.2.16 Biodegradabilidad

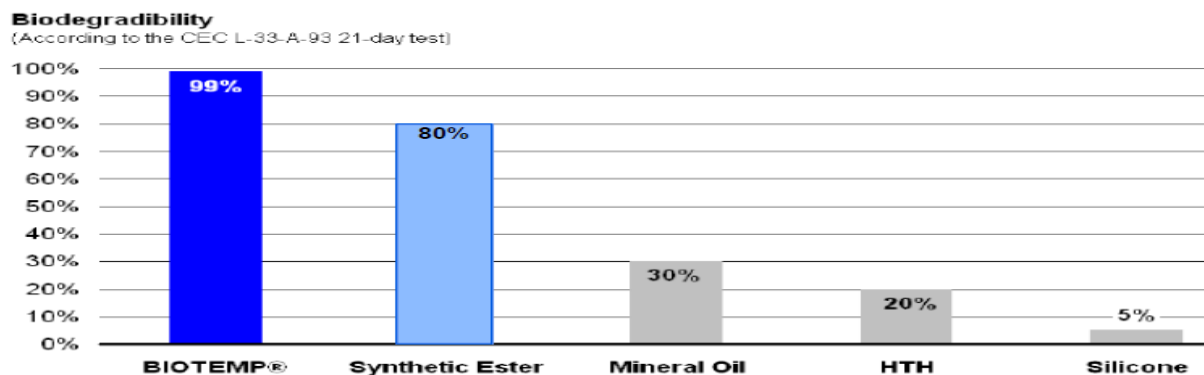


Figura 3.3 Biodegradabilidad de los líquidos aislantes

Los transformadores inmersos en aceite vegetal, los derrames de aceite vegetal pueden ser eliminados a través de medios normales y no se tratan como residuos tóxicos. También ofrece un descarte potencial de sanciones gubernamentales y costosos procedimientos de limpieza ocasionados por derrames. Reducen al mínimo la contaminación del aire durante la combustión.²

3.2.17 Beneficios Expectativa de Vida

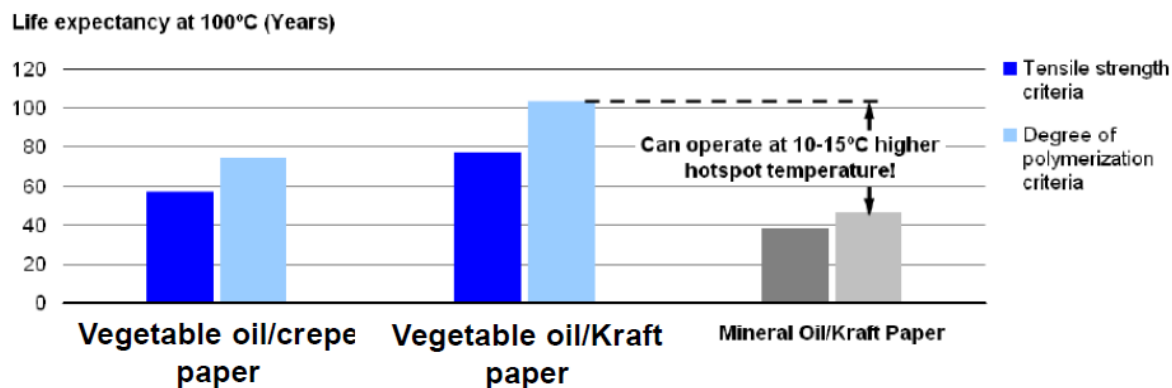


Figura 3.4 Expectativa de vida en años

Menor envejecimiento de la celulosa las pruebas realizadas con aceite vegetal han mostrado una más baja tasa de envejecimiento en comparación con el papel impregnado de aceite mineral que lleva a un aumento de la vida útil del sistema de aislamiento, por lo tanto, en la vida útil del transformador.

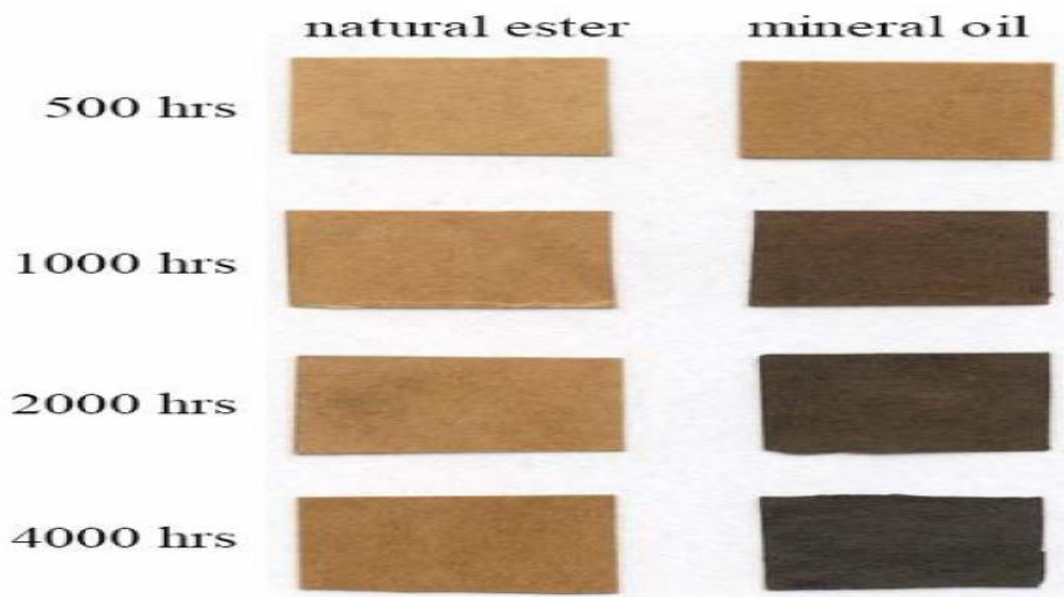


Figura 3.5 Estudios de envejecimiento del papel kraft³

² Desarrollos tecnológicos materiales ABB group

³ IEEE Transformador Committee Presentation, Cooper Power Systems, Oct. 2003

3.2.18 Propiedades Eléctricas

Por lo que respecta a las propiedades eléctricas, la mayoría de los parámetros que se estudian buscan caracterizar desde el punto de vista dieléctrico estos fluidos.

3.2.19 Tensión de Ruptura

Se puede determinar la tensión de ruptura de estos líquidos, generalmente deben de cumplir con el nivel de aislamiento requerido para garantizar que no exista la formación de arcos eléctricos que involucren las partes internas del transformador que puedan causar daños al transformador. Así como la celulosa impregnada en el papel, mediante la realización de numerosas pruebas de acuerdo a normas internacionales. En la tabla 3.6 se presenta un comparativo resumen de los valores obtenidos de las hojas técnicas de los diferentes fluidos de este parámetro

Tabla 3.6 Comparación de las tensiones de ruptura de líquidos aislantes

NORMAS	LIQUIDO AISLANTE				
	ACEITE MINERAL	ÉSTER SINTETICO	ESTER NATURAL	ACEITE DE SILICONA	ACEITE DE SILICONA BAJA VISCOSIDAD
IEC60156	>70 kV	>75 kV	>75 kV	50 kV	70 kV
ASTM1816 1mm	*	*	37 kV	*	*
ASTM1816 2mm	60 kV	56 kV	56 kV	*	*
ASTM D877	55 kV	43 kV	45 kV	43 kV	*

3.2.20 Rigidez Dieléctrica en Pruebas de Impulso

La rigidez dieléctrica en pruebas de impulso entre los aceites mineral y vegetal la norma ASTM D 3300 permite para el aceite mineral un valor de 145 kV y para aceites vegetales disminuye el valor a 130 kV ambos presentan valores aceptables en esta parte juega un papel importante el contenido de humedad ya que puede producir un efecto de conducir la electricidad debido a la disminución de la distancia entre el agua y otras partes que en este punto conducen y puede saltar el arco de un lugar a otro.

3.3 Comparación de Precios de Aceites Dieléctricos.

Dentro de la gama de aceites industriales se encuentran los aceites dieléctricos, sector en el que Repsol cuenta con una experiencia contrastada y uno de los portafolios de producto más completo

del mercado que satisface ampliamente las complejas necesidades del sector eléctrico, incluyendo aceites inhibidos y no inhibidos. Como garantía de calidad, nuestros productos cumplen normas internacionales específicas de estos aceites, como la IEC 60296 y la ASTM D3487. Asimismo, han sido validados y utilizados ampliamente por diversas compañías eléctricas y fabricantes de transformadores y equipamiento eléctrico ([22]).

3.3.1 Gama Electra

Los aceites ELECTRA son aceites ligeros, de naturaleza parafínica, diseñados expresamente para su utilización como fluido aislante en equipos eléctricos. Se fabrican a partir de bases muy refinadas y tratadas que aseguran la ausencia de compuestos sólidos, polares y agua. El proceso de hidrogenación al que se les ha sometido nos asegura que no contiene azufre corrosivo, que se ha demostrado es extremadamente dañino para los transformadores. Son muy estables a la oxidación y no corrosivos frente al cobre.

3.3.2 Gama Tensión

Los aceites TENSIÓN CENTAURO son aceites ligeros, de naturaleza nafténica. Su bajo punto de vertido y su baja viscosidad le proporcionan una excelente transferencia de calor bajo cualquier condición de operación.

3.3.3 Gama Bio

En Repsol somos conscientes de la importancia de la seguridad y el medio ambiente, por ello, tenemos productos que nos ayudan a mejorar la seguridad en las instalaciones de nuestros clientes y a minimizar el impacto ambiental.



REPSOL ELECTRA 3 1000
LITROS

2 496,23 €



REPSOL TENSION
CENTAURO 1000 LITROS

2 597,87 €

RESOL BIO ELECTRA 1000 LITROS

Referencia **RP333B35**

Fabricante **REPSOL**

Descripción

Aceite dieléctrico basado en esteres de origen vegetal, rápidamente biodegradable y de carácter no tóxico tanto para los ecosistemas acuáticos como para los terrestres. Se trata de un fluido de seguridad aumentada gracias a su elevado punto de combustión y a la ausencia de frases de riesgo en su ficha de seguridad.

Advertencia: ¡Últimos artículos en inventario!

4 325,75 € (IVA incluido.)

Cantidad:

AÑADIR A LA CESTA



Ilustración 3. 1 precios de aceites dieléctricos del fabricante REPSOL

4 CAPITULO IV

4.1 Descripción de las Características del Aceite Vegetal según la normativa IEEE C157-7

Tabla 4.1 Pruebas establecidas en la IEEE C157-7 para aceite vegetal (TRADUCCIÓN, 2019)

	PRUEBA	Método ASTM O IEC
1	Prácticas de muestreo	D923.
2	Número de ácido (neutralización)	D664, D974
3	Tensión de ruptura dieléctrica	D1816
4	Tensión de ruptura dieléctrica: condiciones de impulso	D3300
5	Características de pérdida de CA: factor de disipación y permitividad relativa	D924
6	Tensión interfacial	D971
7	Color (a)	D1500
8	Viscosidad cinemática	D445
9	Punto de inflamación y punto de ignición: método Open Cup de Cleveland	D92
10	Densidad relativa (gravedad específica)	D1298
11	Punto de vertido	D97, D5949 [B5], D5950 [B6]
12	Resistencia de volumen	D1169
13	Análisis de gases	D3284, D3612
14	Estabilidad de oxidación	IEC 61125, Método C (b)
15	Contenido de agua --Método Karl Fischer (c)	D1533
16	Examen visual de líquidos usados	D1524
17	Gasificación bajo tensión eléctrica e ionización.	D2300
18	Prueba de azufre corrosivo	D1275
19	Bifenilos policlorados (PCB)	D4059
20	Compuestos furánicos	D5837

4.1.1 Viscosidad Cinemática (TRADUCCIÓN, 2019)

La viscosidad cinemática es una característica que presenta un valor significativo en el cambio de aceite pues los valores presentan un aumento para aceites vegetales a temperatura normal de operación, presentan un rango que varía desde los $31.0 \frac{mm^2}{s}$ hasta alcanzar valores de $42 \frac{mm^2}{s}$ en relación con aceites minerales presentan valores de $9 \frac{mm^2}{s}$ hasta valores máximos de $12 \frac{mm^2}{s}$ se puede observar que los aceites vegetales tienen una mayor viscosidad que puede presentar problemas al desarrollar la función de refrigeración con respecto al aceite mineral.

4.1.2 Densidad Relativa (TRADUCCIÓN, 2019)

La densidad relativa no presenta un cambio significativo los valores mantienen un margen que permanece en valores cercanos a 0.9 para ambos tipos de aceites los cuales cumplen con la norma ASTM1298 que permite un valor máximo para aceite vegetal de 0.96 a una temperatura de 15°C.

4.1.3 Contenido de Humedad (TRADUCCIÓN, 2019)

El contenido de agua es de las características más importantes para ambos tipos de aceites la norma ASTM 1533 permite valores de 35 ppm para aceites minerales y el valor asciende para aceites vegetales a 200 ppm, destacar que el aceite vegetal retiene más contenido de agua, los fabricantes presentan como ventaja puede que también produzca una disminución de aislamiento en las partes internas de transformador.

4.1.4 Punto de Inflamación (TRADUCCIÓN, 2019)

Para determinar el punto de inflamación se aplica la norma ASTM D 92 en esta característica el valor cambia drásticamente el menor valor lo presenta el aceite mineral permitido de 145°C y el mayor valor lo tiene el aceite vegetal permitido de 275°C. Los fabricantes ponen mucho énfasis en esta característica que a simple vista se observa que la temperatura del líquido inflamable la soporta mejor el aceite vegetal en ambientes donde la temperatura es alta.

4.1.5 El Punto de Ignición (TRADUCCIÓN, 2019)

La rigidez dieléctrica para ambos tipos de aceite presentadas por la norma ASTM D 877 el establece un valor de 30 kV para ambos tipos de aceites, depende del fabricante el nivel y de los tipos de electrodos pueden variar los valores, generalmente deben de cumplir con el nivel de aislamiento requerido para garantizar que no exista la formación de arcos eléctricos que involucren las partes internas del transformador que puedan causar daños al transformador.

4.1.6 Rigidez Dieléctrica (TRADUCCIÓN, 2019)

La rigidez dieléctrica en pruebas de impulso entre los aceite mineral y vegetal la norma ASTM D 3300 permite para el aceite mineral un valor de 145 kV y para aceites vegetales disminuye el valor a 130 kV ambos presentan valores aceptables en esta parte juega un papel importante el contenido de humedad ya que puede producir un efecto de conducir la electricidad debido a la disminución de la distancia entre el agua y otras partes que en este punto conducen y puede saltar el arco de un lugar a otro.

4.1.7 El Color (TRADUCCIÓN, 2019)

El color del aceite vegetal generalmente verde y para el aceite mineral es transparente para ambos casos cambia según los años de servicio que lleve, el verde por representar que es amigable con el medio ambiente y como lo presenta el fabricante como biodegradable y que no necesita un proceso complejo para el desecho con respecto al aceite mineral.

5 CAPITULO V

5.1 Análisis del Comportamiento Térmico del Transformador Monofásico Tipo Poste Sumergido en Aceite Dieléctrico Vegetal y Mineral.

5.2 Fuentes de Calor

La generación de calor es debido a las pérdidas en los devanados y núcleo del transformador, estas se clasifican en:

- ✓ PERDIDAS EN EL COBRE
- ✓ PERDIDAS POR HISTERESIS
- ✓ PERDIDAS DE FOUCAULT
- ✓ PERDIDAS ADICIONALES DEBIDAS A LOS ARMONICOS.

5.2.1 Pérdidas en el Cobre

Se producen en los devanados de los transformadores y es causada por la resistencia del conductor debida al fenómeno conocido como efecto Joule. La magnitud de éstas pérdidas aumenta con el cuadrado de la corriente de carga, y es proporcional a la resistencia del devanado.

$$P_{CU} = R * I^2 \quad [5.1]$$

Dónde:

$$R \text{ resistencia del cobre} \quad R = \rho * \frac{L}{S} = \text{densidad Cu} * \frac{\text{Longitud del conductor}}{\text{Area del conductor}} \quad [5.2]$$

I corriente en el conductor.

5.2.2 Pérdidas por Histéresis

Se producen al someter al material ferromagnético a una fuente de corriente variable en el tiempo (señal AC), en el material se produce una magnetización lo que provoca una pérdida de energía que se manifiesta en forma de calor.

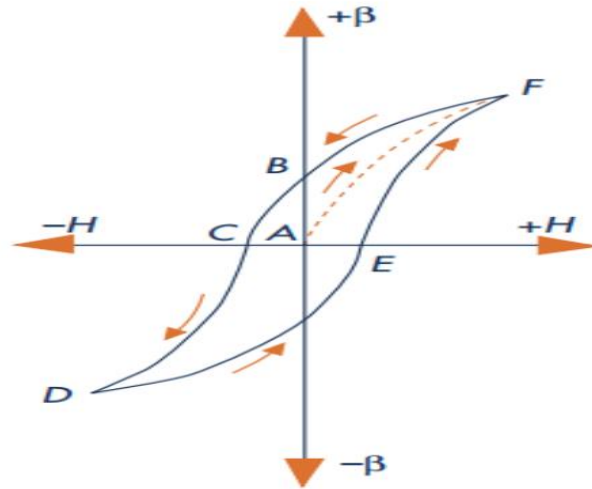


Figura 5.1 Curva de Histéresis

5.2.3 Pérdidas de Foucault.

Se producen en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación de flujo magnético.

Cuando los materiales magnéticos son buenos conductores eléctricos, en los núcleos se genera una fuerza electromotriz inducida que origina corriente de circulación en los mismos, lo que da lugar a pérdidas de energía por efecto Joule.

Las pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault dependerán del material del que esté constituido el núcleo magnético.

La fórmula de Foucault se encuentra a continuación, de ésta podemos apreciar que un aumento de frecuencia lleva consigo un aumento de pérdidas en el transformador.

$$P_f = 2.2 f^2 \beta_{max}^2 \frac{\Delta^2}{10^{11}} \quad [5.3]$$

Dónde:

P_f las pérdidas de Foucault en $[\frac{W}{kg}]$

f la frecuencia en Hz

β_{max} la inducción máxima en Gauss

Δ el espesor de la chapa magnética en mm.

5.1.4 Pérdidas Adicionales Debidas a los Armónicos.

Las cargas no lineales, tales como dispositivos electrónicos de potencia, como variadores de velocidad en los sistemas de motor, computadoras, etc. Provocan corrientes armónicas en la red. Éstos armónico hace aumentar, ya sea con carga o sin ella, las pérdidas por efecto piel, las corrientes parasitas y las pérdidas por histéresis.

El efecto más importante de estas pérdidas se da en las de Foucault, que puede ser muy grande y por consiguiente la mayoría de los modelos de cálculo ignoran perdidas armónicas inducidas. El impacto preciso de una corriente armónica en la perdida de carga depende de la frecuencia armónica y la forma en que el transformador está diseñado.

En general, la perdida de corriente parasita aumenta a razón del cuadrado de la frecuencia y el cuadrado de la corriente de carga. En un transformador que está muy cargado con corrientes armónicas, las perdidas en exceso pueden causar altas temperaturas en algunos lugares de los bobinados. Esto puede reducir significativamente la vida útil del transformador y además causar daños inmediatos e incendios.

5.3 Métodos de Transmisión del Calor.

El calor producido por las pérdidas se transmite a través de un medio hacia el exterior, para este caso el medio es el aceite dieléctrico.

La transmisión de calor será más o menos eficiente en función de la variación de:

- ✓ La masa volumétrica del aceite dieléctrico.
- ✓ La viscosidad cinemática.
- ✓ El calor específico.
- ✓ La conductividad térmica
- ✓ El coeficiente de dilatación térmica.
- ✓ La densidad relativa.

Cada ciclo de transferencia de calor en el esquema 5.1 comprende métodos de transferencia de calor distintos, existen 3 métodos de transferencia de calor:

- ✓ Por conducción
- ✓ Por convección
- ✓ Por radiación

5.3.1 Transferencia de calor por Conducción.

La conducción puede definirse como la propagación de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso, mediante comunicación molecular directa o entre cuerpos a distintas temperaturas. El medio a través del cual la conducción se da en forma íntegra es en el sólido. En los medios líquido o gaseoso, a menos que se esté prácticamente con cero energías cinéticas en las moléculas, el

impacto de la conducción en la transferencia de calor es mínimo. En este caso, la convección es el mecanismo de transferencia más significativo.

De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, al tenerse la situación anterior, la transferencia de calor se llevará a cabo desde la región con la temperatura mayor hacia la región con la temperatura menor. La ecuación más básica para la conducción de calor, conocida como la ley de Fourier de conducción de calor, establece que la cantidad de calor por unidad de área que fluye de un punto a una temperatura T_1 , a otro con una temperatura T_2 , en la dirección X .

5.3.2 Transferencia de calor por convección.

Es un proceso de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento de un fluido (líquido o gas) y está íntimamente relacionado con su movimiento. Generalmente, el movimiento del fluido es en dirección paralela a una superficie sólida, a través de la cual, el fluido cede o absorbe calor. Para que exista el flujo de calor, debe haber una diferencia de temperaturas entre el fluido y el sólido.

Hay dos clasificaciones del fenómeno de convección, la convección forzada y la convección natural. La primera se da cuando el movimiento del fluido se debe a la acción de algún agente externo, como: una bomba, un abanico, o situaciones ambientales. En este caso, se fuerza el movimiento del fluido sobre la superficie, presentándose una velocidad del fluido que, dependiendo de la geometría de la superficie expuesta, da origen a que se establezca un flujo laminar o un flujo turbulento. La segunda clasificación se presenta al estar el fluido en presencia de zonas a diferentes temperaturas, lo cual provoca cambios de densidades en el mismo, ocasionando un movimiento natural de las zonas de mayor a menor densidad. Comúnmente, el régimen de fluido que se establece para la convección natural o libre es laminar.

Independientemente si la convección es natural o forzada, la velocidad relativa del fluido en la interfase sólido - fluido es cero, por lo que, sólo en esa zona, el calor se transfiere por conducción. Sin embargo, el cálculo del flujo de calor en esa zona es bastante complejo, ya que depende muy íntimamente de las propiedades del fluido, que, en la mayoría de los casos, son complejas en ese punto. Es por ello, que se prefiere calcular el flujo de calor en términos de la diferencia total de temperaturas entre la superficie y el fluido. Con la intención de simplificar los cálculos relacionados con este fenómeno, que se presenta entre una superficie a una temperatura T_s y un fluido a una temperatura T_f , se tiene la siguiente ecuación, conocida como: ley de enfriamiento de Newton, la cual está definida como sigue:

$$Q = h(T_s - T_f) \quad [w] \quad [5.4]$$

Q Calor por unidad de área. $[\frac{W}{m^2}]$

h Coeficiente de convectividad del aceite dieléctrico $[\frac{W}{m^2 K}]$

Ts Temperatura de la interfase sólido-líquido. [k]

Tf Temperatura del fluido o medio ambiente [k]

5.3.3 5.2.3 Transferencia de Calor por Radiación.

Es la emisión de ondas electromagnéticas que se desplazan a la velocidad de la luz representan en temperaturas elevadas un mecanismo de pérdidas de calor. En los transformadores la transferencia de calor a través del tanque y las aletas es por radiación.

La transferencia de calor por radiación se puede determinar mediante:

$$Q = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4) \text{ [w]} \quad [5.5]$$

Donde:

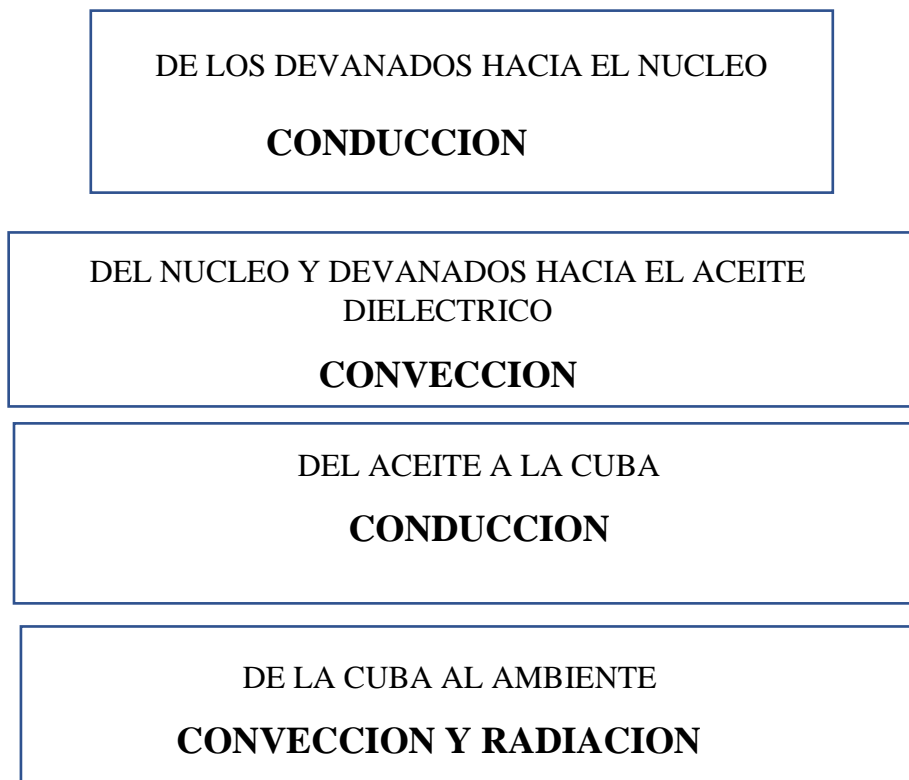
ε Emisividad de la superficie $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} k^4$

As área de la superficie radiante

Ts temperatura de la superficie radiante.

Talred Temperatura del medio.

5.4 Ciclos de Transferencia de Calor en el Transformador



ESQUEMA 5.1

Claramente en un estudio de transferencia de calor en un transformador implica considerar la variación de la temperatura con respecto al tiempo, como también el cambio de temperatura en todas las direcciones de la geometría del transformador, lo cual conlleva un análisis matemático complejo, tal análisis comienza con el desarrollo de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k_r \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\infty} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad [5.6]$$

Dónde: T Temperatura

∞ Coeficiente térmico.

φ, r, z Coordenadas cilíndricas para el análisis en tres dimensiones del transformador.

Sin embargo, podemos simplificar este análisis mediante modelos empíricos y modelar el transformador como una analogía de un circuito eléctrico

5.5 Circuito Térmico del Transformador.

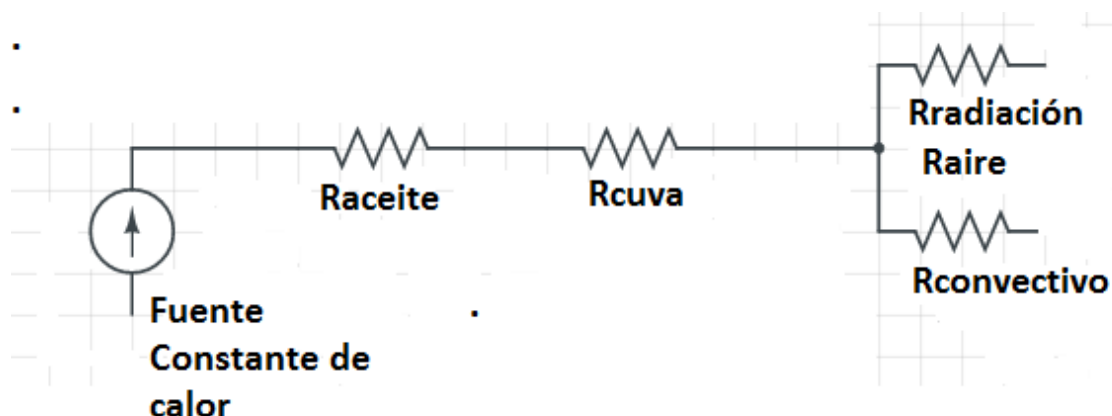


Figura 5.2 Circuito térmico del transformador

En la figura 5.2 presentamos la analogía que tendría el proceso de transferencia de calor con un circuito eléctrico, se observa una fuente de calor constante debida a las pérdidas de las partes activas del transformador, en el modelo se aplica el concepto de resistencia térmica como analogía a la resistencia eléctrica, siendo esta dependiente del método de transferencia de calor.

De acuerdo con el diagrama, existen 4 resistencias térmicas, las cuales se deben a la transferencia de calor por conducción, convección y radiación, el proceso correspondiente a cada una se describe a continuación:

R aceite [convección]

R cuba [Conducción]

R aire [Conducción y radiación]

5.6 Circuito Simplificado Para la Comparación de Transferencia de Calor.



Figura 5.3 circuito simplificado

Se hará el análisis de transferencia de calor para una condición estacionaria, para la cual la temperatura máxima a la que pueden estar sometidas las partes activas del transformador y la temperatura que se establece en las regiones externas están dadas de acuerdo a las normas IEEE C57.154-2012 -IEC60076-14. Para el caso de la resistencia térmica del aceite el análisis se hará por los métodos empíricos de la convección tomando datos de fabricantes y para el caso de la cuba es un análisis de conducción de calor tomando como referencia materiales típicos de fabricación de transformadores.

5.7 Temperaturas Máximas

De acuerdo con las normas IEEE C57.154-2012 -IEC60076-14 establecemos nuestras temperaturas máximas que estaría sometido el transformador, en la Tabla 5.1 se muestra un abstracto de la referencia (ABB)

	IEEE C57.154-2012		IEC60076-14	
	Mineral oil	Ester fluid	Mineral oil†	Ester fluid
Maximum continuous temperature rise limits for transformers with high-temperature insulation systems				
Minimum required high-temperature solid insulation thermal class	120	140	120	140
Top liquid temperature rise, (°C)	65	90	60	90
Average winding temperature rise, (°C)	65	85	75	95
Hottest spot temperature rise, (°C)	80	100	90	110
Suggested maximum overload limits for transformers with high-temperature insulation systems				
Maximum top liquid temperature with normal life expectancy (°C)	105	130	105	130
Maximum top liquid temperature with loading above nameplate rating (°C)	110	140	115	140
Maximum solid insulation hottest spot temperature with normal life expectancy (°C)	120	140	115	140
Maximum solid insulation hottest spot temperature with planned loading beyond nameplate rating (°C)	130	150	130	150
Maximum solid insulation hottest spot temperature with long-term emergency loading (°C)	140	160	140	160

FIGURA 5.3

Una vez definidas las temperaturas establecemos nuestra ecuación de transferencia de calor



Figura 5.4 circuito final simplificado

La transferencia de calor está dada por:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_{TOTAL}} \quad (w) \quad [5.7]$$

Donde: $R_{TOTAL} = R_{ACEITE} + R_{CUBA}$.

5.7.1 Cálculo de la Resistencia de la cuba

La resistencia debida a la cuba del transformador se debe a la conducción y está dada por la ley de Fourier de la conducción del calor y se calcula de acuerdo de la ecuación [5.8].

$$R_{CUBA} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * k} \left(\frac{K}{W}\right) \quad [5.8]$$

Las ecuaciones [5.8] y [5.9] están basadas en una superficie cilíndrica la cual sería nuestra geometría aproximada para el cálculo de la transferencia de calor.

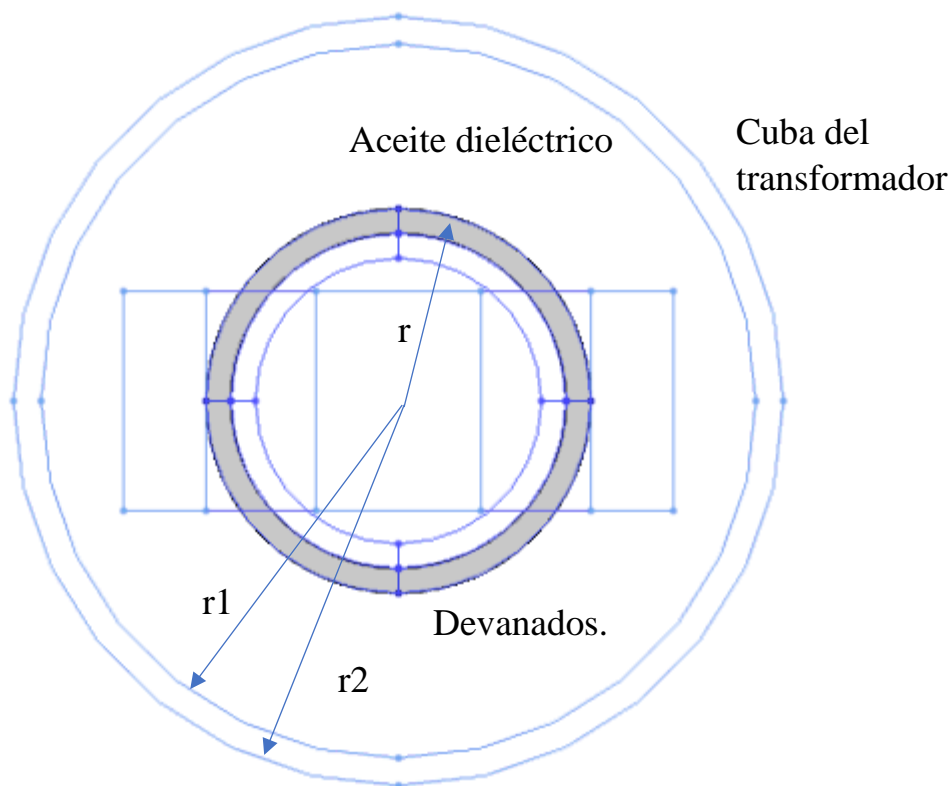


Figura 5.5 Geometría cilíndrica del transformador

Considere la geometría del transformador como el de la figura 5.3 como una geometría cilíndrica de altura L y diámetro r de la cara exterior del devanado primario, con radio r2 de cara exterior de la cuba y r1 radio de la cara interior de la cuba.

El dimensionamiento de nuestro transformador está basado en las medidas típicas de un transformador tipo poste monofásico de 15 kVA de potencia de acuerdo a la referencia de transformadores. (PROLEC)

$$\text{Altura } L = 632 \text{ mm} = 0.632 \text{ m}$$

$$r_2 = 325 \text{ mm} = 0.325 \text{ m}$$

$$r_1 = 315 \text{ mm} = 0.315 \text{ m}$$

$$r = 155 \text{ mm} = 0.15 \text{ m}$$

De acuerdo a la ecuación [5.8] necesitamos conocer el coeficiente de conductividad de material de la cuba, en este caso consideramos acero inoxidable, el cumple bajo la normativa AISI 304, se toma la conductividad térmica dada por el fabricante según la referencia (TESTO)

$$K \text{ acero inoxidable} = 16.3 \left[\frac{\text{W}}{\text{mk}} \right]$$

$$\text{Sustituyendo en [5.9]} \quad R_{\text{CUBA}} = \frac{\ln\left(\frac{0.325}{0.315}\right)}{2 * \pi * 0.632 * 16.3} = 0.000239162 \text{ [k/w]}.$$

Se puede observar una resistencia térmica bastante pequeña

5.7.2 Determinación de R_{ACEITE} Mineral y Vegetal.

El método de transferencia de calor en el aceite es por convección y está dada por la ley del enfriamiento de Newton, para la cual se define la resistencia térmica debida a la convección.

La resistencia térmica por convección está dada por:

$$R_{\text{aceite}} = \frac{1}{h * a} \left(\frac{\text{K}}{\text{W}} \right) \quad [5.9]$$

Donde:

a Área de del fluido convectivo

h Coeficiente convectivo del aceite dieléctrico.

De acuerdo con la ecuación [5.8] necesitamos conocer el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección la cual es:

$$A = 2 * \pi * r * L \quad [5.10]$$

Sustituyendo

$$A = 2 * \pi * 0.15 * 0.632 = 0.6 \text{ [m}^2\text{]}$$

También es necesario conocer el coeficiente de convectividad del aceite el cual puede determinarse por los métodos empíricos, tal como se muestra en la ecuación [5.11].

$$h = \frac{k}{L} \text{Nu} \quad [5.11]$$

Donde

k es la conductividad térmica del aceite mineral, dada por el fabricante.

L es la longitud que corresponde a la altura de nuestro transformador.

Nu es el coeficiente adimensional de transferencia de calor por convección, Nusselt.

El número de Nusselt para nuestra geometría aproximada del transformador, un cilindro, sin embargo, se puede aproximar de acuerdo a la tabla 5.1 a una placa vertical y entonces está dado por la ecuación [5.12]

$$\text{Nu} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \cdot \text{Ra}_L^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \frac{0.492 \cdot \text{Pr}^{\frac{8}{27}}}{\text{Pr}} \right]^{\frac{1}{4}}} \right\}^2 \quad [5.12]$$

Donde:

Ra_L Es la relación entre flotabilidad y viscosidad dentro del fluido Rayleigh y se calcula para un recinto cerrado [5.13].

$$\text{Ra}_L = \frac{g\beta(T_s - T_{ac})^2 \cdot L_c^3}{\nu^2} * \text{Pr} \quad [5.13]$$

Pr Describe el espesor relativo de las capas límite de velocidad Prandtl y térmica y está dada por la ecuación [5.14].

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad [5.13]$$

Donde:

μ Viscosidad dinámica del aceite.

C_p Calor específico del aceite.

k Conductividad térmica del aceite.

g Aceleración gravitacional.

β Coeficiente de expansión Volumétrica y está dado por la ecuación ($\beta = \frac{1}{T_f}$)

$T_f = \frac{T_s + T_{ac}}{2}$ Temperatura de película

T_s Temperatura de la superficie, en este caso de los devanados y núcleo.

$T_{\text{aceite-cuba}}$ Temperatura del fluido en la interfaz cuba aceite.

ν Viscosidad cinemática del fluido a la temperatura de película.

Luego de realizar los cálculos para la determinación de h , utilizamos la ecuación $R_{\text{aceite}} = \frac{1}{h \cdot a}$ ($\frac{k}{W}$) [5.8]

Para el cual $a = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 0.15 \cdot 0.632 = 0.632 \text{ m}^2$

Una vez establecidas las resistencias, procedemos al cálculo de la transferencia de calor

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{\text{TOTAL}}} = \frac{T_s - T_{ac}}{R_{\text{aceite}} + R_{\text{cuba}}} \quad [5.15]$$

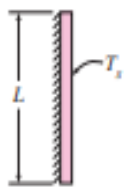
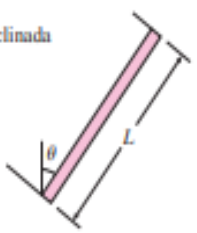
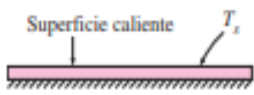

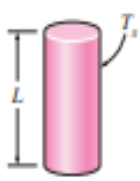
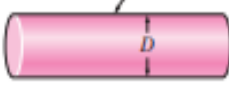
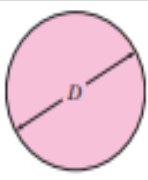
De acuerdo a los resultados obtenidos para la resistencia térmica de la cuba, su valor es muy pequeño por lo que se asumirá que la temperatura en la cara exterior de la cuba será la misma en la interfaz cuba aceite de esta forma la ecuación [5.15] se aproximará como sigue:



Figura 5.6

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{\text{TOTAL}}} = \frac{T_s - T_{ac}}{R_{\text{aceite}}} \quad [5.16]$$

Tabla 5.1 (CENGEL, 2005)

Configuración geométrica	Longitud característica L_c	Intervalo de Ra	Nu
Placa vertical 	L	$10^4 - 10^9$ $10^9 - 10^{13}$ Todo el intervalo	$Nu = 0.59Ra_1^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra_1^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_1^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{1/4}} \right\}^2$ (9-21) (compleja pero más exacta)
Placa inclinada 	L		Utilícese las ecuaciones de la placa vertical para la superficie superior de una placa fría y la superficie inferior de una placa caliente Reemplácese g por $g \cos \theta$ para $Ra < 10^9$
Plástico horizontal (Área superficial A y perímetro p) a) Superficie superior de una placa caliente (o superficie inferior de una placa fría) 	A_s/p	$10^4 - 10^7$ $10^7 - 10^{11}$	$Nu = 0.54Ra_1^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0.15Ra_1^{1/3}$ (9-23)
b) Superficie inferior de una placa caliente (o superficie superior de una placa fría) 		$10^5 - 10^{11}$	$Nu = 0.27Ra_1^{1/4}$ (9-24)
Cilindro vertical 	L		Un cilindro vertical puede tratarse como una placa vertical cuando $D \geq \frac{35L}{Gr_1^{1/4}}$
Cilindro horizontal 	D	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{1/4}} \right\}^2$ (9-25)
Esfera 	D	$Ra_D \leq 10^{11}$ $(Pr \geq 0.7)$	$Nu = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469/Pr)^{9/16}]^{1/4}}$ (9-26)

5.8 Análisis de Resultados

El cálculo de la transferencia de calor no ha sido posible debido a falta de datos, sin embargo se utilizara la investigación realizada por (TORREGROZA, 2018) en el que utiliza el programa COMSOL MULTIPHYSICS para evaluar el comportamiento térmico del transformador utilizando aceite mineral y lo comparan con el vegetal, los resultados que obtuvieron se muestran en la Figura 5.4

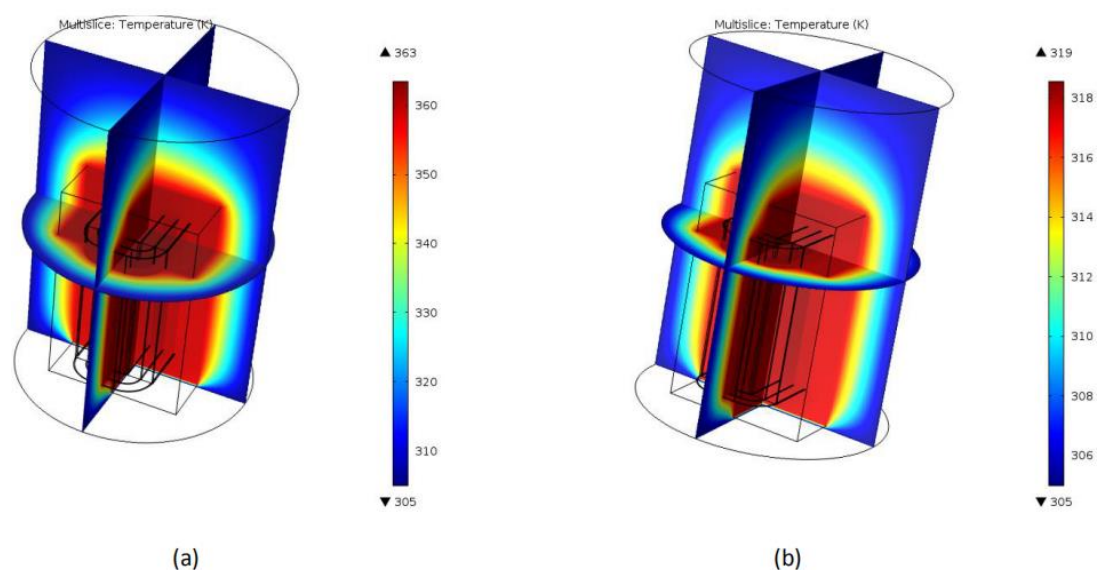


Figura 5.7 comportamiento térmico (a) vegetal (b) mineral (TORREGROZA, 2018)

En la Figura se observa un valor máximo de temperatura de 363 K (89.85 °C) para el aceite vegetal y de 319 K (45.85 °C) para el aceite mineral. Estas temperaturas máximas representan una relación de un 113% del aceite vegetal con respecto al mineral, es decir 44 grados más en el aceite vegetal como punto mínimo de temperatura para ambos casos se tiene un valor de 306 K (31.85 °C), esto corresponde a la temperatura ambiente del entorno.

Para el caso del aceite vegetal, la diferencia entre la temperatura máxima y mínima es de 57 grados, mientras que para el caso del aceite mineral sólo llega a 13 grados.

En el caso del núcleo del transformador, su parte externa presenta valores cercanos a los 350 K en el aceite vegetal y de 316 K en el mineral. Una diferencia que supone 34 grados entre ambos valores y que en el caso del aceite mineral supone sólo 2 grados menos que su máxima temperatura, mientras que en el del aceite vegetal supone 13 grados, lo que puede estar relacionado con una mayor capacidad térmica del aceite vegetal y la baja viscosidad del aceite mineral. Esto último permite al aceite mineral moverse más fácilmente entre las distintas partes del transformador y la mayor capacidad térmica del aceite vegetal, permite que el calor sea transferido con mayor

velocidad al aceite desde las partes activas del equipo, posteriormente a la cuba y finalmente sea disipado hacia el exterior.

6 Estudios Posteriores o Futuras Investigaciones

El estudio en nuevas tecnologías en el campo que se refiere a los aceites vegetales abren nuevos desafíos en la investigación. En El Salvador el ingreso de esta nueva tecnología de aceite para ayudar a combatir el cambio climático, se necesitan estudios que ayuden a comprender los cambios generados por dicha tecnología podrían incluir los siguientes campos.

Diseños particulares para transformadores inmersos en aceite vegetal

Estudio de envejecimiento y estimación de vida útil a escala real

Diagnóstico de transformadores en servicio con éster natural (inspección y monitoreo).

Afinidad con todos los materiales y accesorios empleados en la fabricación de un transformador inmerso en aceite vegetal.

Nuevos diseños de transformadores que mejoren el desempeño con aceites vegetales.

Evaluación de condiciones críticas en transformadores sumergidos en aceite.

7 Conclusiones

- Las propiedades físicas, químicas y eléctricas del aceite permiten evaluar el comportamiento del transformador; de acuerdo a la normativa IEEE C57-147-2008 se definen las propiedades para aceites de éster natural y la normativa IEEE C57-106-2015 que establece las propiedades para aceite mineral, entre las más importantes están: la rigidez dieléctrica, contenido humedad, número ácido, viscosidad cinemática, densidad relativa etc. Para las cuales se establecen valores máximos y mínimos en cada propiedad de acuerdo al tipo de aceite y de acuerdo a las condiciones de uso, es decir, para transformadores nuevos y sustitución para transformadores en operación.
- El aceite mineral nuevo tiene menos contenido de humedad, sin embargo, debido a las propiedades químicas del aceite vegetal, el agua no migra al aislante sólido garantizando una mayor vida útil del transformador. En condiciones anormales (fugas) el aceite vegetal tiene la propiedad de absorber grandes cantidades de agua, sin embargo, la rigidez dieléctrica sufre una disminución menor que un aceite mineral.
- En base a los datos obtenidos sobre la viscosidad cinemática de los diferentes tipos de aceite se concluye que: el aceite vegetal presenta una viscosidad hasta 4 veces mayor que la que presentan los aceites minerales disponibles en el mercado, por lo que dicha característica afecta directamente el proceso de refrigeración, es decir, el proceso de circulación de aceite desde las partes más calientes hacia las frías es más lento al usar un aceite vegetal lo que se manifiesta en una elevación de temperatura en el núcleo.
- De acuerdo a la investigación hecha para la rigidez dieléctrica, los fabricantes presentan a los aceites vegetales nuevos y de acuerdo a la norma ASTM D877 con valores mayores respecto a los aceites minerales, lo que permite una mayor capacidad de soportar las sobretensiones, sin embargo, la normativa establece valores mínimos de ruptura dieléctrica iguales en ambos aceites, la rigidez dieléctrica se reduce por la presencia de agua mayormente cuando se presenta el efecto de turbidez.
- Los fabricantes de aceites vegetales presentan puntos de inflamación e ignición mayores comparados con los que presentan los fabricantes de aceite mineral, es decir, que permiten alcanzar elevadas temperaturas sin que se dé la combustión, esto significa que los aceites vegetales son más seguros e idóneos para su aplicación en ambientes encerrados o que se requiera una alta seguridad contra incendios.

- El aceite vegetal presenta un mayor número de acidez respecto al aceite mineral, esto significa que el transformador que contenga aceite vegetal sufrirá en proporciones mayores problemas de corrosión en sus constituyentes metálicos y la generación de lodos harán aún más difícil la circulación del aceite vegetal en los espacios pequeños como por ejemplo las secciones del núcleo y el aislamiento sólido. Un alto número de acidez provocaría que el aceite vegetal tenga bajos valores de estabilidad a la oxidación.
- El aceite vegetal ayuda a solventar la crisis medioambiental, gracias a su alto porcentaje de biodegradabilidad (99%), por el contrario, el aislante mineral tiene un 30%, lo cual garantiza una rápida descomposición en el medio. El aceite vegetal es una tecnología renovable, no contaminante y sostenible debido a la materia prima utilizada para su fabricación.
- De acuerdo a los trabajos realizados por (TORREGROZA, 2018) indican que el aceite vegetal posee una mayor capacidad de transferir el calor desde las bobinas y el núcleo hacia la cuba y de esta al exterior, sin embargo, la alta viscosidad del aceite vegetal no permite una rápida circulación del aceite, lo que se manifiesta como un incremento considerable en la temperatura caso contrario en el aceite mineral, pues la rápida circulación del aceite hace que la temperatura del transformador no se eleve considerablemente.
- Los métodos de ensayo para obtener las propiedades físicas, químicas y eléctricas del aceite se definen según las normativas de pruebas ASTM. Los ensayos para aceites vegetales en general están definidos por el mismo procedimiento que los ensayos para aceite mineral; sin embargo, se deben tomar en cuenta los cambios de viscosidad y densidad para el uso de equipo que fue destinado para su funcionar con las características del aceite mineral
- Los procesos de readecuación del aceite mineral son aplicables al aceite vegetal; sin embargo, se deben tener en cuenta ciertas consideraciones para el buen funcionamiento de las bombas de recirculación, principalmente la potencia de las bombas debe ser mayor debido a la elevada viscosidad del aceite vegetal. El procedimiento por filtros de papel secante funciona a la perfección para eliminar el agua libre en aceite vegetal y ya se cuenta con filtros diseñados de acuerdo a las características de los esteres naturales. Al igual que para el aceite mineral, el procedimiento con deshidratador de alto vacío es un método aplicable para eliminar los gases y agua disuelta en esteres naturales, mientras que el proceso de eliminación de los desechos, lodos y demás contaminantes producidos por el deterioro del aislante sólido se realizan por medio de tierra Fuller u otros absorbentes que se encargan de sustraer dichas partículas.

8 Bibliografía

- [1], T. I. (s.f.). Transformadores Electricos. <http://www.tecnologia-industrial.es/Transformador.htm>.
- [10], P. (s.f.). PUMA INSULATING INHIBITED II OIL Aceites aislantes para transformadores. .
- [11], M. U. (s.f.). <https://www.mobil.com.mx/es-mx/industrial/lubricants/products/univolt-n-61-b>.
- [12], D. S.-4.-4. (s.f.). https://www.raloylubricantes.mx/informacion/hds/Dielectrico_S-40.pdf.
- [13], D. S.-I. (s.f.).
[https://www.smithandallan.com/documents/GPCDOC_Local_TDS_United_Kingdom_Shell_Diala_S3_ZX-IG_Dried_\(en-GB\)_TDS.pdf](https://www.smithandallan.com/documents/GPCDOC_Local_TDS_United_Kingdom_Shell_Diala_S3_ZX-IG_Dried_(en-GB)_TDS.pdf).
- [14], D. S.-I. (s.f.).
https://hyvamaa.fi/application/files/6514/3039/3113/GPCDOC_X_cbe_24855_key_140006501083_201109160951.pdf.
- [15], D. S.-A.-A. (s.f.). <http://www.purseroil.com/wp-content/uploads/pdf/DialaS2ZX-A.pdf>.
- [16], D. S.-I.-D. (s.f.). <http://rkpl.com.bd/wp-content/uploads/2016/08/Shell-Diala.pdf>.
- [17], A. D. (s.f.). <https://www.jomsmx.com.mx/index.php/insumos/aceites-dielectricos/product/201-ipielectric-501>.
- [18], T. d. (s.f.). <http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.12.2.2016.08>.
- [19], A. (2014). Nuevos materiales usados en la fabricación de transformadores ABB . Lima Perú .
- [20], a. (s.f.). Desarrollos tecnológicos materiales ABB group.
- [21], I. (2003). IEEE Transformador Committee Presentation, Cooper Power Systems, Oct. 2003.
- [22], R. (s.f.). REPSOL, gama dieléctricos.
- [5], A. D.-0. (s.f.). [5] ASTM D 6871-03 Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus1.
- [6], B. (s.f.). [6] BIOTEMP® Transformer Technology for Innovative Compact Substation.
- [7], S. (s.f.). [7] Aceite Dieléctrico Biodegradable de Prolec GE.
- [9], E. (s.f.). [9] FLUIDO ® ENVIROTEMP ®FR3.

- ABB. (s.f.). Eco-friendly ester liquid. CANADA: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107046A6496&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=A>.
- ANTILLÓN, F. A. (2015). Propuesta de diseño para el laboratorio de pruebas para transformadores de distribución y potencia, para la Escuela de Ingeniería Eléctrica. SAN SALVADOR: SE.
- Brettis. (2018). Modulo Nueve - ACEITES PARA TRANSFORMADORES - 08Transformadores.pdf.
- BUSHINGS. (s.f.). [22] <http://imseingenieria.blogspot.com/2016/06/bornas-bushings-de-transformadores.html>.
- CENGEL, Y. (2005). TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. MEXICO: MC GRAW HILL.
- D-6871, A. (2003). ASTM D 6871-03 Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus1.
- GARCÍA, E. (s.f.). [23] <https://es.slideshare.net/EdgardoGarcia5/cambio-de-tap>.
- mineral, R. d. (s.f.). <http://www.revistaei.cl/reportajes/aceite-mineral-mas-usado-los-transformadores-alta-tensaceite-mineral-es-el-mas-usado-para-los-transformadores-de-alta-tension-ion/>.
- PROLEC. (s.f.). TRANSFORMADORES TIPO POSTE. https://www.agronoms.cat/media/upload/editora_24/Transformadores%20tipo%20Poste_editora_242_148.pdf.
- SIGET. (2003). SIGET “301-E-2003 Normativa de Materiales y Equipos para construcción de Líneas Aéreas y sus Anexos” Transformadores de distribución.
- TESTO. (s.f.). TABLA DE EMISIVIDADES. <https://static-int.testo.com/media/bd/b7/179e2db5dca8/Emissivity-table-ES.pdf>.
- TORREGROZA, M. a. (2018). Comportamiento Térmico de Transformadores . BARRANQUILLA, COLOMBIA: http://www.advancesincleanerproduction.net/7th/files/sessoes/6B/8/torregroza_et_al_academic.pdf.
- TRADUCCIÓN. (2019). TRADUCCION STD IEEE C57-147. ES: SE.
- TRANSFORMADOR, P. C. (s.f.). <https://rte.mx/partes-constructivas-de-los-transformadores>.
- TRANSFORMADOR, P. D. (s.f.). <https://riverglennapts.com/es/transformer-accessories/887-different-types-of-transformer-winding.html>.

WILLIAM SALVADOR, M. A. (2014). Evaluación térmica en transformadores de potencia, cargabilidad y efectos en la vida del sistema de aislamiento. SAN SALVADOR.