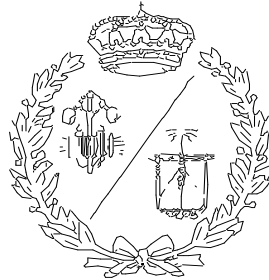


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Carrera

**ESTUDIO FLUIDO-TÉRMICO DE VARIOS ACEITES DE
SILICONA EN UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA.**
(Fluid-thermal study of various silicone oils in a power
transformer)

Para acceder al Título de

**INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL
ESPECIALIDAD ELECTRICIDAD**

Autor: Emilio Cicuéndez Simonneau

Octubre – 2012

Índice general

<u>Introducción al proyecto.....</u>	<u>1</u>
<u>Capítulo 1. Revisión de la refrigeración en estransformadores de tensión.....</u>	<u>4</u>
1.1. Aspectos constructivos.....	5
1.1.1. Devanados.....	5
1.1.2. Núcleo magnético.....	6
1.1.3. Otros elementos.....	6
1.1.4. Sistemas de refrigeración.....	8
1.2. Pérdidas en los transformadores.....	10
1.2.1. Pérdidas en vacío.....	10
1.2.2. Pérdidas en carga.....	12
1.2.3. Pérdidas auxiliares.....	13
1.3. Calentamiento.....	14
1.3.1. Métodos de transmisión de calor.....	15
1.4. Transformador de ABB.....	16
Características principales.....	16
Características constructivas.....	17
Ensayos realizados.....	19
<u>Capítulo 2. Nuevos líquidos dieléctricos.....</u>	<u>20</u>

2.1. Introducción.....	21
2.2. Comparación de las propiedades de los líquidos aislantes.....	23
2.2.1. Propiedades físico-químicas.....	23
2.2.2. Propiedades eléctricas.....	26
2.3. Rellenado.....	29
2.3.1. Compatibilidad de los materiales.....	31
2.3.2. Precauciones de manejo de los líquidos alternativos.....	33
2.4. Como incide en el diseño de los equipos los líquidos alternativos.....	34
2.4.1. General.....	34
2.4.2. Diseño de la cuba.....	35
2.4.3. Diseño dieléctrico.....	37
2.4.4. Diseño de la refrigeración	38
2.4.5. Accesorios de los transformadores.....	40
2.5. Fluidos alternativos vs sistemas de aislamiento sólidos.....	41
2.5.1. Aislamiento de celulosa.....	42
2.5.2. Sistemas celulosa-fluidos alternativos.....	42
2.5.3. Sistemas de Aramida para altas temperatura.....	43

2.5.4. Sistemas de aislamiento híbridos.....	45
2.6. Normativa internacional aplicable a los líquidos dieléctricos.....	45
<u>Capítulo 3. Modelo de simulación en COMSOL.....</u>	48
3.1. Objetivos.....	48
3.2. Interpretación del modelo.....	50
3.2.1. Producción de calor.....	54
3.2.2. Principios físicos.....	57
3.2.3. Parámetros de los fluidos de refrigeración analizados....	59
3.3. Otros parámetros de estudio que caracterizan un fluido.....	69
3.3.1. El número de Prandtl.....	70
3.3.2. El número de Reynolds.....	70
3.3.3. El número de Nusselt.....	71
3.4. Método de análisis.....	72
3.4.1. Metodo de los elementos finitos (MEF).....	73
3.4.2. Comsol Multiphysics®.....	75
<u>Capítulo 4. Conclusiones.....</u>	90
4.1. Introducción.....	91
4.2. Resultados de las temperaturas.....	91

4.3. Resultados de las velocidades.....	97
4.4. Cálculo del número de Prandtl.....	99
4.5. Conclusiones del estudio.....	100
<u>Capítulo 5. Referencias bibliográficas.....</u>	102
5.1 Bibliografía citada en el proyecto.....	103

Estudio fluido-
término de varios
aceites de silicona
en un
transformador de
potencia.
Introducción del
proyecto.

INTRODUCCIÓN DEL PROYECTO:

El exponencial crecimiento de la industria y la tecnología en el último siglo hace necesario el constante replanteamiento y análisis de las ventajas y desventajas del uso actual de determinados materiales (sólidos y fluidos). Conseguir un desarrollo sostenible y provechoso de los recursos impone la optimización en los costes, la valoración de los efectos medioambientales y la consideración de los potenciales peligros.

Un claro ejemplo de este crecimiento industrial son las líneas de transporte de energía eléctrica que progresivamente deben satisfacer mayores demandas y más exigentes condiciones de funcionamiento. Un elemento fundamental en estas redes de distribución son los transformadores eléctricos. En ellos, con el doble objetivo de la refrigeración y el aislamiento eléctrico, se viene usando de forma generalizada en transformadores de potencia, aceites minerales. Larga experiencia en la utilización de este líquido dieléctrico lo verifica como válido, aunque se plantean problemas que se busca solucionar. Estos problemas son los que se van a desarrollar en este proyecto, tales como la durabilidad del fluido y de los elementos del transformador en contacto con este, la posibilidad de incendios y explosiones, la seguridad medioambiental, presencia de humedad, etc.

De manera creciente durante las últimas cuatro décadas hasta la actualidad, el conocimiento de estas deficiencias en el uso de aceites minerales, hace que la industria del transporte y distribución de energía eléctrica haya expresado su necesidad e interés por la investigación en fluidos dieléctricos alternativos al aceite mineral, que sean medioambientalmente respetuosos, mejoren las condiciones de funcionamiento y de seguridad y otras negativas posibles repercusiones.

Este proyecto constituye el estudio concreto de la viabilidad de un tipo de estos líquidos dieléctricos alternativos, los aceites de silicona, desde el aspecto de su funcionamiento en transformadores de potencia,

para el que, en este proyecto, se hace un ensayo comparativo de uno de estos líquidos alternativos con el aceite mineral mediante una herramienta informática que nos permite analizar su comportamiento en un transformador.

Dado que la refrigeración es necesaria debido al calentamiento del transformador durante su funcionamiento, el estudio comienza analizando las características fundamentales de los transformadores de potencia planteando el origen del calentamiento y las consecuentes características constructivas de los tipos de refrigeración y mantenimiento de líquidos. A continuación se presenta una recopilación de los conocimientos actuales sobre líquidos alternativos, llevando a cabo un estudio de sus propiedades que explican las ventajas y limitaciones que poseen.

El estudio profundiza a continuación en el análisis comparativo de varios líquidos alternativos en particular con un aceite mineral. Este análisis se lleva a cabo mediante simulación de un modelo con una herramienta informática de cálculo basada en el método de elementos finitos. Con este análisis concluye este estudio sobre líquidos alternativos, presentando los resultados proporcionados por la herramienta informática y analizando el funcionamiento del líquido alternativo en comparación con el aceite mineral, al objeto de proporcionar argumentos adicionales sobre la viabilidad de la sustitución del aceite mineral por este líquido.

Capítulo 1.
Revisión de la
refrigeración en
los
transformadores
de tensión.

El transformador de potencia es una de las máquinas eléctricas más importantes en cuanto a presencia. Gracias al transformador, es posible que el transporte de energía a grandes distancias sea económico, y tanto más económico cuanto más alta sea la tensión de transporte, lo que hará que la intensidad sea menor y se reduzca la sección de los conductores y las pérdidas en los mismos.

1.1 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Esta constituido por dos devanados, inductor e inducido, a los cuales se llama primario y secundario. Para aumentar la inducción magnética del sistema y mejorar el acoplamiento entre ambos devanados, éstos van acoplados a un núcleo cerrado común.

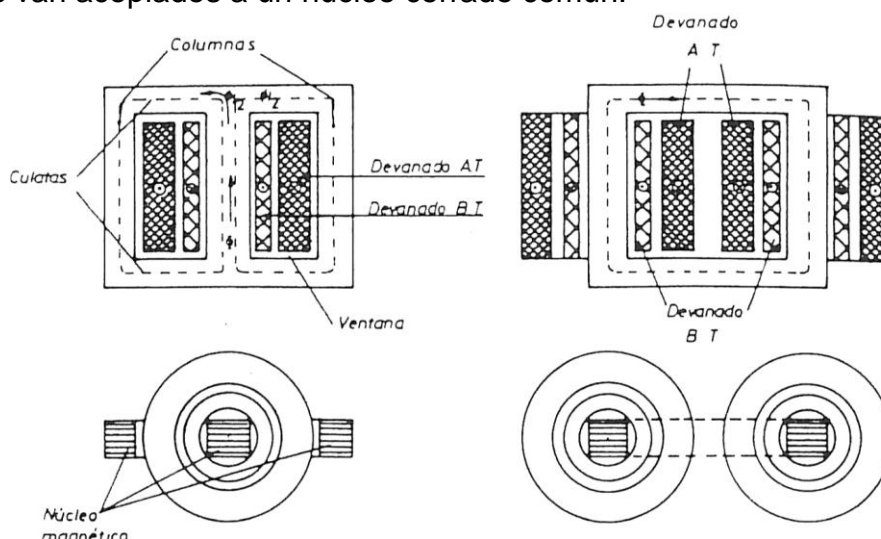


Figura 1.1. Núcleo transformador.

1.1.1 DEVANADOS

Constituyen el circuito eléctrico. Son conductores de cobre, siendo cilíndricos para secciones inferiores a 4mm y pletinas rectangulares si son superiores a dicha sección. Los conductores llevan una capa de barniz aislante para pequeñas potencias, y en el caso de grandes potencias se aísla con una capa de papel o fibra.

Según sea la disposición entre el devanado de alta y el de baja, encontramos devanados concéntricos y devanados alternados.

1.1.2 NUCLEO MAGNÉTICO.

Está formado por chapas de acero al silicio laminadas en frío (con grano orientado), aisladas entre si por una capa de barniz para reducir pérdidas en el hierro, formando el circuito magnético.

El circuito magnético debe tener columnas para alojar los devanados y culatas para realizar la unión física entre dichas columnas. A los espacios entre columnas se les llama ventanas.

1.1.3 OTROS ELEMENTOS

1.1.3.1 AISLADORES PASANTES

Los bornes de los transformadores de media tensión se llevan al exterior de una cuba mediante unos aisladores pasantes de porcelana, rellenos de aire o aceite. Cuando se utilizan altas tensiones aparece un fuerte campo eléctrico entre el conductor terminal y el borde del orificio en la parte superior de la cuba. Para evitar la perforación del aislador, éste se realiza con una serie de cilindros que rodean la borna metálica dentro del espacio

cerrado que contiene el aceite. Los pasatapas de A.T. y B.T. se distinguen por su altura, siendo tanto más altos, cuanto mayor es la tensión. Otro elemento que suelen llevar los transformadores de gran potencia es el llamado relé de gas o relé de Buchholz, es el encargado de proteger a la máquina de sobrecargas peligrosas, fallos de aislamientos, etc.

1.1.3.2 RELÉ DE BUCHHOLZ

Como ya hemos mencionado, el relé protege a la máquina de sobrecargas peligrosas, fallos de aislamientos, etc. Este relé se coloca en el tubo que une la cuba principal con el depósito de expansión, funcionando gracias al movimiento del vapor de aceite, producido por un calentamiento anómalo del transformador que hace bascular un sistema dos flotadores; el primero (número 1 de la figura 1.2) es sensible a las

sobrecargas ligeras, y al descender de la posición mostrada en la figura, provoca la activación de una alarma acústica. El segundo (número 2 de la figura 1.2) es sensible a las sobrecargas elevadas, que dan lugar a una formación de gas en la cuba principal, que al empujar al flotador provoca el cierre del circuito de unos relés que controlan el disparo de unos disyuntores de entrada y salida del transformador.

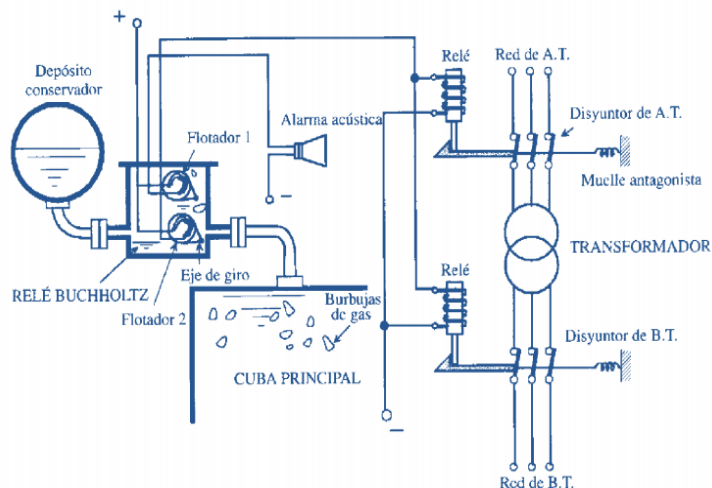


Figura1.3. Relé de Buchholz y esquema eléctrico de protección.

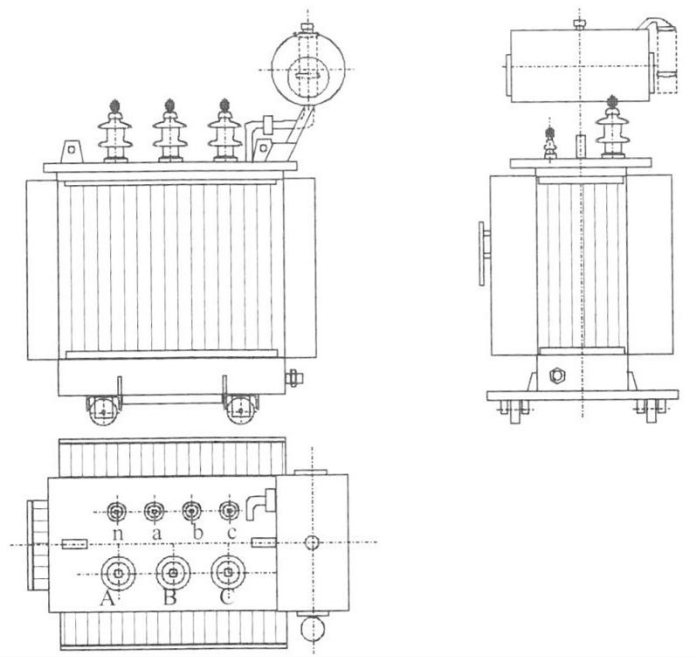


Figura 1.3. Alzado, planta y perfil de un transformador.

En la figura 1.3 podemos observar, mirando el transformador por la parte de A.T que aparecen las letras ABC para designar los terminales de A.T. E igualmente para el lado de B.T las letras abc. El neutro, se señala con n o N, y va colocado a la izquierda del terminal a o A [14]

1.1.4 SISTEMA DE REFRIGERACION

En el transformador, como en el resto de las máquinas eléctricas, existen pérdidas que se disipan en forma de calor y que contribuyen al calentamiento de la máquina. En el caso de pequeñas máquinas, la superficie exterior es suficiente para evacuar el calor, denominándose éstos, transformadores en seco. Sin embargo, para máquinas de mayores potencias, para evitar que las altas temperaturas afecten a los aislamientos, se emplea un dieléctrico (generalmente aceite) como refrigerante, denominándose transformadores en baño de aceite. Este dieléctrico actúa tanto como aislante como refrigerante gracias a que su capacidad térmica y su rigidez dieléctrica son superiores a las del aire. En estos últimos la parte activa del dieléctrico se introduce en la cuba, la cual tiene el objetivo de eliminar el calor por radiación o convección natural.

Desde un punto de vista conceptual, la reducción de vida útil de un dieléctrico se produce por un incremento de temperatura, independientemente de que éste sea provocado por una disipación de calor debida al efecto Joule en los conductores, por un incremento de la temperatura ambiente o por un fallo en el sistema de refrigeración.

1.1.4.1 DISEÑO DE LA CUBA

Las cubas son recipientes empleados para preservar líquidos. Existen diferentes tipos de cubas en función de su uso. A continuación se muestran los diferentes sistemas de las cubas más comunes, que son las que portan líquidos dieléctricos:

Sistemas de tanque sellado: tienen el tanque interior hermético de la atmósfera y mantienen una especie de colchón de gas o un espacio que se asienta sobre el líquido. El volumen del conjunto, gas y líquido, se mantiene constante. En estos tipos de tanques pueden darse presiones internas negativas en bajas cargas o temperaturas y presiones positivas con carga e incremento de temperatura.

Sistemas de presión positiva: llevan consigo el uso de gases inertes para mantener la presión positiva en el espacio de gas. Un gas inerte, habitualmente el de una botella de nitrógeno comprimido, es progresivamente inyectado en el espacio de gas cuando la presión interna cae fuera de rango.

Sistemas con depósito de expansión: poseen un depósito auxiliar situado en la parte superior del transformador. Son usados tanto con o sin bolsa de aire. Si la poseen, proporcionan una mayor separación de la atmósfera exterior. Estas bolsas se denominan también “vejigas” o diafragmas por su funcionamiento. El tanque principal del transformador está completamente lleno de líquido. Y el tanque auxiliar está parcialmente lleno, cambiando esta situación según las expansiones y contracciones del líquido.

1.1.4.2 NOMENCLATURA UNE

La UNE, en su norma EN 60076, establece que la nomenclatura del sistema de refrigeración consta de cuatro letras, cuyo significado se recoge a continuación.

Primera letra: Medio de refrigeración interno en contacto con los arrollamientos:

- Aceite mineral o líquido aislante sintético con punto de inflamación $\leq 300^{\circ}\text{C}$.
- K Líquido aislante con punto de inflamación $> 300^{\circ}\text{C}$.
- L Líquido aislante con punto de inflamación no medible.
- G Gas.
- S Aislante sólido.

Segunda letra: Modo de circulación del medio de refrigeración interno:

- N Circulación natural por termosifón a través del sistema de refrigeración y en los arrollamientos

- F Circulación forzada a través del sistema de refrigeración, circulación por termosifón en los arrollamientos.
- D Circulación forzada a través del sistema de refrigeración, dirigida desde el sistema de refrigeración hasta al menos los arrollamientos principales.

Tercera letra: Medio de refrigeración externo:

- A Aire
- W Agua

Cuarta letra: Modo de circulación del fluido externo:

- N Convección natural
- F Circulación forzada (ventiladores, bombas)

1.2 PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES

Las pérdidas que están directamente implicadas en el funcionamiento de un transformador son las pérdidas que afectan a piezas de hierro y cobre. Pero además existen otras que ocurren durante el funcionamiento de la máquina. Son las debidas al funcionamiento de elementos auxiliares al transformador como ventiladores, bombas, etc.

1.2.1 PÉRDIDAS EN VACÍO.

Las pérdidas de Foucault y por histéresis son las llamadas **pérdidas en el hierro**. Éstas pérdidas es producen en el transformador en vacío. Para reducir la pérdida de energía, y la consiguiente pérdida de potencia, es necesario que los núcleos que están bajo flujo variable no sean macizos; deberán estar contruidos con chapas magnéticas de espesores mínimos, apiladas y aisladas entre sí, de esta manera, la corriente eléctrica, al no poder pasar de unas chapas a otras, tiene que hacerlo independientemente en cada una de ellas, con lo que se induce menos corriente y disminuye la potencia perdida por corrientes de Foucault.

- **Las corrientes de Foucault** se producen en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación del flujo magnético.

Como los materiales magnéticos son buenos conductores eléctricos, en los núcleos magnéticos de los transformadores 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 corriente 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.

$$P_F = 2,2 \cdot f^2 \cdot \beta_{\max}^2 \cdot \Delta^2 / 10^{11}$$

Figura 1.4. Fórmula de Foucault.

SIENDO:

P_F las pérdidas por corrientes de Foucault en W/kg.

f la frecuencia en Hz.

β_{\max} la inducción máxima en Gauss.

Δ el espesor de la chapa magnética en mm.

- **La histéresis magnética** es el fenómeno que se produce cuando la imantación de los materiales ferromagnéticos no solo depende del valor del flujo, si no también de los estados magnéticos anteriores. En el caso de los transformadores, al someter el material magnético a un flujo variable se produce una imantación que se mantiene al cesar el flujo variable lo que provoca una pérdida de energía que se justifica en forma de calor.

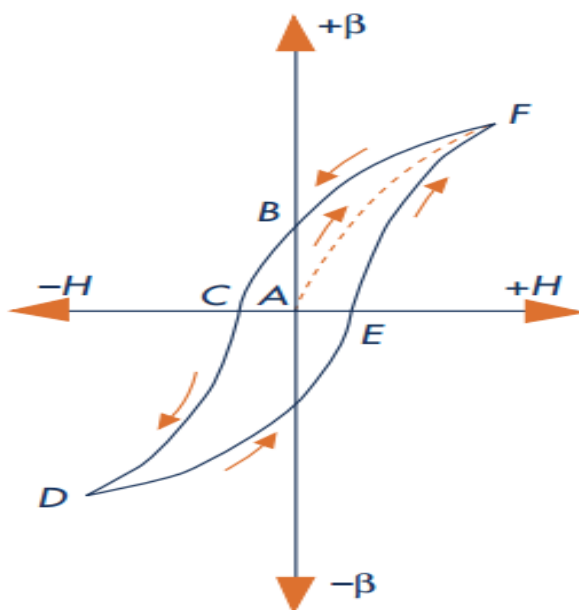


Figura 1.4. Curva de Histéresis.

1.2.2 PÉRDIDAS EN CARGA.

A estas pérdidas se les denomina comúnmente pérdidas en el cobre o pérdidas de cortocircuito. Las pérdidas de carga varían de acuerdo con la carga del transformador. Se componen de:

- **Las pérdidas en el cobre:** Esta pérdida se produce en los devanados de los transformadores y es causada por la resistencia del conductor. La magnitud de estas pérdidas aumenta con el cuadro de la corriente de carga, y es proporcional a la resistencia del devanado. Su valor se puede reducir aumentando la sección transversal del conductor o mediante la reducción de la longitud de la bobina.

$$P_{cu} = R * I^2 = \rho * \frac{L}{S} * I^2$$

- **Las pérdidas por corrientes de Eddy:** Al igual que en el núcleo del transformador, los campos magnéticos en los devanados también producen pérdidas debidas a las corrientes de Foucault. Para su

reducción se trata de reducir el diámetro de los cables y para ello el bobinado lo forma un grupo de cables de pequeña sección conectados en paralelo. Cada uno de estos pequeños bobinados experimenta un flujo diferente, con lo que el voltaje desarrollado por cada uno de ellos es ligeramente diferente, ocasionando pérdidas a la hora de su conexión. Ésto se consigue evitar mediante el uso de conductores traspuesto, los cuales van formando una especie de “hélice” que logra que las tensiones y flujos de cada uno de los cables sean iguales, evitando pérdidas originadas por la diferencia de estos parámetros en cada uno de los pequeños cables.

1.2.3 PÉRDIDAS AUXILIARES

Estas pérdidas son originadas en transformadores de potencias elevadas debido al consumo de una cierta energía de sus equipos de ventilación y bombeo. Son pérdidas originadas por la refrigeración de grandes transformadores.

1.2.3.1 Pérdidas adicionales:

En estas pérdidas adicionales se incluyen las causadas por la potencia reactiva y por los armónicos.

El componente reactivo de la corriente de carga genera una pérdida real a pesar de que no contribuye a la carga útil. Estas pérdidas son proporcionales la inversa al cuadrado del coseno de ϕ . Para reducirlas se deben emplear cargas con una baja componente reactiva.

Por otro lado las cargas debidas a las corrientes de Foucault dependen del cuadro de la frecuencia. Al tener presencia de armónicos, éstos serán superiores a los 50 Hz de la componente fundamental por lo que causarán pérdidas adicionales en el núcleo y los devanados.

1.2.3.2 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, ordenadores, sistemas UPS, televisores y lámparas fluorescente, provocan corrientes armónicas en la red. Las tensiones armónicas son generadas en la impedancia de la red por la carga de corrientes armónicas. Estos armónicos hace aumentar, tanto con carga como sin ella, las pérdidas por efecto piel, las corrientes parásitas y las pérdidas por histéresis.

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

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

1.3 CALENTAMIENTO

El calor producido por las pérdidas de una máquina eléctrica en funcionamiento provoca una elevación de su temperatura. Al aumentar la temperatura de un cuerpo, se incrementa la cantidad de calor evacuado al exterior a través de una superficie. Al final la temperatura aumenta hasta alcanzar un equilibrio término en el que se genera tanto calor debido a las pérdidas como el que se disipa a través de la superficie externa y, entonces la temperatura se mantiene constante.

En principio se podrá aumentar la potencia de una máquina eléctrica, y a su vez las pérdidas que genera, siempre que no afecte a los materiales de los que está construida, es decir siempre que no se deterioren. Por lo tanto, la potencia máxima que puede dar una máquina está condicionada por la temperatura máxima admisible que pueda soportar. Es decir, si a una máquina dada se le mejora el sistema de evacuación de calor a través de una superficie externa, con el mismo aumento de temperatura podrá expulsar más calor, y aumentará la potencia útil máxima. Ésto ha llevado a la búsqueda de sistema de refrigeración cada vez más eficientes a medida que se ha ido aumentando la potencia de las máquinas eléctricas.

1.3.1 MÉTODOS DE TRANSMISIÓN DEL CALOR.

El calor producido por las pérdidas se transmite a través de un medio al exterior, este medio puede ser aire o bien líquido.

Existen diferentes métodos para la eliminación del calor que dependen de diversos factores, como la cantidad de calor que se quiera disipar o la potencia del transformador. En cualquier caso, es necesaria la presencia de conductos o vías en las proximidades de las fuentes de calor (núcleo y devanados), que permitan el flujo del fluido refrigerante, gas o líquido.

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

- La masa volumétrica.
- El Coeficiente de dilatación térmica.
- La viscosidad.
- El calor específico.
- La conductividad térmica.

1.5.1.1 Convección

La transferencia de calor por convección se puede hacer en dos formas:

- a) Por convección natural.
- b) Por convección forzada.

1.5.1.2 Conducción

Es un proceso lento por el cual se transmite el calor a través de una sustancia por actividad molecular. La capacidad que tiene una sustancia para conducir calor se mide por su “conductividad térmica”.

1.5.1.3 Radiación

Es la emisión o absorción de ondas electromagnéticas que se desplazan a la velocidad de la luz que representan en temperaturas elevadas un mecanismo de pérdidas de calor. En el caso de los transformadores, la transferencia de calor a través del tanque y los tubos radiadores hacia la atmósfera es por radiación.

1.4 TRANSFORMADOR DE ABB.

En el siguiente apartado se expondrán las principales características técnicas y constructivas del transformador que se utilizará en la realización del proyecto. A su vez, se mostrarán los diferentes ensayos realizados en el laboratorio para comprobar su funcionamiento y pérdidas.

1.4.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.

- Fabricante: ABB.
- Número de serie: 61271.
- Potencia nominal: 14 MVA.
- Tensión de primario: 66000 V.

- Tensión de secundario: 6300 V.
- Intensidad primario: 122,46 A.
- Intensidad secundario: 1283 A.
- Frecuencia: 50 Hz.
- Tipo de conexión: Dyn11.
- Tipo de refrigeración: ONAN.

1.4.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS.

El devanado de alta tensión está compuesto por 1397 espiras, repartidas a lo largo de 112 bobinas. Sin embargo el devanado de baja tensión lo forman 77 espiras, 7 capas de 11 espiras cada una, formadas por 8 conductores cada una. Cada uno de esos conductores posee unas dimensiones de 10,4 x 4,6 mm².

Los diámetros de cada una de las capas que componen el devanado de baja tensión son mostrados en la Tabla de la Figura 1.5:

Capa	Diámetro exterior(mm)	Diámetro interior(mm)
1	478,4	468
2	494,8	484,4
3	511,2	500,8
4	527,6	517,2
5	544	533,6
6	560,4	550
7	577	566,4

Figura 1.5 – Diámetros del devanado de BT

Entre cada una de las capas se colocan unas tiras aislantes que sirven tanto para aislar una capa de otra como para formar los canales por los que discurrirá el fluido refrigerante. En la Figura 5 se muestra la planta del transformador completo, mostrando tanto el devanado de alta

como el de baja tensión. Asimismo, se señala el código de colores que identifica las diferentes partes del transformador como sus dimensiones.

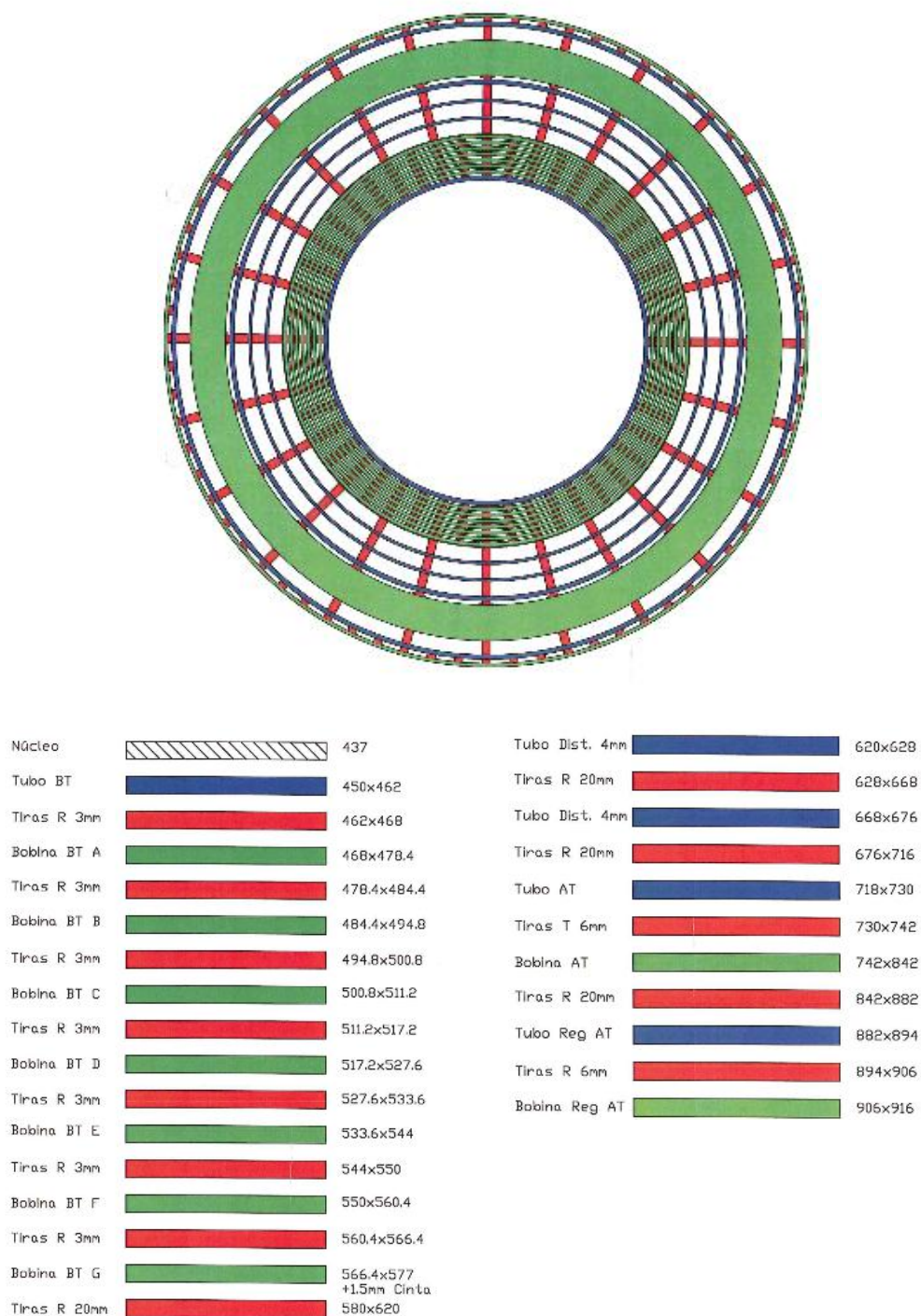


FIGURA 5 – Planta transformador ABB

1.4.3 ENSAYOS REALIZADOS.

- Los valores obtenidos en el ensayo en vacío se muestran en la Tabla de la Figura 1.6.

	Tensión (V)	Fase U (A)	Fase V (A)	Fase W (A)	Vatímetro (w)
<i>Constante aparato</i>	1	1	1	1	1
<i>Lectura</i>	6305	2,21	1,58	1,69	10400
<i>Resultado</i>	6305	2,21	1,58	1,69	10400

Figura 1.6 – Ensayo de vacío

- Ensayo de cortocircuito:

En la Figura 1.7 se muestran los ensayos de cortocircuito se han realizado en régimen nominal y a dos temperaturas diferentes, mostrándonos las pérdidas en el cobre.

	20°C	75°C
<i>Pérdidas cobre primario</i>	41.541 w	50.500 w
<i>Pérdidas cobre secundario</i>	29.799 w	36.226 w
<i>Pérdidas totales cobre</i>	71.340 w	86.727 w
<i>Pérdidas adicionales</i>	33.853 w	27.847 w
<i>Pérdidas totales</i>	105.193 w	114.574 w
<i>Tensión cortocircuito</i>	19,1 % nom.	22,22% nom.

Figura 1.7 – Ensayo cortocircuito

- Ensayo de aislamiento:

Entre alta y baja tensión: 1.160 MΩ.

Entre alta tensión y masa: 3.000 MΩ.

Entre baja tensión y masa: 3.540 MΩ.

Capítulo 2.

Nuevos líquidos dieléctricos.

2.1. INTRODUCCIÓN

Desde hace algún tiempo, la industria del transporte y distribución de energía eléctrica ha expresado su interés y necesidad por fluidos dieléctricos alternativos al aceite mineral, que sean medioambientalmente respetuosos y que mejoren la seguridad contra incendios. Sin embargo, para que estos fluidos tengan atractivo, deben demostrar que son seguros, económicos, y que ofrecen un alto nivel de rendimiento dieléctrico y refrigerante durante largo tiempo.

En este artículo los fluidos alternativos que se analizan son los **ésteres naturales, los ésteres sintéticos y los aceites de silicona**. Por lo que respecta a los primeros, los ésteres naturales, se han utilizado como fluido dieléctrico desde la invención de los transformadores bañados en aceite a finales de 1880. Eran muy simples e incompatibles con los equipos de respiración libre por su composición química. Por ello, fueron gradualmente remplazados por los aceites minerales. Más tarde, aparecieron los aceites de silicona, ofreciendo una alternativa en aplicaciones donde se requiera una alta resistencia al fuego. Sin embargo, son cuestionables desde el punto de vista medioambiental. Por lo que respecta a los ésteres sintéticos se han utilizado con éxito durante los últimos cuarenta años y continúan creciendo en popularidad. Por último, es preciso señalar que en la última década ha resurgido el interés por los ésteres naturales por sus credenciales "verdes".

En la actualidad, estos líquidos son utilizados en múltiples aplicaciones de los transformadores, como distribución, potencia y tracción. No obstante, no son todavía utilizados en aplicaciones de instrumentación. La Figura 2.1 muestra un resumen del grado de implantación de los líquidos aislantes en las aplicaciones mencionadas.

ACEITE \ USO	POTENCIA	TRACCION	DISTRIBUCION	INSTRUMENTACION
MINERAL	USADO	USADO	USADO	USADO
SILICONA	NO USADO	USADO	USADO	NO USADO
ESTER SINTETICO	EVENTUAL	USADO	USADO	NO USADO
ESTER NATURAL	EVENTUAL	NO USADO	USADO	NO USADO

Figura 2.1. Grado de implantación de los líquidos aislantes.

- **Seguridad contra-incendios.** Los fluidos alternativos tienen puntos de inflamación e ignición mucho más altos que el aceite mineral. Así, la sustitución del aceite mineral aumentará en gran medida la seguridad contra incendios, especialmente en áreas sensibles (zonas pobladas, barcos...). Por otro lado, esta sustitución se ve incentivada por los elevados costes de instalación o actualización de los sistemas de seguridad, requisito exigido a menudo por las compañías aseguradoras.
- **Preocupaciones medioambientales.** Tanto los esteres naturales como los sintéticos están oficialmente clasificados como fácilmente biodegradables y se consideran mucho más ecológicos que el aceite mineral. Por ello, la sustitución del aceite mineral por cualquiera de estos dos esteres reducirá en gran medida el impacto ambiental en el caso de vertido.
- **Absorción de humedad.** El nivel de solubilidad del agua en los esteres y en el aceite mineral es muy diferente: a 25° C, los primeros son capaces de absorber entre 20 ó 30 veces más humedad que el segundo antes de saturación. Esta mayor capacidad de absorción de los esteres tiene dos efectos positivos:
 - **Prolongación de la longevidad del aislamiento sólido.** Según estudios recientes, la durabilidad del aislamiento de celulosa bañado en éster es superior a la del bañado en aceite. Esa mayor durabilidad puede prolongar la vida útil del transformador.
 - **Mantenimiento de las tensiones de ruptura.** La tensión de ruptura del aceite mineral se deteriora rápidamente con el incremento de la humedad, por tener baja miscibilidad. En cambio, ambos tipos de esteres mantienen altas tensiones de ruptura con cantidades significativamente mayores de agua, al ser capaces de disolverla.
- **Azufre corrosivo.** La presencia de compuestos de azufre en el aceite mineral y los problemas de corrosión que pueden causar en el transformador es otra de las razones para su sustitución por

cualquiera de los líquidos alternativos, ya que estos carecen del mencionado elemento químico.

2.2. COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS LÍQUIDOS AISLANTES.

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

2.2.1. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

La Tabla 1 permite comparar de manera rápida las propiedades físico-químicas de especial relevancia para un fluido aislante de un transformador.

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 ^{ra} de inflamación °C	160-170	>300	>250	>300
T ^{ra} de ignición °C	170-180	>350	>300	>350
Clasificación frente al fuego (IEC 61100)	O	K3	K3	K2
Saturación de agua a T _{ambiente} (ppm)	55	220	2600	1100
Viscosidad	Aceite mineral<silicona baja viscosidad<éster sintético<silicona<éster natural			

Figura 2.2. Principales propiedades de los líquidos aislantes.

2.2.1.1. Composición química

Así, por ejemplo, se puede señalar que el aceite mineral es una mezcla compleja de hidrocarburos producida a partir de la destilación del petróleo. En cambio, tanto el aceite de silicona como los ésteres sintéticos

son productos químicos: el primero consiste en una mezcla de polímeros inorgánicos-orgánicos y el segundo 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 aceites (soja, colza, aceite de girasol...).

2.2.1.2. Seguridad medioambiental

Generalmente, los líquidos con una biodegradabilidad elevada y baja toxicidad son considerados como medioambientalmente respetuosos. Estos dos factores son importantes cuando se considera el uso de líquidos aislantes en áreas medioambientalmente sensibles; e.g., los cursos de los ríos. Tanto los ésteres naturales como los sintéticos están oficialmente clasificados como fácilmente biodegradables y no dañinos para el medio acuoso, mientras los aceites minerales y los aceites de silicona son mucho más resistentes a la biodegradación y más nocivos para el medioambiente.

2.2.1.3. Oxidación

La estabilidad de los líquidos aislantes frente a la **oxidación** es un aspecto clave, ya que ésta puede modificar las propiedades físico-químicas (propiedades dieléctricas, capacidad de corrosión, viscosidad, etc) de los fluidos, afectando negativamente al funcionamiento del transformador. Así, por ejemplo, el Dow Corning [7] es un aceite de silicona químicamente inerte y tiene buena resistencia a la oxidación. Este proceso se produce muy lentamente y a temperaturas mayores de 175 °C, no generándose ni ácidos ni lodos peligrosos. En cambio, en el caso de los ésteres sintéticos, el proceso se produce con temperaturas de 125 °C en adelante, generándose, además, ácidos orgánicos. Por lo que respecta al aceite mineral, se empieza 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 ésteres 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 geles y/o otros subproductos (alcoholes, ácidos, etc) que aumentan además su viscosidad, reduciendo así su capacidad refrigerante.

2.2.1.4. Seguridad contra incendios

Los usuarios de los líquidos aislantes consideran la **seguridad contra incendios** como un factor clave en aplicaciones “sensibles”, donde un incendio puede poner en peligro la vida humana o generar elevados costes económicos; e.g., en túneles, barcos o zonas pobladas. Así, son los líquidos alternativos los 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 60695-1-40 7.1) y que el humo producido sea no tóxico y de baja densidad.

2.2.1.5. Solubilidad del agua

Los ésteres sintéticos y naturales, por su mayor grado de polaridad, son capaces de **disolver** mayor **cantidad de agua** que los aceites minerales y de silicona. Como veremos más adelante, esta propiedad es clave a la hora de determinar la tensión de ruptura de estos fluidos.

2.2.1.6. 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.

2.2.1.7. Miscibilidad

La **miscibilidad** de los líquidos alternativos, con el aceite mineral y entre sí, es una propiedad importante a la hora 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 relleno no pueda llevarse a cabo con fluidos inmiscibles, pero sí debería tenerse más cuidado en estos casos.

	ACEITE MINERAL	ACEITE DE SILICONA	ÉSTER SINTÉTICO	ÉSTER NATURAL
ACEITE MINERAL	MISCIBLE	MISCIBLE	MISCIBLE	MISCIBLE
ACEITE DE SILICONA	MISCIBLE	MISCIBLE	NO MISCIBLE	
ÉSTER SINTÉTICO	MISCIBLE	NO MISCIBLE		
ÉSTER NATURAL	MISCIBLE			

Figura 2.3. Miscibilidad entre los líquidos aislantes a temperatura ambiente.

Así, por ejemplo, a temperatura ambiente, tanto los ésteres como el aceite de silicona son miscibles con el aceite mineral. En cambio, los primeros no lo son con el segundo. Aun más, pequeñas cantidades de aceite de silicona en los ésteres pueden dar lugar a la formación de espuma. Este mismo efecto se produce, pese a ser miscibles, entre el aceite de silicona y el mineral como se recoge en la figura 2.3 para los diferentes líquidos dieléctricos.

2.2.2. 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.

2.2.2.1. Tensión de ruptura

Así, por ejemplo, se determina la **tensión de ruptura** de estos líquidos, así como del papel de celulosa impregnado con ellos, mediante la realización de numerosas pruebas de acuerdo a diferentes normas

internacionales. En la Figura 2.4 se presenta una comparativa-resumen – valores obtenidos de las hojas de características de los líquidos- de este parámetro para los diferentes fluidos dieléctricos. Asimismo, en la Figura 3 se presenta los resultados obtenidos para el papel de celulosa impregnado con los diferentes líquidos. Varias e importantes conclusiones se pueden obtener:

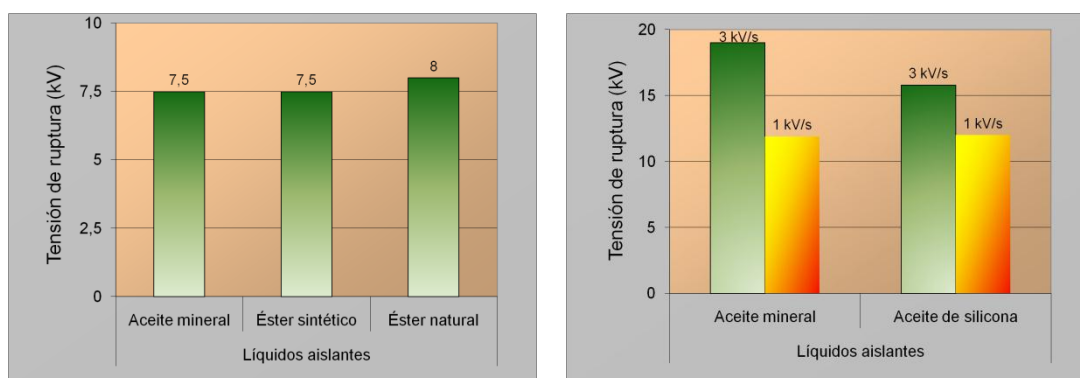
- La primera y fundamental es que, con campos magnéticos homogéneos o semi-homogéneos, los líquidos alternativos tienen tensiones de ruptura similares a la del aceite mineral. Asimismo, las tensiones de rupturas del papel de celulosa son similares, con independencia del líquido de impregnación.
- Segunda, esta característica es extremadamente sensible a la presencia de impurezas – humedad, partículas, burbujas de gas o aire- en el líquido. Se podría decir que este parámetro es más una medida de su nivel de contaminación que de su capacidad dieléctrica. Por ejemplo, son las tensiones de ruptura de los aceites minerales y de silicona las que más rápidamente se deterioran con el incremento de la humedad al no ser disuelta en el líquido aislante. En cambio, ambos tipos de ésteres mantienen altas tensiones de ruptura con cantidades significativamente mayores de agua, ya que estos líquidos sí que son capaces de disolver la humedad.

Por otro lado, la presencia de partículas de microfibra de celulosa, que atraen las moléculas de agua y se combinan entre ellas, provoca la reducción de la tensión de ruptura en todos los líquidos a medida que se incrementa la humedad relativa.

NORMAS	LIQUIDO AISLANTE				
	ACEITE MINETAL	ÉSTER SINTETICO	ÉSTER NATURAL	ACEITE DE SILICONA	ACEITE DE SILICONA BAJA VISCOSIDAD
IEC 60156 2.5mm	>70kV	>75kV	>75kV	50kV	70kV
ASTM 1816 1mm	-	-	37kV	-	-
ASTM 1816 2mm	60kV	56kV	56kV	-	-
ASTM D877	55kV	43kV	45kV	43kV	-

Figura 2.4. Comparación de las tensiones de ruptura de los líquidos aislantes.

- Tercero, las pruebas realizadas con gradientes de 1 kV/s sobre papeles Kraft impregnados con los diferentes fluidos demuestran que este sistema de aislamiento sólido posee tensiones de ruptura similares independientemente del líquido utilizado. En cambio, con gradientes mayores -3 kV/s- la tensión de ruptura del papel impregnado con aceite mineral es superior a la del impregnado con aceite de silicona (Figuras 2.5a y 2.5b). Fuente [18] y [19].



a. Papel Kraft de 90µm (1 kV/s)

b. Papel Kraft de 254µm

Figura 2.5. Tensiones de ruptura de papel Kraft impregnado.

2.2.2.2. Descarga parcial

Otra de las pruebas eléctricas habitualmente utilizadas para caracterizar los líquidos aislantes son las de **descarga parcial**. Éstas se llevan a cabo con campos magnéticos no-homogéneos en *gaps* de aceite relativamente grandes. Uno de los estudios que considera esta característica es. En él se concluye que la tensión de inicio de la descarga parcial en el aceite mineral es similar a las obtenidas con ambos ésteres. Asimismo, otro estudio, realizado en diferentes condiciones, revela que el aceite de silicona y el mineral tienen tensiones de inicio de descarga parcial similares.

2.2.2.3. Ruptura por pulso de tensión

Una tercera prueba eléctrica, que no se ve muy afectada por la presencia de impurezas en el fluido, es la **ruptura por pulso de tensión**. Por lo tanto, este tipo de test se puede utilizar para evaluar de manera más

precisa la característica dieléctrica del líquido aislante, al contrario de lo que ocurre con la tensión de ruptura que, como decíamos, es más una medida de su nivel de contaminación. En la Figura 2.6a se analiza un aceite mineral, un éster sintético (MIDEL[®] 7131) y otro natural (E-FR3). De este análisis parece concluirse que los ésteres, generalmente, tienen un pulso de tensión de ruptura menor que el aceite mineral. Además, los resultados obtenidos con el papel de celulosa impregnado con los líquidos mencionados son consistentes con la aseveración anterior: menores pulsos de tensión de ruptura de los ésteres. El segundo estudio –Figura 2.6b- compara de nuevo el éster sintético MIDEL[®] 7131 con un aceite mineral y uno de silicona. En este caso, el éster sintético se comporta mejor que los otros dos líquidos con gaps pequeños y alcanza la capacidad dieléctrica máxima frente a pulsos de tensión con el menor gap (47 kV/mm con 1.5mm) de los tres líquidos. Asimismo, los dos líquidos restantes, aceite mineral y de silicona, tienen un comportamiento similar frente a los pulsos de tensión.

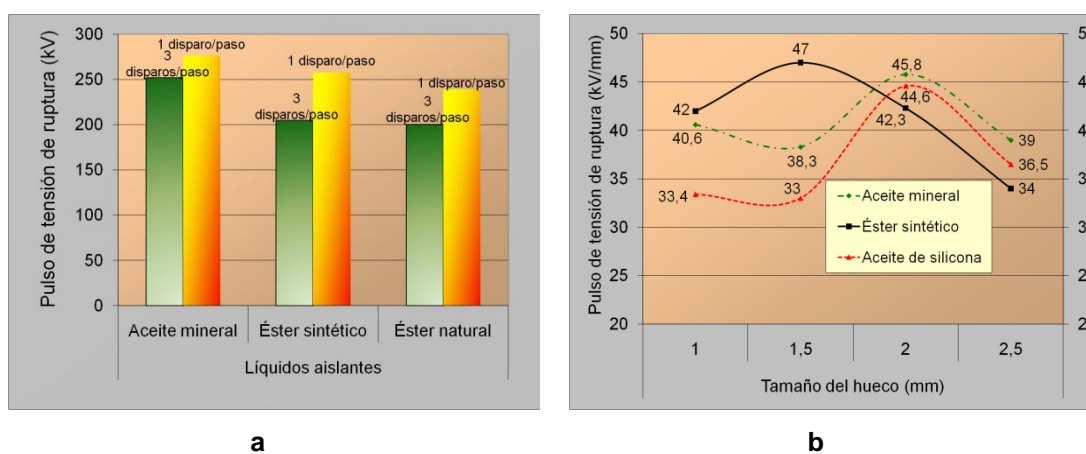


Figura 2.6. Pulsos de tensión de ruptura para varios líquidos aislantes.

2.3. RELLENADO.

El término **rellenado** se refiere al proceso de retirar el líquido de aislamiento de un transformador operativo sustituyéndolo por uno nuevo. Por lo general, el líquido sustituido es el aceite mineral.

El procedimiento que debe seguirse es el recomendado por el fabricante del transformador o del fluido. No obstante, a continuación se da una sencilla **descripción general** del mencionado procedimiento, que se

debe llevar a cabo, además, bajo el control de personal cualificado:

- a) La desenergización de la unidad, su puesta a tierra, el análisis de una muestra del aceite,... se debe llevar a cabo de acuerdo con el procedimiento estándar fijado por el fabricante del transformador o del usuario.
- b) Drenaje del aceite del transformador.
- c) Lavado con líquido de reposición caliente.
- d) Drenaje del líquido residual.
- e) Reemplazo de las juntas y sellos dañados.
- f) Llenado del transformador con el nuevo fluido.
- g) Esperar un tiempo a que el nuevo fluido impregne adecuadamente el aislante sólido.

Un momento crítico del proceso son las **etapas de drenaje y lavado**: es importante eliminar la mayor cantidad posible de los residuos del aceite reemplazado, con el fin de no comprometer las propiedades del nuevo líquido. Por ejemplo, los fluidos alternativos son líquidos Clase K en su clasificación frente al fuego según el estándar IEC 61100, con puntos de ignición por encima de los 300° C. Si el fluido sustituido es aceite mineral, un alto porcentaje de éste en el líquido alternativo sustituto puede producir una disminución de sus puntos de inflamación y de ignición. La información relativa a la cantidad de aceite mineral residual que puede tolerarse sin que se vean afectadas las propiedades del nuevo fluido puede obtenerse del fabricante de este último.

También es especialmente importante establecer y respetar el **tiempo de reposo del transformador** (tiempo antes de la energización de la unidad) ya que como los fluidos alternativos son generalmente más viscosos que el aceite mineral requieren de más tiempo para penetrar en el aislamiento sólido. A menudo se recomienda, como medida adicional de seguridad, la **conexión previa en vacío** del transformador durante un periodo de tiempo determinado y antes de conectar la carga.

Dos de los aspectos básicos a la hora de proceder al rellenado de un transformador son la ***miscibilidad de los fluidos*** (ya mencionada en el apartado 2.2.1.7) y la ***compatibilidad de los materiales*** del transformador con el líquido sustitutivo el cual se trata en el siguiente apartado.

2.3.1.COMPATIBILIDAD DE LOS MATERIALES

La compatibilidad de los materiales es un factor importante tanto en la sustitución de líquidos dieléctricos como en el diseño de transformadores. Por ello, los fabricantes utilizan habitualmente aquellos materiales que han demostrado ser compatibles con dicho fluido y por este motivo es necesario en la sustitución de líquidos dieléctricos comprobar la compatibilidad del nuevo fluido sustitutivo con los materiales del transformador, ya que éste está construido para el fluido original, siendo el aceite mineral el mas utilizado como dieléctrico.

Hasta la fecha, no se han encontrado incompatibilidades entre los ***ésteres naturales*** y los materiales típicamente utilizados con los aceites minerales convencionales. Sin embargo, algunos materiales, especialmente los elastómeros -e.g. las juntas- interaccionan con este líquido alternativo: se hinchan o se suavizan ligeramente con el aceite mineral, ocurriendo lo contrario -se encogen o se endurecen- con el éster natural.

Como regla general, los materiales utilizados con el aceite mineral son compatibles con el ***éster sintético*** MIDEL[®] 7131. Sin embargo, hay varios materiales considerados incompatibles o que sólo se recomienda su uso en situaciones particulares. Por ejemplo:

- La goma de neopreno es un aglomerante adecuado del corcho, pero no se debe utilizar por sí solo.
- Los esmaltes de la cuba a base de resinas naturales, aunque resistentes a MIDEL, pueden filtrar la acidez procedente del envejecimiento.
- No se recomiendan los componentes galvanizados a base de zinc, aparte de los pequeños elementos de fijación. Por otro lado, tampoco

debe ser utilizado el pasivado de cromo ya que se descompone con temperaturas normales de funcionamiento.

- Ciertos papeles y cartones pueden liberar colorantes en el aceite MIDEL.
- Los PVCs pueden liberar plastificantes en MIDEL, volviéndose frágiles después de una inmersión prolongada.

Los **aceites de silicona** tienen una compatibilidad aceptable con la mayoría de los materiales utilizados con el aceite mineral. De hecho, se ha estudiado la compatibilidad de un gran número de ellos con este líquido alternativo. Además, los materiales de sellado y de las juntas han de ser seleccionados de manera cuidadosa ya que se pueden producir algunas reacciones indeseadas. Por ejemplo, algunos plastificantes de compuestos de caucho pueden ser lixiviados por los aceites de silicona. Por ello, debido a la gran cantidad de formulaciones disponibles, es recomendable ensayar individualmente cada una de ellas. La figura 2.7 pretende ser una guía para la selección de este tipo de materiales.

El caucho de silicona y el aceite de silicona son materiales muy parecidos. Por ello, el caucho absorbe fácilmente el líquido, provocando su hinchazón y la pérdida de propiedades físicas. Este material de sellado se puede encontrar en los sellos de los aisladores de transformadores de potencia, en las juntas de la tapa superior, en los cambiadores de tomas, en instrumentaciones y otras aberturas. Obviamente, si se encuentra en un transformador que vaya ser llenado con aceite de silicona, debe ser reemplazado por otro compatible.

Materiales	No compatible	Compatible	Ensayo recomendado
Caucho natural		✓	
Caucho de fluorosilicona		✓	
Caucho de silicona	✓		
Neopreno			✓
Teflón		✓	
Vitón		✓	
Caucho de nitrilo			✓
Buna-N	✓		

Polipropileno			✓
Hypalon	✓		
S.B.R.			✓
E.P.R.			✓
Corprene			✓

Figura 2.7. Tipo de compatibilidad con el aceite de silicona de los materiales de sellado y de junta.

2.3.2. PRECAUCIONES DE MANEJO DE LOS LÍQUIDOS ALTERNATIVOS

El rellenado con líquidos alternativos requiere, obviamente, de su manejo. Esto último ha de realizarse de acuerdo a las recomendaciones del fabricante del fluido utilizado. No obstante, hay una serie de **consideraciones generales** que los usuarios deben tener en cuenta:

- Los conductos y bombas utilizados por los fluidos alternativos y compartidos con otros líquidos han de ser convenientemente limpiados previamente a su uso por el líquido alternativo para evitar su contaminación.
- Ha de tenerse especial cuidado en evitar los derrames, y tomar medidas de contención si es necesario. Las normativas nacionales y las compañías de seguros suelen determinar los requisitos de contención para los transformadores. Algunas compañías de seguros imponen requisitos menos exigentes en el caso de los fluidos alternativos. Esto se debe principalmente a su menor inflamabilidad; sí además son biodegradables, la reducción es mayor (Ver figura 2.8 clasificación alemana UBA de peligrosidad para el agua: esterres=nwg; aceites de silicona=1 y mineral=1).

<u>Clasificación</u>	<u>Descripción</u>
Nwg	No peligroso para el agua
Clase de peligro 1	Bajo riesgo para las aguas
Clase de peligro 2	Riesgo para las aguas
Clase de peligro 3	Riesgo severo para las aguas

Figura 2.8. Clasificación UBA de peligrosidad para el agua

- Si el fabricante lo recomienda, utilizar atmósfera inerte de nitrógeno.

Así, los diseños sin tanque de expansión realizados de acuerdo a las normas ANSI están generalmente dotados de un sistema que permite mantener un colchón de nitrógeno en sobrepresión sobre la superficie libre del aceite de la cuba.

- Comprobar las características de los fluidos contra el fuego. Así, son los líquidos alternativos los que ofrecen un alto grado de seguridad contra incendios (clase K en la clasificación IEC 61100) 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 60695-1-40 7.1) y que el humo producido sea no tóxico y de baja densidad.
- Comprobar la compatibilidad de los materiales que se utilizan en el manejo de los fluidos.
- Se ha de cumplir con la normativa nacional fijada para estos líquidos.
- Prestar atención a la relación volumen manejado/volumen almacenado del líquido.
- Se ha de tener en cuenta la eliminación del fluido al final de su vida útil.

2.4. COMO INCIDE EN EL DISEÑO DE LOS EQUIPOS EL USO DE LÍQUIDOS ALTERNATIVOS

El objetivo de esta sección es examinar cómo repercute el uso de los líquidos alternativos en el diseño de los componentes de un transformador. Para llevar a cabo esta labor se han comparado varios parámetros de los líquidos aislantes.

2.4.1. GENERAL

Primero, al no existir una distinción clara y aceptada universalmente de lo que es un transformador de distribución o de potencia, en este artículo se sigue la siguiente clasificación:

- **Transformadores de distribución:** menos de 5 MVA

- **Transformadores de potencia:** 5MVA o superior
- **Transformadores especiales y reactancias:** transformadores de tracción, transformadores rectificadores, transformadores de horno, reactancias, etc.

El primer desafío es diseñar un transformador que contenga un fluido alternativo durante la **misma vida útil** -30 años- que los rellenos con aceite mineral, sin que para ello sea necesario un mantenimiento programado adicional.

Los transformadores rellenos con aceites de silicona y con ésteres sintéticos llevan instalándose y operando desde la década de los '70. Por ello, se puede asumir que este tipo de transformadores puede tener una vida útil igual a la de una unidad de aceite mineral.

Las aplicaciones más antiguas de los transformadores con éster natural se remontan a 1994, y, por lo tanto, no alcanzan actualmente los 20 años de servicio. El seguimiento de estos transformadores ha demostrado la idoneidad de los ésteres naturales para su uso continuado. Además, los ensayos de envejecimiento acelerado en transformadores-prototipo con este fluido indican que su vida útil puede superar la de las unidades de aceite mineral.

2.4.2. DISEÑO DE LA CUBA DEL TRANSFORMADOR

El diseño adecuado de la cuba va a depender, entre otros factores, de las propiedades del líquido aislante. Así, un parámetro crítico en el diseño del tanque es el coeficiente de expansión térmica (Ver Figura 2.10).

Por otro lado, de acuerdo con el diseño de su cuba, los transformadores se pueden clasificar en:

- a) Tanque sellado herméticamente.
- b) Tanque de respiración libre con depósito de expansión.
- c) Tanque de respiración libre con respirador.

La tecnología de **sellado hermético** de los transformadores es bien conocida y ha sido aplicada durante mucho tiempo en transformadores de

distribución con tanque corrugado expansible. El hermetismo con radiadores expansibles evita la entrada de oxígeno y humedad. Ello facilita el uso de los fluidos alternativos, reduciendo los gastos de mantenimiento. No obstante, su aplicación en transformadores de potencia requiere del desarrollo de un nuevo concepto por su mayor volumen de aceite y la necesidad del mantener el vacío en el tanque. Los radiadores expansibles, diseñados para asumir la función del depósito de expansión, han de ser, además, lo suficientemente fuertes para mantener separadas las aletas individuales, permitiendo así el flujo natural de aire que refrigera el transformador.

La **respiración libre con depósito de expansión** ha sido la opción elegida, por su sencillez y economía, por la mayoría de los usuarios en todo el mundo a lo largo de muchas décadas. Los aceites de silicona y los ésteres sintéticos se han utilizado exitosamente, principalmente en transformadores de menos de 1MVA. No obstante, el uso de los ésteres naturales en este diseño requiere de ajustes. Como mencionábamos en el apartado anterior, estos fluidos son más susceptibles a la oxidación. Por ello, será necesaria la instalación de una membrana en el depósito de expansión con el fin de reducir al mínimo su exposición al aire, evitando así su oxidación y el consiguiente aumento de viscosidad. La adopción de esta medida es cada vez más común, especialmente en climas templados y húmedos, incluso en transformadores de aceite mineral.

La **respiración libre mediante tubo respirador** es una tecnología muy común en el Reino Unido. Aunque los aceites de silicona y los ésteres sintéticos pueden ser utilizados con este diseño sin demasiados problemas, es preferible instalar un desecante (silicagel) en el mencionado tubo respirador, e incluso si el líquido dieléctrico es aceite mineral. Obviamente, la finalidad del desecante es evitar una excesiva entrada de humedad en el tanque. Por otro lado, los ésteres naturales no se usan con esta tecnología.

La norma IEC. TS 60076-14 sugiere que el funcionamiento con altas temperaturas requiere de la ausencia de oxígeno. Por ello, el sistema de preservación de aceite debe estar dotado de un sistema que prevenga

eficazmente la entrada de aire con humedad y oxígeno. Para cumplir con este requisito, los transformadores con sistemas de aislamiento híbrido se diseñan con depósito de expansión dotado de bolsa de goma que evita el contacto directo aire-aceite. Por otro lado, los diseños sin tanque de expansión realizados de acuerdo a las normas ANSI esta generalmente dotados de un sistema que permite mantener un colchón de nitrógeno en sobrepresión sobre la superficie libre del aceite de la cuba.

2.4.3. DISEÑO DIELECTRICO

En un transformador, la capacidad de aislamiento depende de los sistemas complejos de aislamiento sólido/líquido. En ellas, el líquido aislante impregna al aislamiento sólido (celulosa, madera, nomex, etc) extrayendo el aire, que posee una rigidez dieléctrica menor que la del propio fluido.

A la hora de determinar la capacidad dieléctrica de los mencionados sistemas es necesario considerar varias de sus propiedades. La Figura 2.9 muestra alguna de ellas, incluida la tensión de ruptura o rigidez dieléctrica.

Así, la **rigidez dieléctrica** de los líquidos alternativos se ajusta a los requisitos establecidos por la norma IEC 60296 para el aceite mineral no usado.

Cabe señalar que la **permitividad relativa** de los ésteres es significativamente mayor que la de aceite mineral convencional y cercana a la del papel Kraft típico (aprox. 4,4). Esta cercanía de permitividades entre el aislamiento sólido y el líquido de éster produce varios efectos en el diseño dieléctrico:

- Las capacitancias de la estructura de aislamiento cambian con respecto al aceite mineral, dando lugar a una diferente distribución de tensiones en condiciones transitorias, e.g. pulsos de tensión. No obstante, este cambio no es significativo.
- La distribución del estrés de tensión en la estructura de aislamiento también cambia. Así, para una distribución de tensión dada, el estrés de

tensión en el fluido será menor en el éster que en el aceite mineral. Esto es beneficioso, ya que permite soportar mayores niveles de tensión.

Otro criterio importante a considerar en el diseño dieléctrico es la **resistencia a la fluencia** del aislante sólido. Así, el cartón prensado bañado en éster natural tiene una resistencia interfacial tan buena o mejor que en aceite mineral.

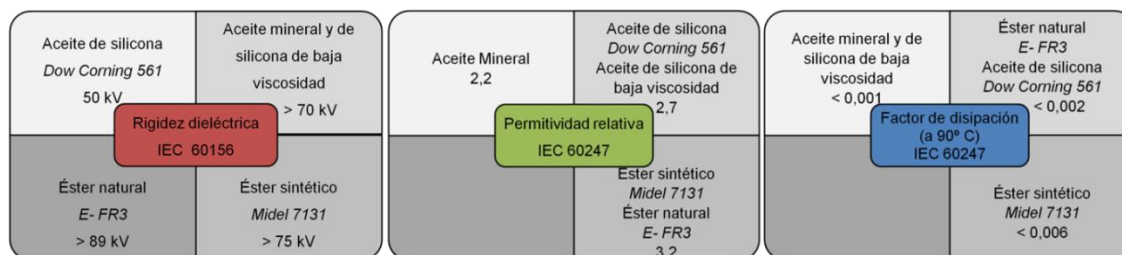


Figura 2.9. Comparación de las propiedades eléctricas de los líquidos dieléctricos no usados.

2.4.4. DISEÑO DE LA REFRIGERACIÓN

Los líquidos aislantes deben garantizar la refrigeración del transformador mediante dos mecanismos de transferencia térmica diferentes, la conducción y la convección. Esta última depende de todas aquellas propiedades que influyen en el desplazamiento del fluido (Ver Figura 2.10). La viscosidad es una de esas propiedades que, además, es crítica, ya que afecta de manera importante al rendimiento de la refrigeración.

Como se aprecia en la Figura 2.10, a la temperatura normal de funcionamiento de un transformador, la viscosidad de los ésteres es superior a la del aceite mineral, pero menor que la del aceite de silicona. Esto reduce el caudal del fluido para una altura dinámica dada, causando una diferencia de temperaturas mayor entre la parte superior e inferior del dispositivo de refrigeración. Este efecto es significativo en transformadores con refrigeración natural, ya que la capacidad de refrigeración del fluido controla la temperatura media del aceite mientras que es el flujo natural termosifónico quien realiza la misma labor con la temperatura del aceite superior. Así, el efecto resultante en este tipo de transformadores es que tanto las temperaturas del líquido de la parte superior como de los puntos calientes serán mayores con los ésteres que con el aceite mineral.

No obstante, para **transformadores de hasta 5 MVA**, la subida de temperatura con **ésteres naturales** es asumible –de 1 a 3° C con respecto al aceite mineral- ya que la mayor viscosidad de este líquido alternativo se ve parcialmente compensada por su mayor conductividad térmica. Por ello, el aceite mineral de un transformador de distribución puede ser sustituido por éster natural sin otras consideraciones respecto a su refrigeración. Por lo que respecta a los **ésteres sintéticos** (MIDEL[®] 7131), los resultados teóricos y experimentales indican que el incremento de temperatura en el bobinado es también de unos pocos grados con respecto al aceite mineral. Además, ya ha sido construido un transformador de potencia con este éster sintético (135 MVA 238/13.5 kV), y que se encuentra operativo en Suecia. Por último, la sustitución del aceite mineral por **aceite de silicona** puede suponer que aparezcan temperaturas superiores a las de diseño. El aceite alternativo no se ve afectado por estas sobretemperaturas, si no son excesivas. Sin embargo, la velocidad de envejecimiento de los materiales de aislamiento convencionales, como el papel de celulosa, podría verse afectada negativamente por operar a esas temperaturas. No obstante, este problema podría solucionarse mediante el ajuste de los niveles de carga del transformador o mediante la adición de ventiladores a los radiadores externos.

Por otra parte, cuando el sistema de refrigeración es de flujo forzado, el cambio del aceite mineral por estos nuevos fluidos apenas influye sobre la capacidad de refrigeración, siempre y cuando tengamos en cuenta su mayor resistencia al flujo –por su mayor viscosidad- en el ajuste de la bomba.

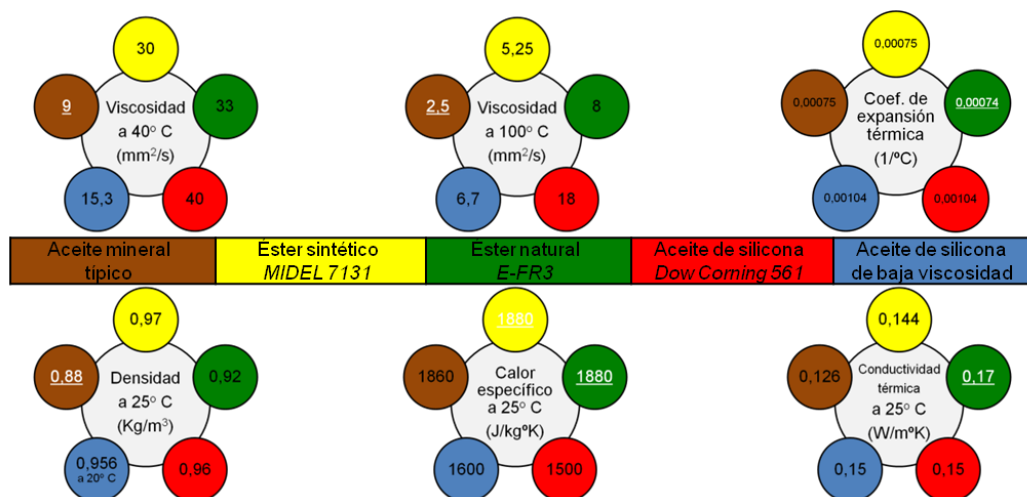


Figura 2.10. Propiedades térmicas de varios líquidos aislantes.

2.4.5. ACCESORIOS DE LOS TRANSFORMADORES

2.4.5.1. Cambiadores de tomas

Los cambiadores de tomas en carga poseen muchas y diferentes configuraciones de electrodos. Sus distancias de aislamiento pueden ser homogéneas o lo contrario, altamente no-homogéneas.

Las rigideces dieléctricas de distancias homogéneas, como las *fase-fase* y *fase-neutro*, bañadas en **ésteres naturales** son similares a la del aceite mineral. En cambio, las configuraciones no-homogéneas muestran una reducción significativa de las tensiones soportadas por los esteres naturales en comparación con el aceite mineral.

Los cambiadores de tomas en vacío no siempre están localizados en las partes más calientes del líquido de la parte superior puntos calientes del líquido de la parte superior. Sin embargo, en el caso de que se encuentren con temperaturas de líquido superiores a las habituales -unos 100 °C-, es necesario considerar la compatibilidad de los materiales de contacto con los líquidos dieléctricos.

El proveedor de los cambiadores de tomas en carga ha de ser informado de que éste va a ser expuesto a temperaturas superiores a las convencionales y/o el líquido aislante es alternativo, para que pueda considerar ambos factores.

2.4.5.2 Pasatapas

Se debe prestar especial atención a la selección del material utilizado en las juntas. El cuerpo del condensador de un pasatapas convencional podría dañarse en el caso de que se produzca un embalamiento térmico debido a la presencia de temperaturas superiores a las habituales. En este caso, sería necesaria la consideración de aisladores especiales para altas temperaturas o sobredimensionados.

Hasta la fecha, no se han desarrollado líquidos alternativos para pasatapas *tipo condensador* en aplicaciones de transformadores de potencia. Estos últimos, cuando están rellenos con líquidos alternativos, solo pueden utilizar pasatapas *tipo condensador* de papel impregnado en aceite mineral convencional, o en resina en el caso de optar por una opción 100% "verde".

2.4.5.3. Relé de Buchholz

Los gases de falta que se generan en transformadores con sistemas de aislamiento para altas temperaturas basados en fluidos alternativos pueden ser diferentes de los de un sistema convencional. Por lo tanto, el relé de protección debe ser compatible con el líquido aislante utilizado, con su temperatura de funcionamiento y los gases que se puedan producir. No obstante, es necesaria más información acerca del nivel de generación de gas y su relación con la falta producida con el fin de configurar adecuadamente la alarma y los niveles de disparo del relé.

2.4.5.4. Otros accesorios

Todos los accesorios deben ser térmica y químicamente compatibles con el líquido dieléctrico utilizado en todo el rango de temperaturas de funcionamiento.

2.5. FLUIDOS ALTERNATIVOS VS SISTEMA DE AISLAMIENTO SOLIDOS

La vida útil de un transformador depende de varios factores, entre los que destaca como determinante la ***evolución de la calidad del sistema de***

aislamiento sólido. Por ello, es importante entender su interacción con los líquidos alternativos.

2.5.1. AISLAMIENTO DE CELULOSA

La celulosa –cartón prensado o papel- con el aceite mineral es la combinación de aislamiento sólido/líquido más comúnmente utilizada en los transformadores. Sin embargo, esta combinación puede tener algunas desventajas operativas. Por ejemplo,

- El aceite mineral es sensible a la entrada de humedad.
- La celulosa no puede ser usada con altas temperaturas.
- El aceite mineral con agua y la celulosa húmeda pueden ocasionar fallos en el transformador.

Estos inconvenientes han llevado a los usuarios a explorar otros sistemas de aislamiento sólido/líquido con la finalidad última es prolongar la vida útil del transformador.

2.5.2. SISTEMAS CELULOSA-FLUIDOS ALTERNATIVOS

2.5.2.1 Celulosa-aceite de silicona

El **aceite de silicona** ha sido ampliamente utilizado en combinación con el aislamiento de celulosa en transformadores de distribución durante años.

Varios estudios han analizado la influencia del agua, la temperatura y el oxígeno sobre el anterior sistema de aislamiento. Así, Dumke *et al.* sugieren que el comportamiento de este sistema frente al agua es similar al del aceite mineral-celulosa.

La mayor seguridad contra-incendios es la principal ventaja de esta estructura de aislamiento sobre el convencional.

2.5.2.2 Celulosa-ésteres

Los **ésteres sintéticos y naturales** han sido utilizados con la celulosa durante muchos años –más de 30 años y entre 10-15 años,

respectivamente- en transformadores de distribución. Asimismo, están siendo cada vez más usados en transformadores de potencia.

Las ventajas de la combinación éster-celulosa con respecto a la convencional son su mayor nivel de seguridad contra-incendios, su mayor respeto por el medioambiente y su mayor tolerancia de la humedad. También es de destacar que existe una creciente bibliografía en la que se sugiere que la celulosa tiene una vida útil más larga cuando se sumerge en ésteres en lugar de en aceite mineral. Ello es debido a que, para temperaturas en torno a los 60° C o superiores, la cantidad de agua que retiene los ésteres es superior a la retenida por el aceite mineral. Ello permite tener un aislamiento sólido más seco, lo cual prolonga su vida operativa, y con ello la del transformador.

En contrapartida, la celulosa se impregna más lentamente de los dos tipos de ésteres que del aceite mineral. Así, el estudio llevado a cabo por Dai *et al.* ha evaluado la acción capilar y la tasa de impregnación de los tres fluidos mencionados en el cartón prensado de 3 mm. de grosor, a 20° y 60° C, respectivamente [25]. Ambos parámetros indicaban que el comportamiento de los líquidos alternativos a 60° C es igual al del aceite mineral a 20° C.

La principal diferencia –y también desventaja- entre los dos ésteres es la elevada susceptibilidad a la oxidación del éster natural, superior incluso a la del aceite mineral. Ello hace que se recomiende utilizar este líquido alternativo en transformadores herméticamente sellados y aplicaciones con bajas temperaturas.

2.5.3. AISLAMIENTO DE ARAMIDA PARA ALTAS TEMPERATURAS

La **Aramida** –acrónimo de **Aromatic polyamides**- es un *composite* de poliamidas aromáticas que se utiliza, entre otras aplicaciones, como aislamiento sólido sintético para altas temperaturas, e.g. transformadores o motores de tracción. Su nombre comercial es Nomex[®], siendo DuPont su fabricante.

La aramida para transformadores está disponible como papel sintético y también como cartón prensado. Este aislamiento es mucho más robusto que el de celulosa, y proporciona altos niveles de integridad eléctrica, química y mecánica: es resistente a la hidrólisis y la oxidación, y no produce subproductos –gas y agua- como si lo hace la celulosa; soporta temperaturas de hasta 220° C durante más de 10 años. En contrapartida, es más caro que la celulosa.

Desde el punto de vista operativo, los **beneficios** de utilizar este tipo de aislamiento son varios:

- Estabilidad con altas temperaturas.
- Mayor potencia para un determinado tamaño de transformador.
- Proporciona una mayor fiabilidad y durabilidad.
- Baja absorción de humedad.
- Resistencia superior a la de la celulosa contra la corte y el desgarro.
- Mayor capacidad para soportar sobrecargas de emergencia.
- Mayor capacidad de sobrecarga continua.
- Permite diseños más compactos.

Por último, con el fin de maximizar las ventajas este tipo de aislamiento, se utiliza a menudo con los fluidos alternativos, ya que soportan temperaturas mayores que el aceite mineral.

2.5.3.1 Aramida-aceite de silicona

La **combinación aceite de silicona-Aramida** para sistemas de aislamiento de alta temperatura es una evidente mejora con respecto al sistema tradicional de aceite mineral-celulosa.

Ya en 1973 se desarrollaron prototipos con este nuevo aislamiento, siendo hoy en día habitualmente utilizado en todo el mundo. Así, su aplicación en tracción ferroviaria, donde se producen altas temperaturas en el transformador por sobrecarga, ha demostrado el bajo impacto de las condiciones de funcionamiento en la vida útil de este sistema de aislamiento.

2.5.3.2 Aramida-éster sintético

Los **ésteres sintéticos** están siendo cada vez más utilizados **en combinación con la aramida** en transformadores de tracción o en generación eólica, donde las altas temperaturas son probables y las condiciones de funcionamiento son muy exigentes.

Esta combinación permite construir transformadores de potencia más pequeños, más respetuosos con el medioambiente y a prueba de incendios.

2.5.4. SISTEMAS DE AISLAMIENTO HÍBRIDOS

Un sistema de aislamiento híbrido es aquel que aísla las zonas más frías del transformador con papeles tradicionales *Kraft* a base de celulosa, mientras que el papel de aramida se aplica en las zonas más calientes, e.g. conductores envueltos.

Esta estrategia permite el mismo tipo de ventajas que los sistemas todo-aramida pero, obviamente, no en el mismo grado, ya que la celulosa está presente en el transformador. Con este tipo de sistema es adecuado el uso de líquidos alternativos capaces de soportar altas temperaturas.

2.6. NORMATIVA INTERNACIONAL APLICABLE A LOS LÍQUIDOS DIELECTRICOS

En esta sección se lleva a cabo una revisión de la normativa internacional que afecta a los líquidos dieléctricos: clasificación, mantenimiento, pruebas de monitorización, etc (Ver Tabla 3).

Es necesario subrayar que los métodos de análisis y las normas que los contienen están siendo continuamente modificados y actualizados. En consecuencia, los test vigentes se deben localizar en la última versión de la norma correspondiente.

Los límites de los tests y su aplicabilidad en un determinado equipo deben buscarse en las mencionadas normas. Hay que tener en cuenta que la diferente composición química de los líquidos alternativos puede conducir al uso de diferentes métodos para la determinación del mismo parámetro. Por ejemplo, los disolventes utilizados con el aceite mineral pueden ser diferentes a los usados con los ésteres naturales. Además, los límites aceptables para los diferentes

parámetros cambiarán en función de las propiedades de cada líquido. Por ejemplo, los límites de humedad en ésteres son mucho mayores que para el aceite mineral.

Al decidir sobre el estado de un líquido dieléctrico, es útil realizar tantas pruebas como sea posible. La tendencia de los resultados obtenidos de esas pruebas durante un período de tiempo determinado es una herramienta adicional para la toma de decisiones. Esto es cierto para todos los líquidos dieléctricos, no sólo para el aceite mineral.

Finalmente indicar que actualmente no existe una norma IEC para el testeo de los ésteres naturales - está en desarrollo. Se advierte al lector que consulte su disponibilidad-, por lo que las pruebas a realizar sobre estos últimos dependen en gran medida de los procedimientos ASTM.

Normas	Líquidos para transformadores			
	Aceite mineral	Éster sintético	Éster natural	Aceite de silicona
IEC	61039 ed2.0 (2008) - "Classification of insulating liquids"			
	60296 ed3.0 (2003) - "Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear"	61099 ed2.0 (2010) - "Insulating liquids - Specifications for unused synthetic organic esters for electrical purposes"	En desarrollo	60836 ed2.0 (2005) - "Specifications for unused silicone insulating liquids for electrotechnical purposes"
	60422 ed3.0 (2005) - "Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance"	61203 ed1.0 (1992) - "Synthetic organic esters for electrical purposes - Guide for maintenance of transformer esters in equipment"	/	60944 ed1.0 (1988) - "Guide for the maintenance of silicone transformer liquids"
	60599 ed2.1 Consol. with am1 (2007) - "Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis"	/	/	/
	61181 ed2.0 (2007) - "Mineral oil-filled electrical equipment - Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests on electrical equipment"	/	/	/

IEEE	C57.106 (2006) - "Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment"	/	C57.147 (2008) - "Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers"	C57.111 (1989) - "Guide for Acceptance of Silicone Insulating Fluid and Its Maintenance in Transformers"
	C57.104 (2008) - "Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers"	/	/	C57.146 (2005) - "Guide for Interpretation of Gases Generated in Silicone-Immersed Transformers"
	C57.140 (2006) - "Guide for Evaluation and reconditioning of Liquid Immersed Power Transformers"	/	/	/
ASTM	D3487 - 09 - "Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus"	/	ASTM D6871 - 03 (2008) - "Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus"	ASTM D4652 - 05 - "Standard Specification for Silicone Fluid Used for Electrical Insulation"
	D117 - 10 - "Standard Guide for Sampling, Test Methods, and Specifications for Electrical Insulating Oils of Petroleum Origin"	/	/	D2225 - 04 - "Standard Test Methods for Silicone Fluids Used for Electrical Insulation"
	D3455 - 11 - "Standard Test Methods for Compatibility of Construction Material with Electrical Insulating Oil of Petroleum Origin"	/	/	D5282 - 05 - "Standard Test Methods for Compatibility of Construction Material with Silicone Fluid Used for Electrical Insulation"
	D3612 - 02 (2009) - "Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography"	/	/	D4559 - 99 (2010) - "Standard Test Method for Volatile Matter in Silicone Fluid"

Capítulo 3. Modelo de simulación en COMSOL.

3.1 Objetivos.

Hasta ahora se ha tratado de presentar las características básicas de la refrigeración en los transformadores de potencia (Capítulo 1), y a continuación, la información existente sobre el estado actual del conocimiento sobre líquidos alternativos (Capítulo 2).

Este capítulo se dedica a la explicación del análisis comparativo, llevado a cabo mediante herramienta informática COMSOL Multiphysics, del comportamiento de algunos de los aceites de silicona más usados y un aceite mineral, en cuanto a la refrigeración conseguida en un transformador de potencia.

El límite de potencia que un transformador puede entregar tiene una gran dependencia con las condiciones de refrigeración. Los fabricantes y usuarios de transformadores tienen por esto, gran interés en tener suficiente conocimiento sobre como es extraído el calor de las partes mas activas del transformador.

Una vez más, recordar que el fluido debe proporcionar suficiente refrigeración para evitar sobrecalentamientos y temperaturas que producen el envejecimiento de los aislantes eléctricos y del propio líquido, como se explicaba en los capítulos 1 y 2 de este estudio. La identificación de los puntos de mayores temperaturas, los llamados puntos calientes, será un factor fundamental en el correcto diseño de la refrigeración.

Para este estudio, en primer lugar se define el modelo usado para el análisis, su geometría y dimensiones, los valores de los parámetros usados para los cálculos, la formulación de los fenómenos físicos implicados y las simplificaciones del modelo respecto al caso real.

A continuación se dedica un apartado a las características concretas de los aceites de silicona empleados (Dow Corning 561, Bluesil 604 V 50 y KF96-20) y finalmente explicación de la herramienta de cálculo utilizada, el método en el que se basa, y el procedimiento de operación

con la herramienta que permite la obtención de los resultados presentados en la sección siguiente, su análisis y conclusiones.

3.2 Interpretación del modelo.

Este proyecto se centra en el análisis de los aspectos fluido-térmicos que intervienen en el diseño de un transformador. El modelo simula la distribución de temperaturas y velocidades en estado estacionario para un transformador trifásico de columnas bañado en aceite.

Para la realización de nuestro modelo, se considera el análisis de la geometría completa de un transformador trifásico de columnas, cuyas fases se encuentran refrigeradas individualmente por canales verticales. Como simplificación, se acepta que todas las fases tienen el mismo comportamiento, por lo que la simulación se realizará sobre una de ellas, siendo extrapolable el resultado al resto de las fases. Además consideraremos para el estudio únicamente uno de los canales verticales de refrigeración, correspondiente con la veinticuatroava parte del cilindro completo, considerando el comportamiento del resto idéntico. Igualmente se considera para el análisis la cuba constituida por un cilindro perfecto, lo que simplifica la geometría del modelo como se verá en apartados posteriores.

En el diseño de grandes transformadores de potencia, los aspectos térmicos tienen una gran importancia, ya que el envejecimiento de los materiales aislantes está directamente relacionado con el incremento de temperatura a partir de un cierto valor crítico.

Por este motivo, el límite de potencia que el transformador es capaz de entregar depende en gran medida de las condiciones de refrigeración. De acuerdo con la normativa IEC, el incremento medio de temperatura de los devanados de un transformador, por encima de la del refrigerante, no debe exceder 65°C. Sin embargo, la temperatura máxima del punto más caliente no está especificada en los estándares, aunque

para materiales aislantes de clase A, la temperatura de servicio más alta permitida es de 115°C. En sobrecargas de corta duración, según la normativa IEC, la temperatura más alta permitida para el punto más caliente es 140°C, mientras que en condiciones de cortocircuito, la temperatura media del devanado en arrollamientos de cobre es de 250°C, y en el caso de bobinados de aluminio, 200°C.

Para la realización de este modelo, se han de tener varios aspectos en cuenta.

El transformador es de tipo ONAN por lo que el aceite circula a través del transformador de forma natural. Otra de las consideraciones a tener en cuenta es la variación de la densidad y la viscosidad dinámica con la temperatura, calculándose sus expresiones en apartados posteriores. A la hora de realizar la representación del devanado de cobre, se le suprime el papel aislante para simplificar el modelo geométrico, ya que su efecto se puede considerar despreciable. La producción de calor es la misma en todos los devanados, por lo que considerará a todo el conjunto como un único bloque de cobre, obteniéndose su valor en apartados sucesores.

En cuanto al método de resolución, los efectos que se tienen en cuenta para el cálculo de la distribución de temperaturas son dos, por un lado la transferencia de calor entre los devanados, el fluido dieléctrico y el exterior, y el movimiento del fluido, considerando los problemas de conducción y convección y campo de flujo no isotérmico.

A continuación, se procederá a explicar la geometría empleada para el análisis, el calor producido por los devanados de cobre, así como los principios físicos en los que se basa este estudio, y el cálculo de los parámetros dependientes de la temperatura que caracterizan a cada uno de los fluidos, es decir, la viscosidad dinámica, la conductividad térmica, el calor específico y la densidad del fluido.

4.2.1 Geometría del transformador.

En un transformador trifásico con el núcleo en columnas, la disposición de los devanados es un apilamiento vertical, estando colocados los devanados de alta y baja tensión de forma concéntrica respecto al eje vertical. El conjunto de los devanados y la cuba que los contiene tiene forma vertical cilíndrica con el aspecto mostrado en la Figura 3.1:



FIGURA 3.1 – Transformador ABB

En la simulación se realizará un modelo en tres dimensiones de una de las fases del transformador, asumiendo a su vez que en todos los canales de refrigeración los procesos térmicos serán exactamente los mismos. Por tanto, para simplificar el modelo, se ha escogido únicamente uno de los canales verticales, correspondiente con una porción de 15° del transformador.

En la figura 3.2 se muestra la vista en planta de la porción de transformador que vamos a simular. En ella se muestran los devanados de baja tensión, las tiras de separación entre devanados, y las paredes aislantes. También se puede ver el canal de refrigeración, por el cual circulará el aceite de refrigeración. Para la realización de este modelo solo tendremos en cuenta los devanados de baja tensión, ya que serán los que

provoquen un mayor aumento del calor producido por las pérdidas de efecto Joule, al ser la intensidad que recorre sus devanados mayores que en alta tensión.

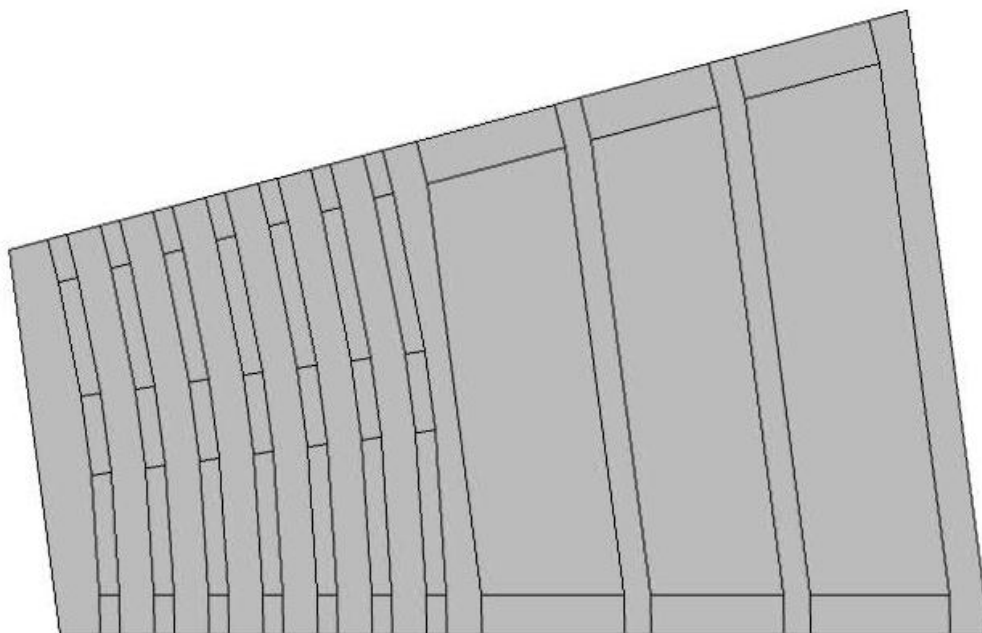


Figura 3.3 – Vista en planta de 15° del transformador

La altura total del transformador será de 1056 mm, ya que está formado por 11 bobinas de 8 espiras cada una, con una altura de 12 mm cada espira. Por tanto:

$$\text{Altura} = 12 * 8 * 11 = 1056 \text{ mm}$$

El devanado de baja tensión estará formado por siete capas, y cada una de ellas contendrá los 88 conductores mencionados anteriormente. Estas espiras, en el modelo, aparecerán todas unidas formando un único bloque de cobre por capa, ya que cada una de ellas producirá aproximadamente las mismas pérdidas, produciendo el mismo calor, por lo que se puede aproximar.

3.2.1 Producción de calor.

El calor producido por los devanados estará relacionado con las pérdidas en el cobre que tengan dichos conductores, por tanto estará ligado tanto a la resistencia del cable como a la intensidad que lo atraviesa.

$$P_{cu} = R * I^2$$

Para obtener el dato de resistencia debemos conocer antes tanto la sección como la longitud del devanado, así como la resistividad del material:

$$R = \rho * \frac{L}{S}$$

El fabricante nos proporciona tanto la intensidad que circula, como los diámetros interiores y exteriores de cada una de las siete capas de los devanados de baja tensión. Además nos muestras las características de la pletina que forma dichos conductores (capítulo 2):

- Intensidad de secundario: 1283 A.
- Diámetros interiores y exteriores de cada una de las capas:

Capa	Diámetro exterior(mm)	Diámetro interior(mm)	Diámetro medio(m)
1	478,4	468	0,4732
2	494,8	484,4	0,4896
3	511,2	500,8	0,506
4	527,6	517,2	0,5224
5	544	533,6	0,5388
6	560,4	550	0,5552
7	577	566,4	0,5717

Figura 3.4 – Diámetros interiores y exteriores

- Características de la pletina:

La pletina que forma los conductores de cobre tendrá una anchura de 4,6 mm y una altura de 10,4 mm. Para la obtención de las pérdidas producidas por el cobre se trabajará con la altura real, sin contar con el papel aislante, no como en el caso del modelo teórico en el cual la altura considerada para cada espira era de 12 mm.

- El transformador estará compuesto por 11 bobinas de 8 conductores conectados en paralelo.
- La resistividad del cobre a temperatura ambiente (20°C) es $1,67785 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$.

3.2.1.1 Cálculos justificativos.

En primer lugar se calculará la longitud total de los devanados del transformador, que será la resultante de la suma de cada una de las longitudes por capa.

$$L_{capa} = \pi * D_{media} * n$$

Donde n se corresponde con el número de bobinas totales, 11 en este caso.

<i>Longitudes por capa (m)</i>
16,3526181
16,9193614
17,4861047
18,052848
18,6195913
19,1863347
19,7565337

Figura 3.5 – Longitudes por capa

Por tanto, la longitud total del bobinado será:

$$L_{Total} = \Sigma L_{capa} = 126,373392 m$$

A continuación debemos hallar la sección correspondiente con la bobina. Para ello, debemos hallar la sección de cada una de los conductores que forman la bobina por separado y juntarlas para obtener la sección correspondiente a cada bobina. En este caso está formada por 8 conductores.

$$S_{Bobina} = \Sigma S_{Pletina} = 10,4 * 4,6 * 8 = 382,72 \text{ mm}^2 = 0,00038271 \text{ m}^2$$

Con todos los datos conocidos ya somos capaces de hallar el valor de la resistencia:

$$R_{20^{\circ}C} = \rho * \frac{L}{S} = 0,005540235 \Omega$$

El cálculo de esta resistencia se ha considerado para condiciones ambientales, pero en realidad el transformador funcionará sobre unas condiciones de carga, aumentando la temperatura de trabajo. El valor de la resistividad varía con la temperatura, por lo tanto la resistencia lo hará en la misma proporción. Considerando una temperatura cercana a los 65°C, el valor de la resistencia en estas condiciones es:

$$R_{65^{\circ}C} = R_{20^{\circ}C} * \left(\frac{235 + 65}{235 + 20} \right) = 0,006517924 \Omega$$

El calor desprendido por el arrollamiento del transformador en términos de potencia, obtenido a través de las pérdidas en el cobre del devanado es:

$$P_{cu} = R * I^2 = 0,006517924 * 1283^2 = 10729,08 \text{ w}$$

Este sería el calor desprendido por la totalidad del transformador, pero para nuestro estudio de simulación tan solo contaremos con uno de los canales de refrigeración, correspondiente con la veinticuatroava parte del transformador. Por tanto la potencia que necesitamos se corresponderá tan solo con la parte proporcional al total, en este caso:

$$P_{cu \ 15^{\circ}} = \frac{P_{cu}}{24} = 447,05 \text{ w}$$

3.2.2 Principios físicos.

El objetivo del estudio que se va a llevar a cabo es comparar la capacidad de refrigeración de los dos fluidos que se van a estudiar. Para esto, se busca obtener la distribución de temperaturas y con ella la ubicación más probable de los puntos calientes; e igualmente, observar el campo de velocidades del fluido y así el movimiento de éste dentro de la cuba, aspecto también fundamental en la refrigeración.

Para ello, en la simulación del modelo geométrico se consideran dos efectos diferentes que tienen lugar en el fluido, ambos analizados en estado estacionario en condiciones nominales de funcionamiento.

Por este motivo, se considera la interacción fluido-térmica, que se basa en dos fenómenos diferentes, la transferencia de calor y el movimiento de los fluidos. De esta manera, para el análisis del movimiento del fluido, la herramienta recurre a las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo débilmente compresible en dos dimensiones, que se basan en dos principios, la conservación de la masa y la conservación de la cantidad de movimiento:

$$\rho u * \nabla u = \nabla * \left[-\rho I + \eta(\nabla u + (\nabla u)^T) - \left(\frac{2\eta}{3}\right)(\nabla u)I \right] + \rho g$$

$$\nabla(\rho u) = 0$$

En este caso, la densidad, ρ , y la viscosidad dinámica, η , son dependientes de la temperatura en todos los fluidos estudiados.

En segundo lugar, interviene el fenómeno de la transferencia de calor, en el que el calor generado en los devanados del transformador es disipado al exterior mediante dos mecanismos, conducción y convección. La conducción es el único mecanismo de transmisión de calor posible en los medios sólidos opacos; cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, siendo el calor transmitido por conducción

proporcional al gradiente de temperatura y a la superficie de contacto. Éste es el fenómeno que ocurre entre el devanado de cobre y el aislamiento sólido que lo recubre. En cambio, cuando un fluido a una temperatura T_0 se pone en contacto con un sólido cuya superficie de contacto está a una temperatura distinta el proceso de intercambio de energía térmica se denomina convección. Existen dos tipos de convección, natural o forzada. En nuestro caso, la circulación del fluido a través de los devanados es forzada, siendo u la velocidad de entrada del fluido.

El modelo de transferencia de calor está basado en un balance de energía, como se indica en la siguiente expresión.

$$\nabla(-k \cdot \nabla T) = Q - \rho \cdot C_p \cdot u \cdot \nabla T$$

En esta ecuación, k representa la conductividad térmica, C_p es el calor específico a presión constante y Q es la generación de calor por unidad de volumen en cada uno de los devanados. A igual que la densidad y la viscosidad, la conductividad térmica k y el calor específico C_p son dependientes de la temperatura.

Finalmente, para completar la definición del modelo hay que especificar las condiciones de contorno. El fluido refrigerante entrará por la parte inferior del cilindro a una velocidad u en mm/s en la dirección z (en $z=0$). Además, se supone que en los canales de salida, situados en la parte superior del cilindro, la presión se mantiene constante y la velocidad radial del fluido es nula. Por último, en la interface fluido-superficie de devanados se considera la condición de no-deslizamiento: el fluido en contacto con la superficie tiene velocidad nula.

Por último, las condiciones de contorno para el módulo de transferencia de calor son:

- Temperatura de entrada del aceite: $T_0=25^\circ\text{C}$.
- Flujo de calor convectivo en los contornos de salida: $n \cdot (-k\nabla T) = 0$

- Los contornos de las superficies exteriores, tanto de la parte superior como la inferior, están aisladas térmicamente.
- Conductividad térmica del sólido (cobre): 383 [W/ (m.K)].
- Producción volumétrica de calor en los devanados: $Q_s = 447,05$ [W/ m³].
- Velocidad de entrada del fluido: 5 mm/s.

El resto de parámetros que definen al fluido son dependientes de la temperatura, viscosidad dinámica, calor específico, conductividad térmica y densidad, y serán calculadas sus expresiones en el siguiente apartado. Dichas expresiones son necesarias para la definición total del modelo y la obtención posterior de los resultados, como se analizará en el Capítulo 4.

3.2.3. Parámetros de los fluidos de refrigeración analizados.

Por último, para una interpretación correcta de los resultados procedentes de la simulación, es necesario el estudio comparado de los parámetros de ambos fluidos, ya que caracterizan su comportamiento. Estos parámetros funcionarán como datos de entrada del modelo. Como ya se introdujo, los fluidos comparados son un aceite mineral y un aceite de silicona.

Para la representación del comportamiento del aceite mineral, se toma el aceite 10GBN, producido por la compañía Nynäs Petroleum AB, radicada en Estocolmo, Suecia. Para la resolución del modelo, en cuanto la interacción fluido-térmica entre los devanados y el fluido, es necesario proporcionar valores de conductividad, calor específico, densidad y viscosidad dinámica. Las expresiones utilizadas fueron obtenidas de hojas de características proporcionadas por el fabricante.

Para la conductividad térmica del aceite se tomó constante y de valor 0.125 [W / (m·°K)]. Las expresiones para densidad, viscosidad

dinámica y calor específico -presentadas a continuación en este orden- son variables en función de la temperatura.

$$\begin{aligned}\rho &= 875.6 - 0.63T \text{ [kg/m}^3\text{]} \\ \eta &= \rho * 10^{(-4.726-0.0091*T)} \text{ [m}^2\text{/s]} \\ Cp &= 1960 + 4.005T \text{ [J/(kg} \cdot \text{ }^\circ\text{K)}\text{]}\end{aligned}$$

Donde los valores de T, expresan la temperatura en grados Celsius.

3.2.3.1 Dow Corning® 561

Como primer representante de los aceites de silicona, se seleccionó en primer lugar el 561 TRANSFORMER LIQUID, un fluido dieléctrico fabricado por la compañía norteamericana DOW CORNING®, radicada en Michigan, EE.UU.

Este punto se dedica a presentar las características generales del aceite de silicona Dow Corning® 561, para la comparación con el aceite mineral siguiendo un orden equivalente al tomado en el estudio general de los líquidos alternativos del capítulo 2.

La silicona Dow Corning® 561 para transformadores es un agente aislante a base de silicona dimetílica, cuyas propiedades proporcionan seguridad y alto rendimiento.

Esta silicona que contiene dicho aceite, constituye uno de los productos químicos menos peligrosos de los que existen en la actualidad, por lo cual resulta el mejor sustituto para los askareles a base de PCB (policloruro bifenilo) que se utilizaban normalmente en transformadores. La silicona Dow Corning® 561 para transformadores es un refrigerante dieléctrico, altamente estable y mas resistente al fuego que los aceites minerales o los compuestos de hidrocarburo alifático, los cuales son altamente inflamables. Tampoco presenta los riesgos de contaminación ambiental que tenían los askareles a base de PCB.

Este fluido de silicona ha sido específicamente diseñado para transformadores y, después de haber sido sometido a rigurosos ensayos, se ha comprobado que posee la estabilidad térmica y eléctrica necesaria y que también actúa como disipador del arco voltaico.

Desde hace mas de 25 años, Dow Corning viene utilizando el dimetilpolisiloxano en transformadores corrientes y para usos especializados, hasta un máximo de 9 MVA de energía, en Estados Unidos, Japón, Canadá, Europa y Brasil, siendo además la silicona líquida Dow Corning® 561 para transformadores, considerada como apropiada para cualquier tipo de uso en transformadores industriales que, de algún modo, conllevan problemas serios de salubridad y contaminación ambiental, así como riesgos de incendio o explosión.

Análogamente al caso del aceite mineral, los datos utilizados para el estudio fueron obtenidos de las hojas de características que el fabricante ofrece. En dichas hojas de características se proporcionan, entre otros, valores puntuales para diferentes temperaturas, de los mismos parámetros arriba mencionados para el aceite mineral. En este caso, por tanto, es necesaria la obtención de las expresiones que rigen el comportamiento de estos parámetros en función de la temperatura a partir de los valores proporcionados en las hojas, al no disponer de las expresiones matemáticas como en el caso del aceite mineral.

A partir de estos valores puntuales, se procedió a la construcción de tablas con las que posteriormente, representar gráficamente su evolución. Así, mediante el programa Microsoft Excel, las tablas planteadas fueron las siguientes:

Temperatura (°C)	Densidad (g/ml)
-20	0,972961984
0	0,965893037
20	0,958926067
40	0,952058882
60	0,945289354
80	0,938615415
100	0,932035054
120	0,925546316
140	0,919147302

Tabla 3.6. Densidad de DOW CORNING 561.

Temperatura (°C)	Calor Específico (kJ/kg °C)
40	1,5
100	1,583
200	1,667

Tabla 3.7. Calor específico DOW CORNING 561.

Para el caso de la viscosidad dinámica, parámetro más diferenciador del comportamiento entre los líquidos estudiados, se trata de conseguir una mayor precisión para lo que, a partir del gráfico se tomaron diferentes puntos viscosidad cinemática para los valores conocidos de densidad, y a partir de estos, obtener la viscosidad dinámica para cada punto (en unidades del S.I.) –test de viscosidad cinemática realizados de acuerdo con ASTM D 341 para DC 561 y otros líquidos dieléctricos-.

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Densidad (g/ml)	Viscosidad dinámica (kg/m s)
-20	0,00015	0,97296198	0,145944298
0	0,000093	0,96589304	0,089828052
20	0,000054	0,95892607	0,051782008
40	0,000037	0,95205888	0,035226179
60	0,000026	0,94528935	0,024577523
80	0,00002	0,93861542	0,018772308
100	0,000015	0,93203505	0,013980526

Teniendo ahora todas las tablas de datos, puede representarse para cada emparejamiento (temperatura/parámetro), un gráfico de

dispersión en el que se representan los puntos. Partiendo del gráfico, haciendo uso de esta herramienta de Microsoft Excel, puede obtenerse una formulación de las curvas que describen los puntos, mediante una línea de tendencia aproximada a ellos. Estas gráficas y las formulaciones que representan las curvas, son las siguientes:

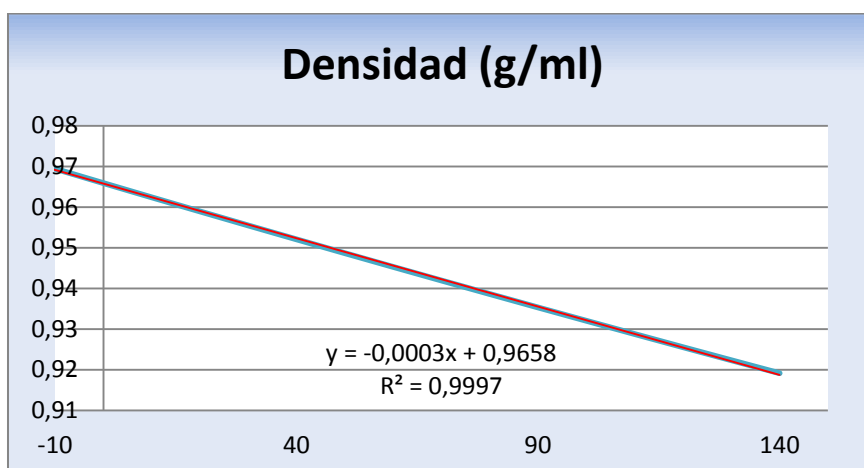


Figura 3.8. Densidad DC 561 frente a temperatura.

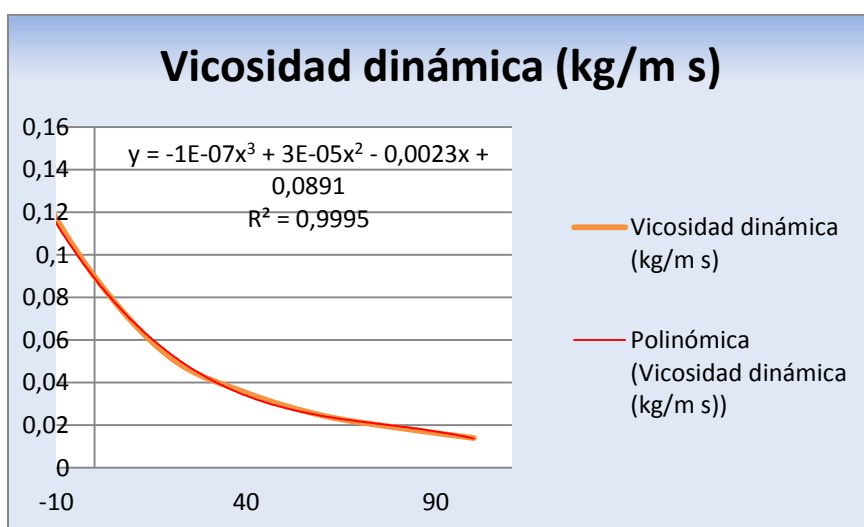


Figura 3.9. Viscosidad dinámica DC 561 frente a temperatura.

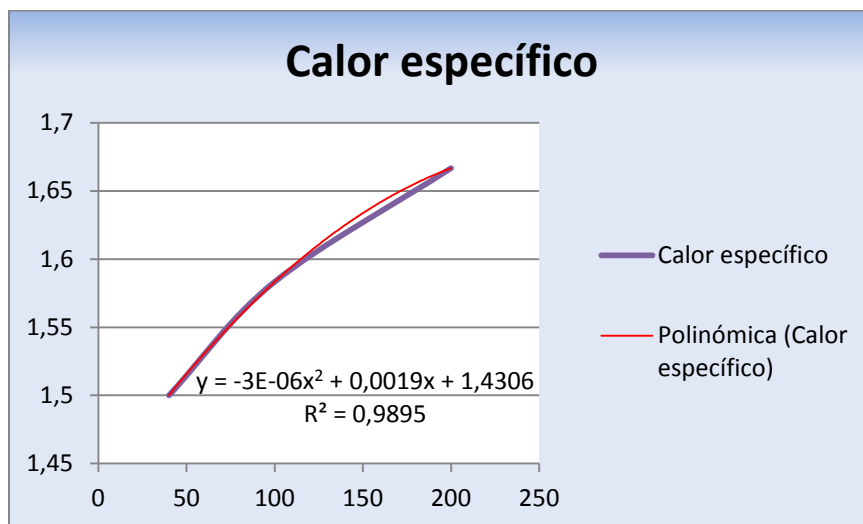


Figura 3.10. Calor específico del DC 561 frente a temperatura.

Por último, la conductividad térmica para el DC 561 se considera constante para el rango de temperaturas visto en las anteriores propiedades, siendo este valor 0,151 W/(m·K).

TEMP (°C)	DENSIDAD kg/m ³	VISCOSIDAD DINAMICA kg/(m·s)	CONDUCTIVIDAD TERMICA W/(m·K)
0	965,8930373	0,083066801	
20	958,9260669	0,051782008	
40	952,058882	0,037130296	1507
60	945,2893541	0,024577523	
80	938,6154148	0,018772308	
100	932,0350536	0,013980526	1590
200			1674

Figura 3.11. Tabla resumen de densidad, viscosidad dinámica y conductividad térmica.

Presentando sus variables en función de la temperatura tenemos:

$$\rho = 965.78 - 0.3363 * T \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\eta = 0.0852^{(-0.019*T)} \text{ [kg/(m * s)]}$$

$$Cp = 103.39 * \ln(T) + 1122.5 \text{ [J/(kg * K)]}$$

3.2.3.2 Bluesil 604 V 50

Como segundo representante de los aceites de silicona, se eligió el Bluesil 604V59 de BlueStar, con sede en Lyon, Francia.

Se trata de un líquido dieléctrico para la refrigeración de transformadores de media potencia compuesto de polidimetilsiloxano, cuya pureza se ha comprobado especialmente para aplicaciones electrotécnicas, especialmente cuando pueden surgir problemas de seguridad ambiental o incendios, como en lugares públicos, áreas urbanizadas, sótanos, proximidad a las corrientes de agua, etc

Siguiendo el mismo procedimiento que para el caso anterior con los datos facilitados por la compañía, se obtienen las siguientes tablas.

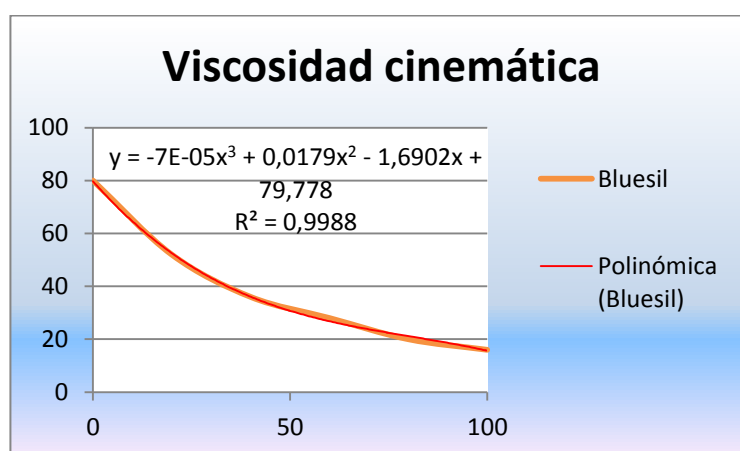


Figura 3.12. Viscosidad cinemática del Bluesil frente a temperatura.

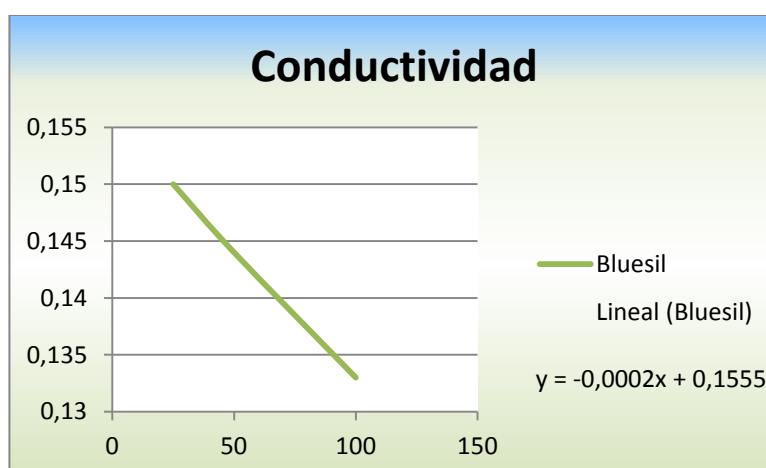


Figura 3.13. Conductividad térmica del bluesil frente a temperatura.

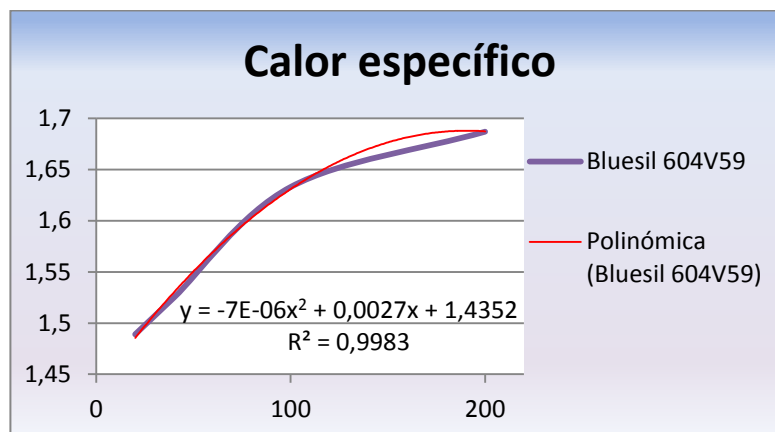


Figura 3.14. Calor específico del bluesil frente a temperatura.

Por último, la conductividad térmica para el Bluesil 604V59 se considera constante, al igual que en el caso anterior, para el rango de temperaturas, siendo este valor 0.144 W/(m·K).

TEMP (°C)	DENSIDAD kg/m ³	VISCOSIDAD DINAMICA kg/(m·s)	CONDUCTIVIDAD TERMICA W/(m·K)
0	965,7990373	0,077271443	
20	958,5660669	0,049864155	1489
40	952,348882	0,03427412	1525
60	944,8693541	0,026468102	
80	938,6154148	0,018772308	
100	931,094526	0,014912561	1633
200			1687

Figura 3.15. Tabla resumen de densidad, viscosidad dinámica y conductividad térmica.

Presentando sus variables en función de la temperatura tenemos:

$$\rho = -0.3441 * T + 965.75 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\eta = 7E - 06 * T^2 - 0.0013 * T + 0.0753 \text{ [kg/(m * s)]}$$

$$Cp = -0.007 * T^2 + 2.6528 * T + 1435.2 \text{ [J/(kg * K)]}$$

3.2.3.3 KF-96-20

Por último, se eligió el dieléctrico de baja viscosidad KF-96-20 de la empresa nipona Shin-Etsu.

De los datos proporcionados por la compañía y siguiendo el mismo procedimiento anterior obtenemos las dos ecuaciones necesarias para el estudio en COMSOL.

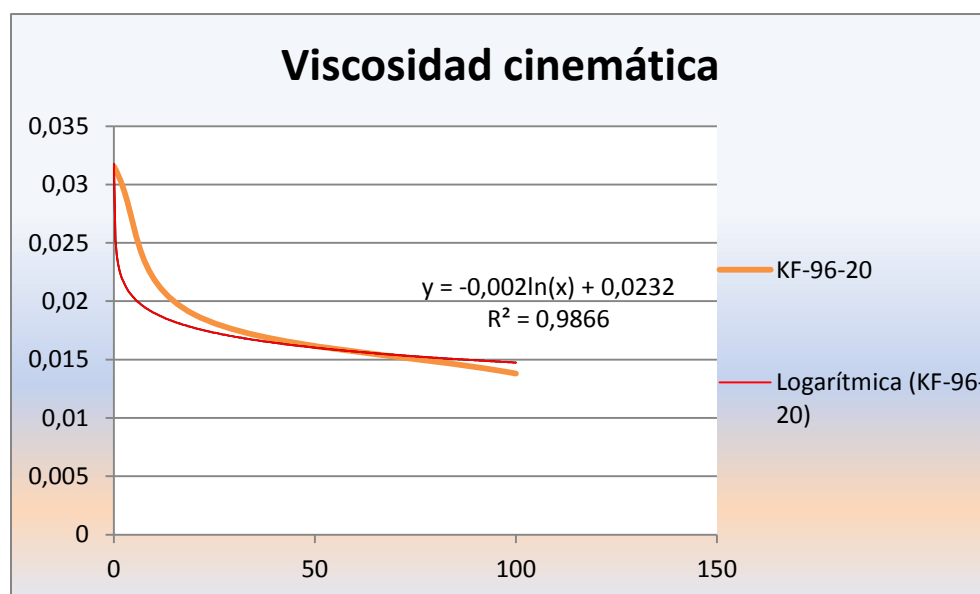


Figura 3.16. Viscosidad cinemática del KF-96-20 frente a temperatura.

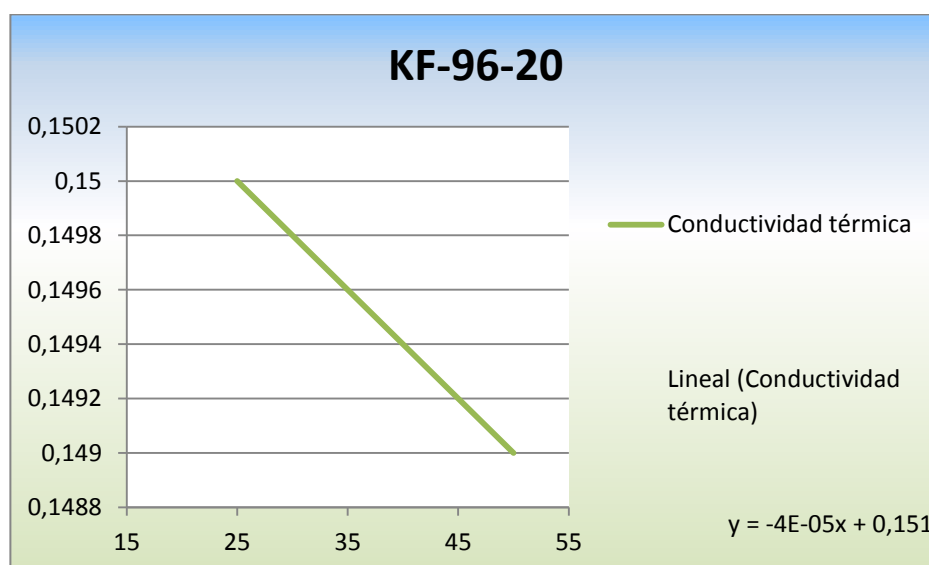


Figura 3.17. Conductividad térmica del KF-96-20 frente a temperatura.

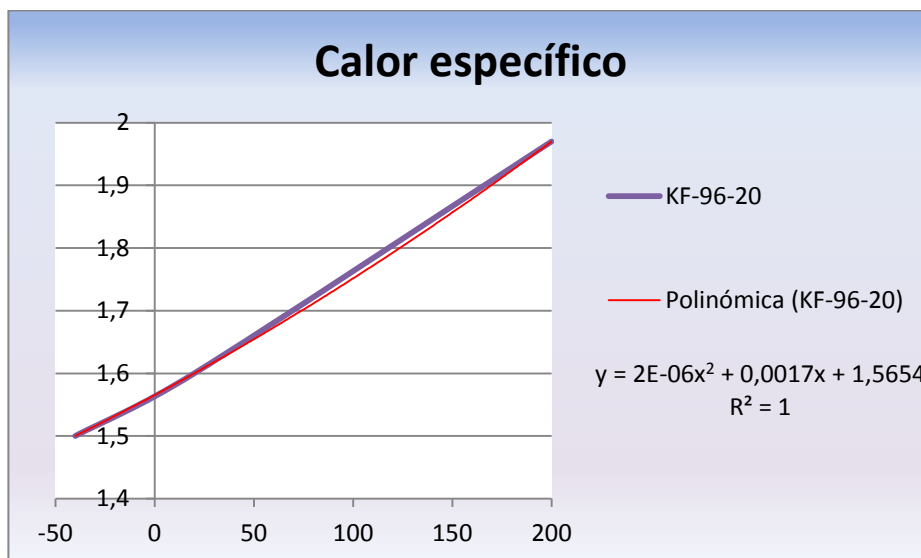


Figura 3.18. Calor específico del KF-96-20 frente a temperatura.

La conductividad térmica se aproxima a un valor constante de 0.149 W/(m·K), ya que su variación en el intervalo de temperaturas estudiado es prácticamente nula.

TEMP (°C)	DENSIDAD kg/m ³	VISCOSIDAD DINAMICA kg/(m·s)	CONDUCTIVIDAD TERMICA W/(m·K)
0	961,74	0,077271443	
20	943,01	0,049864155	1600
40	924,28	0,03427412	
60	905,55	0,026468102	
80	886,82	0,018772308	
100	868,09	0,014912561	
200			1970

Figura 3.15. Tabla resumen de densidad, viscosidad dinámica y conductividad térmica.

Presentando sus variables en función de la temperatura tenemos:

$$\rho = -0.9365 * T + 96174 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\eta = 0.0137^{(-0.015*T)} \text{ [kg/(m * s)]}$$

$$Cp = 71.9808 * T^2 + 1571.2 \text{ [J/(kg * K)]}$$

3.3. Otros parámetros de estudio que caracterizan a un fluido.

El calor se define como la forma de energía que puede ser transferida de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. El calor puede ser transferido de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requiere la existencia de una diferencia de temperatura y siempre desde el medio de más alta temperatura a uno de temperatura más baja. En el caso de los transformadores, la transferencia de calor se realiza solo mediante conducción y convección.

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor entre dos sólidos, mientras que la convección es el mecanismo de transferencia de calor entre un sólido y un fluido que están en contacto a distinta temperatura.

Existen dos tipos de convección: natural (o libre) y convección forzada, dependiendo de cómo se inicia el movimiento del fluido. En la convección forzada, el líquido es obligado a circular a través de una superficie o un conducto por fuerzas externas, como ventiladores y bombas. En cambio, en la convección natural la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a unas fuerzas ascensionales. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior. La convección también se clasifica como externa o interna, dependiendo si el fluido circula por una superficie o a través de un canal.

Estos mecanismos pueden ser descritos por números adimensionales que caracterizan el flujo en el interior del circuito de refrigeración del transformador. Estos parámetros nos permiten conocer si el régimen es laminar o turbulento, la eficacia de la transferencia de calor

o el crecimiento de las capas límite térmica e hidrodinámica. En los apartados posteriores describiremos estos números adimensionales – Reynolds y Prandtl- su significado físico e importancia.

3.3.1. El número de Prandtl

El número de Prandtl es un número adimensional que indica comparativamente la relación entre los espesores de las capas límites cinemática y térmica [17].

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular del momento}}{\text{Difusividad térmica}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k}$$

Este número mide la efectividad relativa del transporte de momento con respecto al transporte de la energía por difusión en las capas límite hidrodinámica y térmica, respectivamente. Para aceites minerales, el número de Prandtl es generalmente mayor de 100 y la capa límite térmica es más delgada que la capa límite hidrodinámica. El número de Prandtl en fluidos tiene magnitudes comprendidas desde valores inferiores a 0.01 para los metales líquidos hasta más de 100000 para aceites pesados. El número de Prandtl para los gases tiene valores próximos a 1, que indican que el momento y el calor se disipan a la misma velocidad en el fluido.

3.3.2. El número de Reynolds

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría de la superficie, la rugosidad de la superficie, la velocidad, la temperatura superficial y el tipo de fluido, entre otros aspectos.

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional. Como todo número adimensional es un cociente, una comparación. En este caso es la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos. [17]

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas de viscosidad}} = \frac{\rho L^2 v^2}{\eta \nu L} = \frac{\rho L v}{\eta} = \frac{L v}{\nu}$$

El número de Reynolds nos indica el predominio de la viscosidad. Cuanto mayor sea, menor es la importancia de la viscosidad y viceversa.

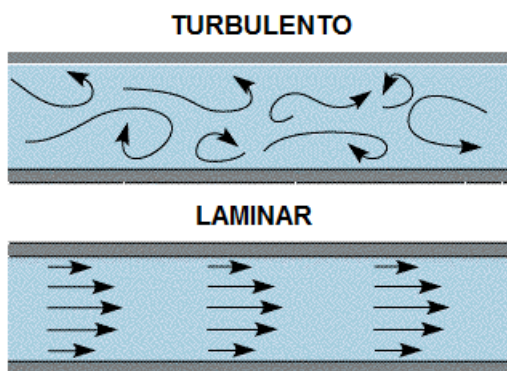


Figura 3.16. Representación de los dos regímenes de flujo de un fluido en un conducto.

3.3.3. El número de Nusselt

En los estudios de convección, es común trabajar con parámetros adimensionales que rigen las ecuaciones junto a la combinación de variables agrupándose en dimensiones de números con el fin de reducir el número total de variables, así como la adimensionalidad del coeficiente de transferencia de calor (h) con el número de Nusselt definido como:

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k}$$

Donde k es la conductividad térmica del fluido y L_c es la característica longitud.

La transferencia de calor a través de la capa de un fluido será por convección cuando el fluido tenga un cierto movimiento y por conducción cuando la capa de fluido sea inmóvil.

El flujo de calor (tasa de transferencia de calor por unidad de tiempo por unidad de superficie)

en cualquier caso será:

$$q_{\text{conv}} = h \cdot \Delta T$$

y

$$q_{\text{cond}} = k \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

Obteniendo su ratio tenemos:

$$\frac{q_{\text{conv}}}{q_{\text{cond}}} = \frac{h \cdot \Delta T}{k \cdot \frac{\Delta T}{L}} = \frac{h \cdot L}{k} = \text{Nu}$$

Siendo este el número de Nusselt. Por lo tanto, el número de Nusselt representa la mejora de transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección relativa a la conducción a través de la capa del fluido mismo. Cuanto mayor sea el número de Nusselt, más eficaz será de la convección. Un número de Nusselt de Nu 1 para la capa de un fluido representa la transferencia de calor a través de la capa por conducción pura.

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular del momento}}{\text{Difusividad térmica}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k}$$

3.4. Método de análisis.

La complejidad para alcanzar soluciones de cierta exactitud exige el uso de una potente herramienta de cálculo como es un software informático capaz de realizar la enormidad de cálculos requeridos por las ecuaciones diferenciales que rigen los movimientos de las partículas y los cambios de temperatura.

En este apartado se explica la técnica numérica (MEF) en la que se apoya la herramienta informática que se utiliza en este estudio (Comsol Multiphysics); a continuación una presentación de este programa, el modo de funcionamiento con éste y la resolución del modelo llevado a cabo mediante explicaciones para el interfaz gráfico.

3.4.1. Método de los elementos finitos (MEF).

3.4.1.1. Definición.

El método de los elementos finitos (MEF) es un procedimiento que permite obtener soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales, así como de ecuaciones integrales, mediante técnicas numéricas estándar, como el método de Euler, o de Runge-Kutta.

3.4.1.2. Breve descripción histórica.

Las ideas básicas de este método se originaron en los avances en análisis estructural de la industria aeronáutica de la década de los 50. En la década de los 60 el método fue generalizado para la solución aproximada de problemas de análisis de tensión, flujo de fluidos y transferencia de calor. En la década de los 70 el método fue extendido al análisis de problemas no lineales de la mecánica del continuo. Hoy en día, permite resolver situaciones físicas de todo ámbito, que puedan formularse mediante un sistema de ecuaciones diferenciales.

En sus principios, el método de los elementos finitos no tuvo un fuerte impacto en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc. Las principales causas eran, por una parte, la no disponibilidad de computadoras en los estudios de ingeniería, y, por otro lado, el requisito de conocimientos profundos no solamente de la técnica y de los modelos matemáticos pertinentes sino también de programación computacional. Estas circunstancias obligaban a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado coste tanto económico como en tiempo de desarrollo.

Actualmente, la situación es completamente diferente, puesto que las computadoras modernas soportan, sin demasiados inconvenientes, poderosos programas de propósito general y de fácil utilización.

3.4.1.3. Base intuitiva.

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo registrarán también el comportamiento del elemento.

De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no. El número de ecuaciones que es necesario resolver es proporcional al número de nodos.

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

Dominio. Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.

Condiciones de contorno. Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: desplazamientos, temperaturas, focos de calor,...

Incógnitas. Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno hayan actuado sobre el dominio o sistema: velocidades, temperaturas, etc. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo.

El método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el discretizado del dominio en subdominios denominados elementos, formados a partir de la aplicación de un mallado a la superficie total continua, de características concretas elegidas. Tras la discretización del modelo los elementos se definen por un número discreto de puntos que conectan entre si los elementos que forman el mallado. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema.

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real de cierta precisión y más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado, no alcanzando soluciones exactas. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en una, dos o tres dimensiones). Además, el método es fácilmente adaptable a problemas de difícil resolución analítica: problemas de difusión de calor; de mecánica de fluidos, para calcular campos de velocidades y presiones (Dinámica de fluidos Computacional, CFD); o de campo electromagnético.

A continuación, se presenta el programa de cálculo seleccionado para llevar a cabo el análisis.

3.4.2. Comsol Multiphysics®.

3.4.2.1. Introducción.

De entre los programas informáticos basados en el método de los elementos finitos, el software seleccionado para el análisis es el programa Comsol Multiphysics versión 3.5. Este programa pertenece a la empresa COMSOL, fundada en 1986 en Estocolmo (Suecia) y desde su inicio se ha especializado en los campos de ingeniería, matemática aplicada y física. COMSOL también es el desarrollador de la PDE Toolbox de MATLAB.

Este programa, al igual que otros equivalentes como SolidWorks, Catia, Ansys, Cosmos, etc. es usado por científicos, ingenieros y otros interesados en realizar un preanálisis de cierta profundidad con anterioridad a la decisión de llevar a cabo la fabricación de un prototipo sobre el que realizar los análisis finales que verificarán la validez de lo

diseñado y su posterior producción. Se consigue así, de forma ágil, obtener resultados que hayan tenido en cuenta tanto el nivel de detalle elegido por el usuario como algunos de los varios procesos físico-químicos actuantes de forma instantánea, al disponer Comsol Multiphysics de la posibilidad de implementar varios módulos de principios para actuar simultáneamente.

En este programa es posible modelar a partir de la representación de una geometría en la que se fijan las cantidades físicas que caracterizan al problema, o bien a través de la introducción de las ecuaciones que modelen el problema, siendo igualmente posible, la combinación de ambas formas de modelado.

Como programa basado en método de los elementos finitos, COMSOL trabaja sobre un sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales (PDEs) implementadas en el programa, que crean una descripción matemática de varios fenómenos físicos basados en las leyes de la ciencia.

Como características principales del programa, se pueden citar:

- Interfaz gráfico "amigable" e interactivo para todas las etapas del proceso de modelado (preproceso, proceso y postproceso).
- Ilimitadas prestaciones de multifísica.
- Formulación general para un modelado rápido y sencillo de sistemas arbitrarios de PDEs.
- Multifísica multidimensional para modelado simultáneo de sistemas en 1D, 2D y 3D.
- Incorpora herramientas CAD para modelado sólido en 1D, 2D y 3D.

Permite importar y reparar la geometría de archivos CAD en formato DXF y IGES. En particular, permite la importación de archivos creados en AutoCAD y CATIA.

Generación automática y adaptativa de mallas, con un control explícito e interactivo sobre su tamaño.

Extensa biblioteca de modelos y propiedades de materiales.

Disponibles los "solvers" más novedosos; entre ellos destacan, "solvers" iterativos para problemas estacionales lineales y no lineales, dependientes del tiempo, y de valores propios.

Postprocesado interactivo que permite visualizar cualquier función de la solución.

Integración total con MATLAB y sus toolboxes.

Las posibilidades de modelización y simulación de COMSOL, junto con las librerías de las que dispone, lo convierten en una herramienta aplicable en amplio abanico de áreas, agrupadas en los siguientes módulos de aplicación:

Acústica, electromagnetismo, sistemas microelectromecánicos (MEMS), ingeniería de microondas, componentes de radiofrecuencia, dispositivos semiconductores, propagación de ondas.

Reacciones químicas, difusión, dinámica de fluidos, fluidos en medios porosos, transferencia del calor, fenómenos de transporte.

- Mecánica de estructuras.
- Física, geofísica, óptica, fotónica, mecánica cuántica.
- Sistemas de control.
- Modelización de componentes.
- Matemática aplicada.

3.4.2.2. Procedimiento general de cálculo.

A continuación se explica la metodología de cálculo habitual usada con este programa. Esta metodología, de forma común a otros

programas basados en el método de elementos finitos, se puede ordenar en tres grandes etapas; el preproceso, proceso y el postproceso.

La etapa de preproceso constituye todos los pasos iniciales previos a la solución del problema, esto es, la selección del modelo, diseño de la geometría, introducción de todos los datos de entrada que se usaran en la siguiente etapa de procesado del modelo. Esta etapa inicial de preproceso, en el caso de Comsol Multiphysics, se lleva a cabo como sigue.

Al arrancar el programa, primero debe seleccionarse el tipo de modelo. El programa ofrece diferentes módulos de cuya selección dependerán los principios físicos que se aplicaran en el diseño que se desea construir y analizar. Además se debe seleccionar las dimensiones en las que estos principios físicos deben actuar; esto es, el sistema de coordenadas y la variación o no del tiempo en el análisis.

Seleccionado y abierto el modelo, el segundo paso en esta etapa de preproceso es la representación de la geometría que desea estudiarse. El programa dispone de herramientas de dibujo como formas lineales y poligonales predefinidas que pueden utilizarse directamente sobre pantalla o mediante la introducción de las coordenadas que definen las figuras y condiciones sobre su orientación. Cada figura o elemento tiene asignado una identificación pudiendo actuar en cualquier momento sobre sus propiedades, como se hace en el paso siguiente al acabar la geometría.

El tercer paso es proporcionar al modelo valores y expresiones que se añaden a los procedimientos y valores predefinidos por defecto en el programa Comsol. Estos valores, constantes o variables, pueden ponerse a disposición del modelo completo, o de forma independiente, para determinadas figuras o partes del diseño. Estos valores y expresiones se denominan condiciones de contorno, bajo los cuales el programa realiza sus procedimientos matemáticos de cálculo.

A continuación, como última actividad, enteramente dependiente del diseñador, se indica qué partes del modelo geométrico deben poseer los valores constantes y expresiones que se pusieron a disposición del programa como condiciones de contorno. Esto es, estos valores se asocian a los diferentes subdominios de forma individualizada.

En este momento, el programa dispone de los fenómenos físicos que deben tenerse en cuenta en la resolución, la geometría sobre la que debe aplicarse y los valores y expresiones asignados de forma concreta a cada elemento de la geometría.

Para finalizar la etapa de preprocesado, común a cualquier programa de elementos finitos, es necesaria la creación del mallado que, como se explicó, consigue una discretización de la geometría continua. El programa Comsol permite seleccionar las condiciones bajo las cuales este mallado debe llevarse a cabo, y el nivel de precisión que quiere conseguirse (que irá en relación directa con el tiempo y recursos necesarios para que el computador resuelva el modelo).

En este momento, la etapa de preprocesado está acabada y puede pasarse a la etapa denominada “proceso”. Aquí, deben determinarse las condiciones en que debe obtenerse la solución del problema de acuerdo con el diseño del modelo completado en la etapa de preproceso. En el caso de Comsol Multiphysics, existen diferentes solucionadores (“solvers”) a disposición del diseñador -dependientes del tiempo o estacionarios, paramétrico, o estacionario segregado, etc.- de cuya selección dependerá que las soluciones sean obtenidas y el modo en el que se obtuvieron.

Finalmente, se entra en la etapa de postproceso. El programa ha obtenido la solución del problema y puede seleccionarse la presentación de los diferentes resultados basados en esta solución y en relación con las físicas que se seleccionaron para el modelo.

3.4.2.3. Obtención del modelo físico y geométrico con el programa Comsol Multiphysics.

Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, se expone a continuación la metodología de cálculo particularizada para el modelo analizado en este estudio comparativo de fluidos dieléctricos para transformadores.

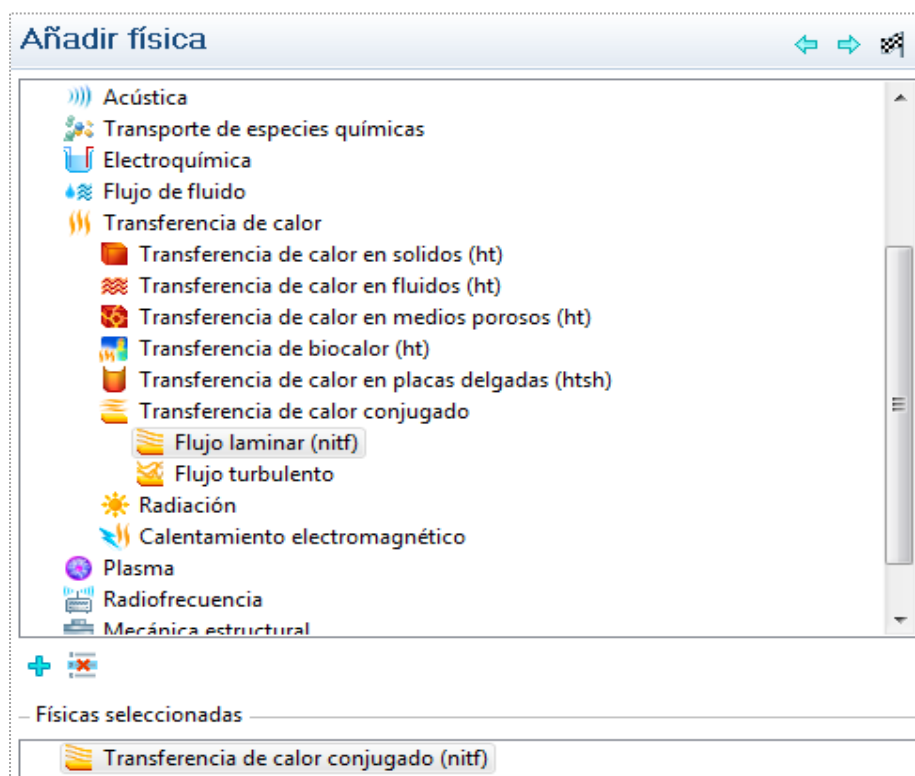


FIGURA 3.17 – Pantalla de elección de la física a estudiar.

En primer lugar, el preprocesado comienza con, una vez ejecutado el programa Comsol Multiphysics 4.2, la selección de los módulos que intervienen en el modelo estudiado y las dimensiones espaciales y temporales en lo que se definen dichos fenómenos físicos. La dimensión espacial elegida para este modelo en particular es “3D” ya que realizaremos un modelo geométrico empleando las tres magnitudes en el espacio y el módulo donde se aplicará es “Transferencia de calor/transferencia de calor conjugado/flujo laminar”. El motivo de esta elección, como se explico en este mismo capítulo en apartados anteriores, es que los mecanismos de transferencia de calor que

intervienen son dos, conducción y convección, y en ellos interaccionan dos aspectos, el movimiento del fluido en el interior del transformador y la transferencia de calor entre los distintos cuerpos: devanados, aislamiento sólido, fluido refrigerante, etc. Para concluir con la etapa de preproceso seleccionaremos la opción de “preprogramar estudios/estacionario”, ya que nuestro principal objetivo es obtener la temperatura que alcanza el transformador con los diferentes aceites refrigerantes cuando el transformador está trabajando en régimen estacionario.

Una vez abierta la ventana de trabajo, comenzaremos con la construcción de la geometría del transformador. En primer lugar debemos de generar un plano de trabajo, que actuará de base del transformador. En el dibujaremos planta del transformador, basándonos en las medidas reales del transformador de ABB (capitulo 1).

En este plano de trabajo iremos dibujando cada una de las partes del transformador. Recordamos que por razones de simplificación solo simularemos 15° de la totalidad del transformador, y solamente la parte de baja tensión.

En primer lugar dibujaremos los devanados (Ver Figura 3.18). Para ello realizaremos el siguiente proceso: se dibujan los círculos correspondientes con el máximo y mínimo radio de cada devanado, trazando únicamente porciones de 15°, y se realiza la diferencia o se restan, quedándonos la parte correspondiente al devanado. Se seguirá el mismo procedimiento para todos los devanados.

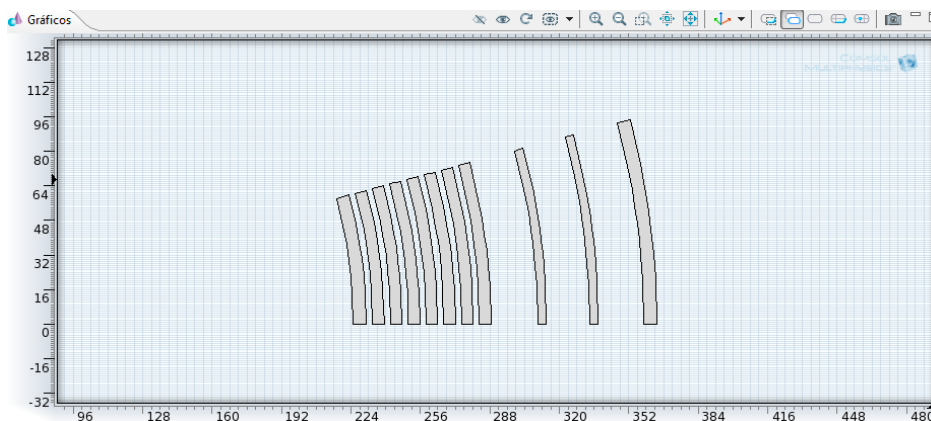


FIGURA 3.18 – Devanados y cartón aislante.

Los diferentes radios serán los que se muestran en la tabla 10:

Zonas	Radio mayor(mm)	Radio menor(mm)
Cartón BT	231	225
Capa 1	239,2	234
Capa 2	247,4	242,2
Capa 3	255,6	250,4
Capa 4	263,8	258,6
Capa 5	272	266,8
Capa 6	280,2	275
Capa 7	288,5	283,2
Cartón 1	314	310
Cartón 2	338	334
Cartón AT	365	359

Figura 3.19 – Radios de los devanados y el cartón aislante.

Para el modelado de los cartones aislantes se sigue el mismo proceso que para los devanados.

Para la construcción de las tiras separadoras, el método de trabajo será similar (Ver Figura 3.20). Se basará de nuevo en diferenciar varios elementos. Además en cada zona donde se sitúan las tiras aislantes se procederá de manera diferente: Para las tiras de la parte

inferior, las cuales tendrán 6 mm de ancho, (excepto las centrales que serán de 12 mm) y la distancia entre devanado y devanado de largo, consistirá en diferenciar un círculo cuyo radio se corresponde con el radio menor del devanado posterior, con otro círculo cuya radio se corresponderá con el mayor del devanado anterior y un rectángulo que elimine la parte sobrante, es decir, su esquina inferior de encuentre 6 mm por encima del eje de coordenadas. A través de la siguiente figura se muestra el método descrito. Diferenciando el círculo azul con el resto anteriormente mencionado, obtenemos la tira separadora, de color rojo. El proceso se repetiría para el resto de las tiras de la parte inferior.

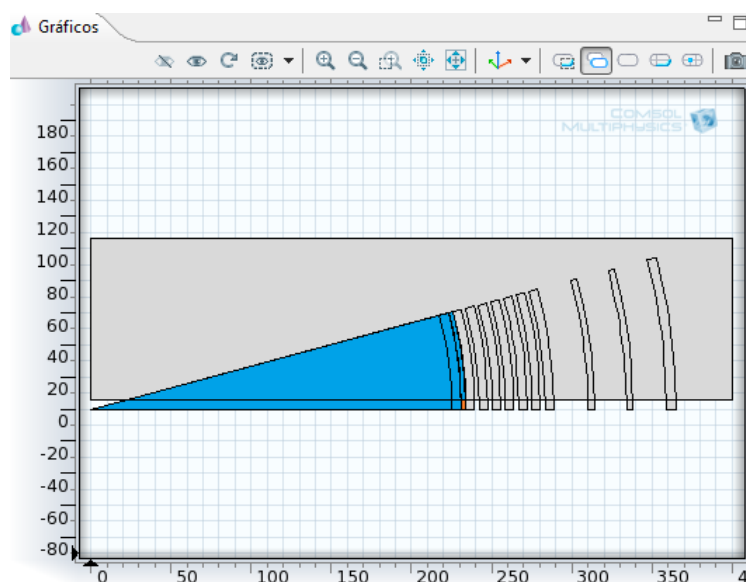


FIGURA 3.20 – Tiras aislantes inferiores.

Los radios siguientes serán los empleados como longitud en cada una de las tiras separadoras:

<i>Radio mayor (mm)</i>	<i>Radio menor (mm)</i>
359	338
334	314
310	290
283,2	280,2
275	272

266,8	263,8
258,6	255,6
250,4	247,4
242,2	239,2
234	231

Figura 3.21 – Radios tiras separadoras.

Para las tiras separadoras de la parte superior el proceso será similar, pero habrá que realizar antes un paso previo, consistente en girar -15° el modelo, haciendo coincidir esta parte superior con el eje (Ver Figura 29). Esto se realiza por la dificultad de encontrar las coordenadas exactas del rectángulo que nos ayudará a obtener la tira separadora. A partir de ahí el proceso es el mismo, con la salvedad de que en esta ocasión es la esquina superior izquierda la que debe estar situada 6 mm por debajo del eje de coordenadas.

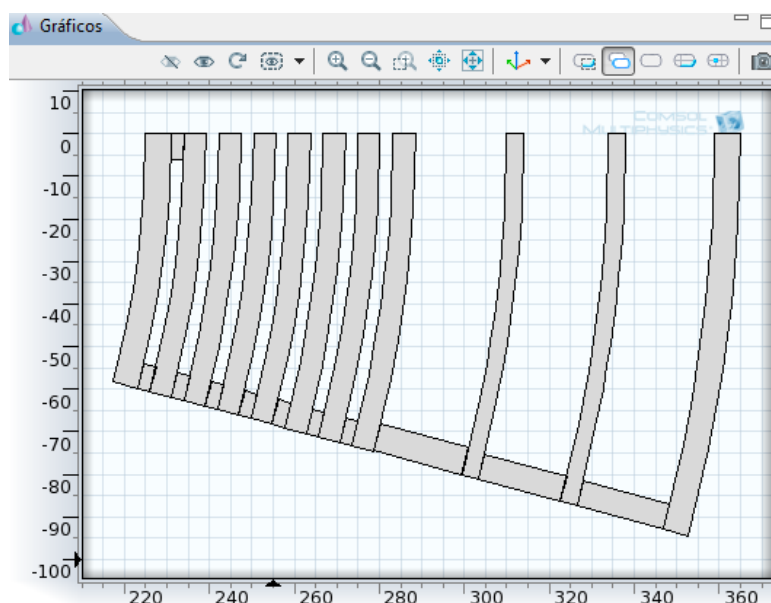


FIGURA 3.22 – Tiras separadoras superiores.

Las tiras situadas en la parte central tan solo aparecerán entre devanado y devanado. El proceso de trabajo varía ya que en lugar de diferenciar elementos, en esta ocasión nos quedaremos con la intersección entre figuras. También, como en el caso anterior, debemos de volver a girar el modelo, en este caso 7.5° (Ver Figura 30). Las dos

figuras a diferenciar serán por una parte, la misma corona circular que en las anteriores ocasiones, y por otro lado, un rectángulo cuya esquina inferior izquierda se situará 6 mm por debajo del eje actual, y tendrá una altura de 12 mm, correspondiente con la anchura de la tira separadora central.

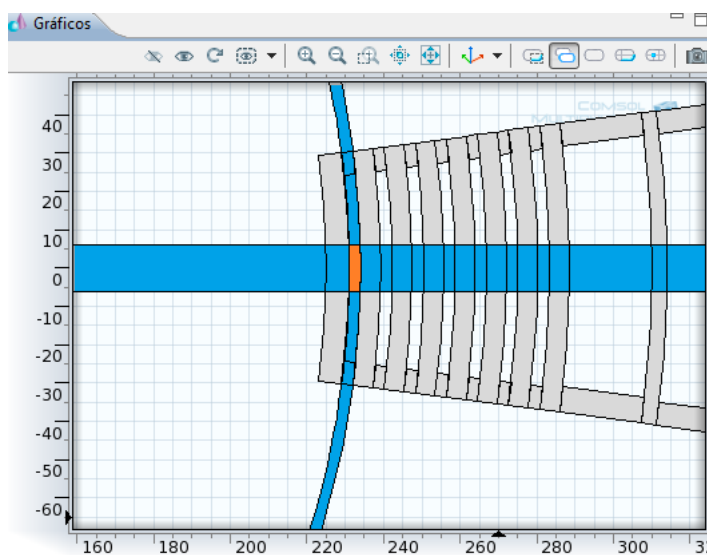


FIGURA 3.23 – Tiras separadoras intermedias.

A continuación, y para acabar con el plano de trabajo, debemos utilizar la operación convertir en sólido para que todo el conjunto forme un bloque, incluyendo los canales interiores de refrigeración (Ver Figura 3.24).

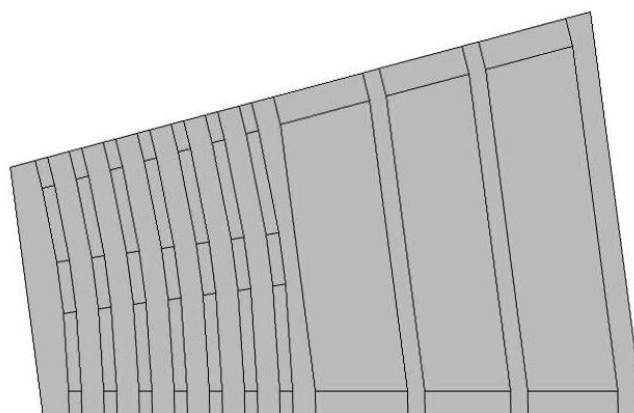


FIGURA 3.24 – Vista en planta de la simulación del transformador.

Para terminar con la geometría del modelo, tan solo falta extruir el plano del de trabajo donde se ha creado la planta del transformador hasta una altura de 1056 mm, altura que el transformador posee en la realidad (Ver Figura 3.25).



FIGURA 3.25 – Geometría completa del transformador.

Posteriormente al modelado de la geometría, se proporcionan al modelo los valores de las constantes y de las expresiones que deben actuar en todo el modelo. En este caso, debemos realizar dos modelos en los que la única variación son las propiedades de cada aceite, el aceite mineral 10GBN y el aceite de silicona Kf-96 (Ver Figuras 3.26, 3.27, 3.28 y 3.29). El resto de constantes serán idénticas en ambas simulaciones y son las siguientes:

- Para el aceite mineral:

Parámetros

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
T0	50[degC]	323.2 K	Temperatura fluido entrante
k_s	383[W/(m*K)]	383 W/(m-K)	Conductividad térmica del sólido
Q_s	447.05[W]	447.1 W	Fuente de calor
v0	60[mm/s]	0.06 m/s	Velocidad fluido entrante
k_paper	0.19[W/(m*K)]	0.19 W/(m-K)	Conductividad térmica del papel
rho_paper	930[kg/m^3]	930 kg/m ³	Densidad del papel
Cp_paper	1340[J/(kg*K)]	1340 J/(kg-K)	Calor específico del papel
k_AM	0.125[W/(m*K)]	0.125 W/(m-K)	Conductividad térmica del aceite mineral

FIGURA 3.26 – Constantes en el modelo de aceite mineral.

Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción
rho_AM	$(875.6 - 0.63 \cdot T2[1/\text{degC}])(\text{kg}/\text{m}^3)$	kg/m ³	Densidad del Aceite Mineral
Cp_AM	$(1960 + 4.0005 \cdot T2[1/\text{degC}])(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	J/(kg-K)	Calor Específico del Aceite Mineral
eta_AM	$\text{rho_AM} \cdot 10^{(-4.726 - 0.0091 \cdot T2[1/\text{degC}])}$	kg/(m-s)	Viscosidad dinámica del Aceite Mineral

FIGURA 3.27 – Variables en el modelo de aceite mineral.

- Para Los aceites de silicona:

Parámetros

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
T0	25[degC]	298.2 K	Temperatura fluido entrante
k_s	383[W/(m*K)]	383 W/(m-K)	Conductividad térmica del sólido
Q_s	447.05[W]	447.1 W	Fuente de calor
v0	5[mm/s]	0.005 m/s	Velocidad fluido entrante
k_paper	0.19[W/(m*K)]	0.19 W/(m-K)	Conductividad térmica del papel
rho_paper	930[kg/m^3]	930 kg/m ³	Densidad del papel
Cp_paper	1340[J/(kg*K)]	1340 J/(kg-K)	Calor específico del papel
k_DC	0.151 [W/(m*K)]	0.151 W/(m-K)	Conductividad termica DC561

FIGURA 3.28 – Constantes en el modelo de Dow Corning 561.

Variables

Nombre	Expresión	Unidad	Descripción
rho_DC	$(965.78 - 0.3363 \cdot T2[1/\text{degC}])(\text{kg}/\text{m}^3)$	kg/m ³	Densidad DC561
eta_DC	$(0.0852 \cdot \exp(-0.019 \cdot T2[1/\text{degC}]))(\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}))$	kg/(m-s)	viscosidad dinámica DC561
Cp_DC	$103.39 \cdot \log(T2[1/\text{degC}]) + 11...$	J/(kg-K)	Calor Específico del DC561

FIGURA 3.29 – Variables en el modelo del Dow Corning 561.

Una vez finalizada la entrada de constantes y variables para cada fluido, es aconsejable definir una serie de dominios y contornos, los cuales nos faciliten la selección rápida de una de las zonas del transformador sin tener la necesidad de ir seleccionando cada elemento una a uno. En el caso del transformador empleado en este estudio se han seleccionado los siguientes:

- Dominios:

Cobre, cartón y fluido, dividiéndose este a su vez en fluido refrigerante (cercano a los devanados de cobre) y fluido dieléctrico.

- Contornos:

Como contornos se ha definido la entrada de aceite al transformador y la salida de este.

El siguiente paso consiste en definir los materiales empleados. En este caso el transformador estará formado por tres materiales diferentes: cobre para los devanados, cuyas propiedades están incorporadas en la biblioteca que posee el propio programa, el cartón aislante, cuyas características están definidas en los parámetros y el fluido, bien el aceite mineral o el aceite de silicona, cuyas características vienen definidas también en las variables y en las constantes.

A continuación se deben definir los parámetros que van a dar lugar al estudio fluido-térmico. Como punto de partida definiremos la fuente de calor. En este caso serán los devanados de cobre los que generan la fuente térmica. Se debe concretar también cual será el fluido dentro del estudio, indicando su temperatura de entrada y su velocidad. Por último se marcará cual será la zona de salida de dicho fluido.

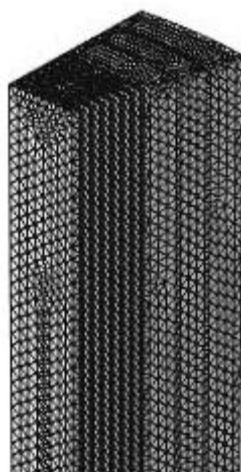


FIGURA 3.30 – Geometría mallada.

Finalizadas todas las tareas de diseño del modelo geométrico y físico, como paso previo a la resolución del problema, el programa necesita la discretización del modelo en elementos más pequeños. Este paso se lleva a cabo mediante la opción mallar que podemos encontrar en el menú de herramientas del programa. Para mayor precisión de los resultados, se puede “refinar la malla”, dividiendo la figura en elementos más pequeños. En nuestro caso hemos diferenciado el mallado en dos partes, el mallado del transformador y el mallado del fluido, obteniendo un total de 592.469 elementos (Ver Figura 3.30).

De esta manera, el modelo ha quedado perfectamente definido y la etapa de preprocesado queda concluida. En este caso para el análisis de flujos convectivos forzados, el solucionador recomendado en la bibliografía del programa, dentro de los disponibles en Comsol®, es “solucionador estacionario segregado”.

Tras un tiempo de cálculo, el modelo es resuelto y comienza la fase de postprocesado, donde analizaremos el fenómeno de la refrigeración en el transformador a partir de los resultados que este software nos permite presentar en pantalla.

Capítulo 4.

Conclusiones.

4.1. Introducción.

Finalmente, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras la simulación cuyo planteamiento y ejecución ha sido explicado en el capítulo anterior. Asimismo se presentan las conclusiones que en materia de transferencia de calor y dinámica de fluidos se ha llegado.

Los resultados mostrados tratan de analizar y comparar la refrigeración conseguida, a través del análisis de la interacción fluido-térmica que se ha obtenido mediante la simulación con Comsol del modelo considerado y caracterizar los fluidos desde el punto de vista térmico y dinámico como se explicó en el capítulo anterior. Por tanto, la presentación de resultados se centra en las distribuciones de temperaturas y de velocidades para dichos líquidos comparándolos con el aceite mineral 10GBN y la comparación mas en profundidad de los aceites de silicona Dow Corning 561, Bluesil 604V50 y KF-96-20.

Tras realizar un primer estudio con la velocidad de entrada de 5 mm/s –régimen de refrigeración ONAN-, y como consecuencia de él, se ha procedido a realizar un segundo estudio donde se ha supuesto refrigeración forzada (OFAN)-

4.2. Resultados de las temperaturas.

La interpretación más directa del funcionamiento de la refrigeración puede apreciarse en la distribución de temperaturas; por ello, la presentación de resultados comienza con ella.

La figura 4.1 muestra un gráfico de colores con el perfil de temperaturas en los líquidos dieléctricos. En esta primera figura puede llevarse a cabo un preanálisis de las temperaturas para dichos líquidos ensayados, ya que se presentan los valores máximos, mínimos e intermedios mediante una escala de colores, y su distribución entorno a los devanados.

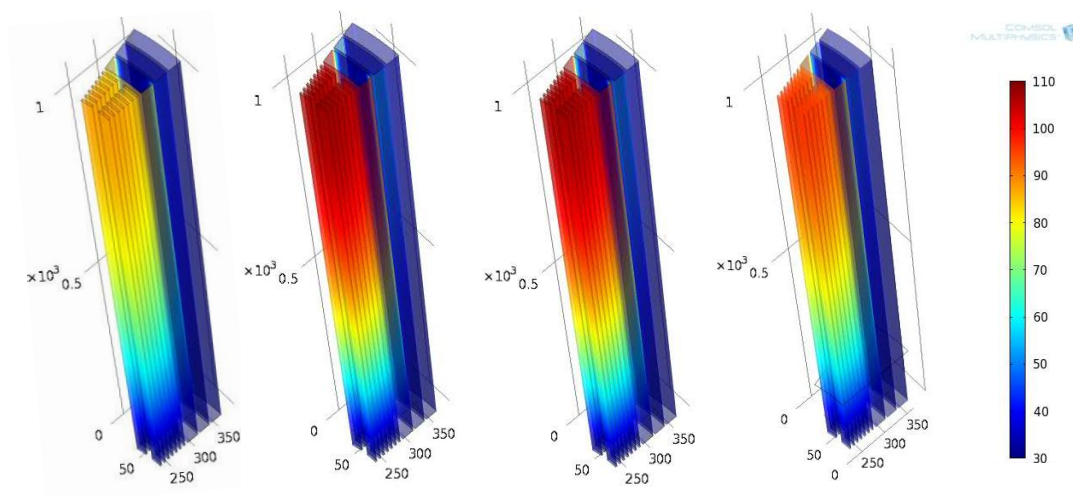


Figura 4.1a
aceite mineral
10GBN
87.78°C

Figura 4.1c
Bluesil 604V50
107.08°C

Figura 4.1b
Dow Corning 561
107.55°C

Figura 4.1d
KF-96-20
96.12°C

Tmáx.

Figura 4.1. Temperaturas conseguidas en los líquidos refrigerantes.

Primero de todo, es necesario recordar que se considera una producción de calor constante y del mismo valor en todos los bloques, lo cual idealiza el comportamiento de los devanados.

A primera vista, en la Figura 4.1, se observa una distribución de temperaturas isotérmica con la altura en la dirección radial en todas las capas del devanado estudiado. Se calientan prácticamente por igual desde el interior hacia el exterior. En el caso del aceite mineral alcanza menores temperaturas, seguido del aceite de silicona de baja viscosidad KF-96-20, cuyo máximo no llega a superar los 100°C. Para el caso de los aceites Dow Corning y Bluesil, ambos superan los 105°C, lo cual sobrepasa el límite de aislamientos de clase A para materiales fibrosos a base de celulosa o seda impregnados en líquidos aislantes.

Con el objeto de corroborar esta primera aseveración para los aceites de silicona, vamos presentar las temperaturas obtenidas en diferentes alturas a lo largo del radio del transformador tanto en canales verticales como en separadores formados por papel. Para ello, se han trazado unos cortes lineales respecto del centro del transformador formando radios, que pasan por el punto medio de dichos canales y separadores, y unos planos horizontales cortantes junto con las líneas

que nos darán los máximos de temperatura alcanzados para determinadas alturas como se explica en la Figura 4.2.

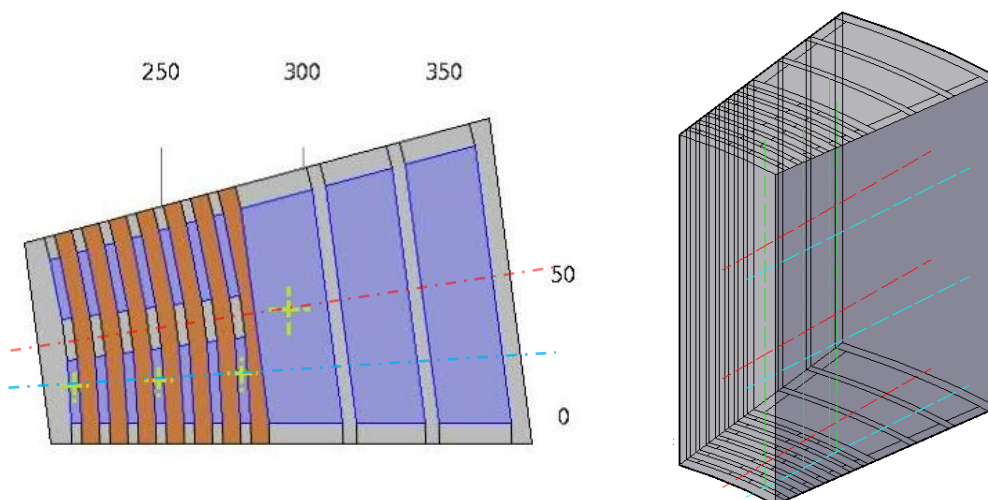


Figura 4.2a. Planta del transformador

Figura 4.2b. Vista del transformador

Figura 4.2. Líneas de corte en diferentes planos del transformador.

La Figura 4.3 muestra la evolución de las temperaturas con la altura en los conductos verticales. Se aprecia que, en todos los casos, para más de 500mm de altura, el incremento de temperatura es pequeño en comparación con la mitad inferior. Además, se observa que el octavo conducto, el mas alejado, el incremento de la temperatura con la altura es muy pequeño, debido a la separación existente entre la recta utilizada como toma de datos y la séptima capa conductora y generadora de calor.

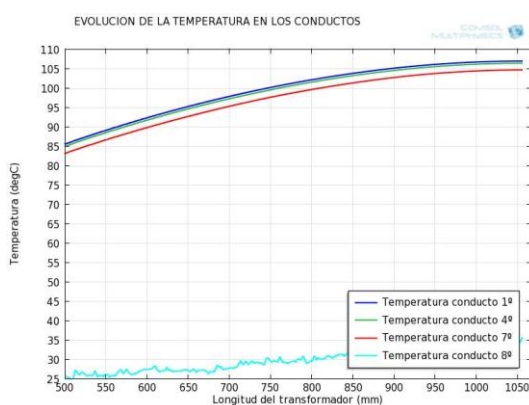


Figura 4.3a. Bluesil 604V50

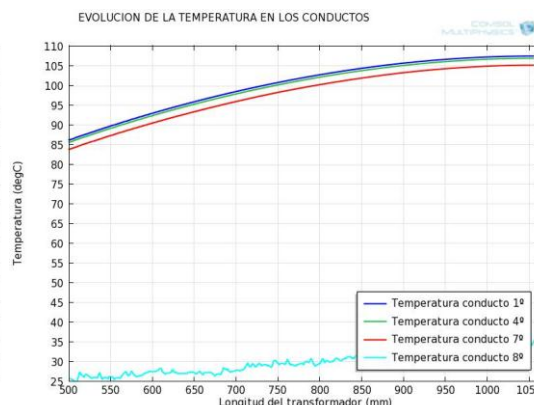


Figura 4.3b. Dow Corning 561

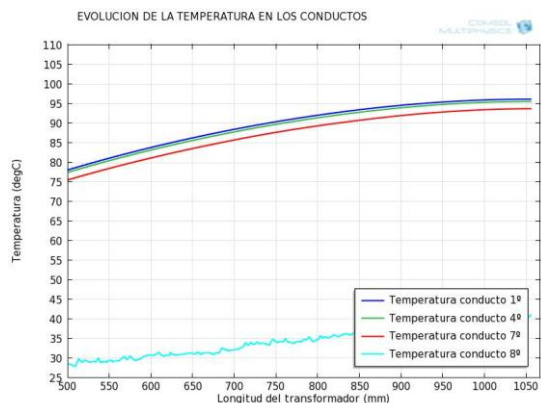


Figura 4.3c. KF-96-20

Figura 4.3. Evolucion de la temperatura en los conductos

La Figura 4.4 nos muestra temperaturas radiales en los conductores de cobre y en los separadores para diferentes alturas. Como se aprecia, es prácticamente isotérmico a lo largo del devanado, cayendo considerablemente en el octavo conductor, el cual como ya se ha comentado, tiene como finalidad primordial hacer de dieléctrico mas que de refrigerante.

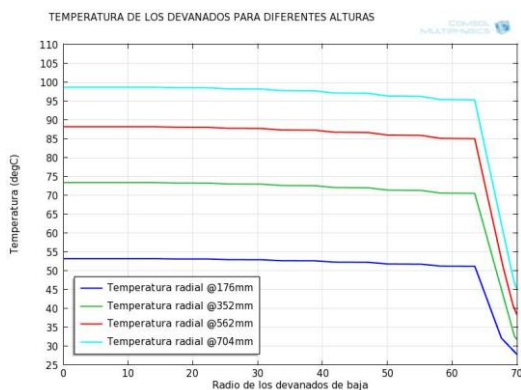


Figura 4.4a. Bluesil 604V50

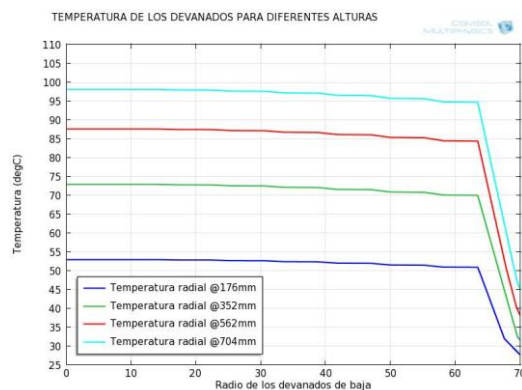


Figura 4.4b Dow Corning 561

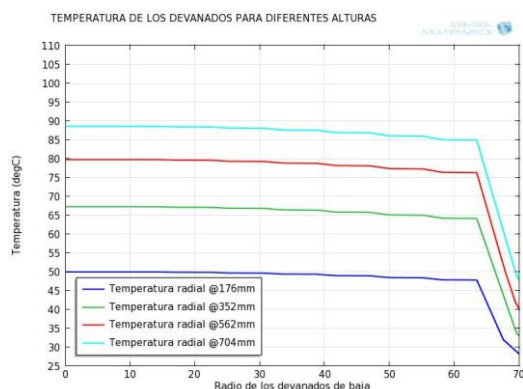


Figura 4.4c. KF-96-20

Figura 4.4. Temperaturas en devanados y partes solidas para diferentes alturas.

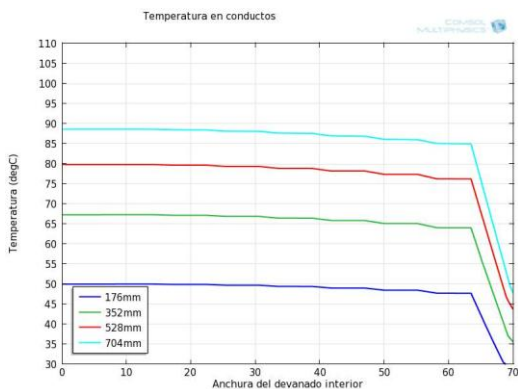


Figura 4.5a. Bluesil 604V50

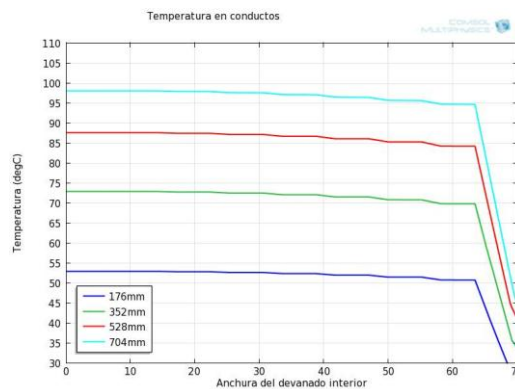


Figura 4.5b. Dow Corning 561

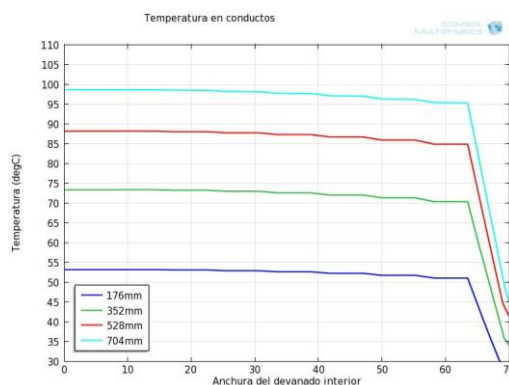


Figura 4.5c. KF-96-20

Figura 4.4. Temperaturas para devanados y canales verticales para diferentes alturas.

Para evaluar ahora la posible diferencia entre el conductor de cobre y los huecos por donde fluye el refrigerante, trazamos nuevamente una línea cortante (como se indica en la Figura 4.2) que atraviese los conductos verticales a diferentes alturas similar a la anterior. En ella, se aprecia que para las mismas alturas, la temperatura en canales verticales y separadores de celulosa nuevamente permanecen prácticamente constantes a lo largo del ancho de los devanados.

Si se comparan las figuras 4.3 y 4.4, puede deducirse que el estancamiento del líquido hace que tenga un comportamiento térmico prácticamente igual que la parte sólida del transformador, calentándose líquido y sólido por igual, lo cual explica el comportamiento isotérmico en dirección radial a diferentes capas, tal como se comenta al principio del capítulo.

En la Figura 4.6 se hace una evolución y comparación de temperaturas máximas obtenidas frente a la altura para los tres líquidos refrigerantes.

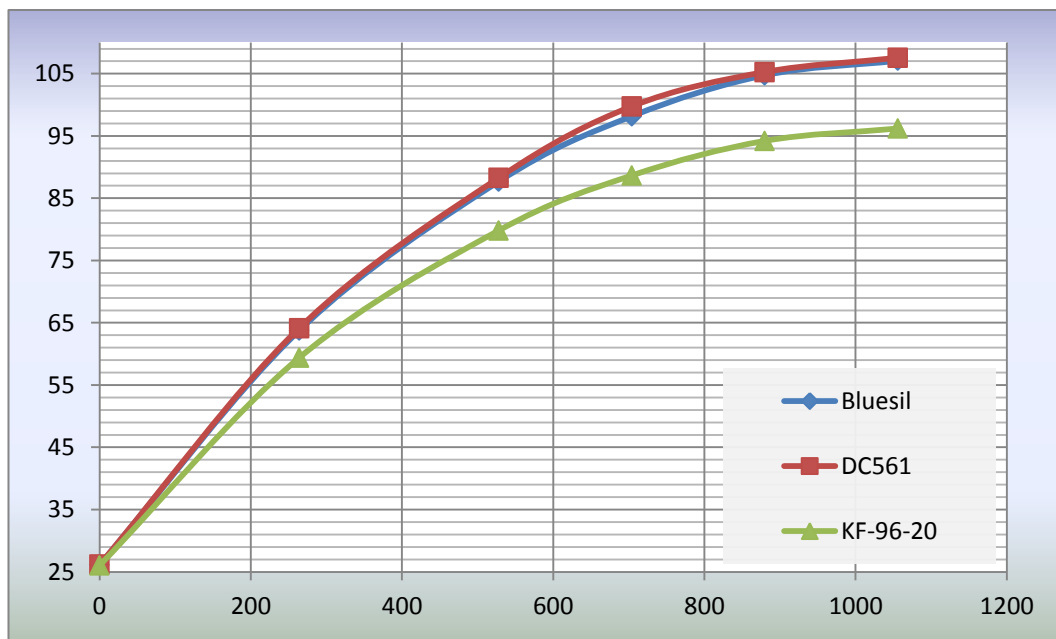


Figura 4.6. Comparación de los máximos de temperatura alcanzados entre los aceites de silicona.

Se ha determinado matemáticamente la evolución de la temperatura con la altura. Esto nos va permitir determinar mediante extrapolación las temperaturas en devanados iguales pero de mayor altura.

- Temperatura para el Dow Corning 561:
 - Temperatura: $T = -8E-05x^2 + 0,1591x + 26,599$
 - Factor de correlación: $R^2 = 0,9996$
- Temperatura para el Bluesil 604V50:
 - Temperatura $T = -8E-05x^2 + 0,1559x + 26,707$
 - Factor de correlación: $R^2 = 0,9995$
- Temperatura para el KF-96-20:
 - Temperatura: $T = -7E-05x^2 + 0,1366x + 26,676$
 - Factor de correlación: $R^2 = 0,9991$

Donde x es la altura en mm del transformador

4.3. Resultados de las velocidades.

La segunda parte del análisis presenta los resultados sobre las velocidades del fluido en toda la geometría del modelo. Como ya se ha comentado en el apartado de las temperaturas, las velocidades del fluido, esto es, los flujos de fluido recorriendo los canales verticales entre los devanados están en íntima relación con las temperaturas, y a su vez, con la refrigeración de los devanados que los fluidos están consiguiendo.

Al igual que en el estudio de temperaturas, se parte del gráfico con la escala de colores que proporciona una primera interpretación de las velocidades de ambos líquidos respecto al eje z.

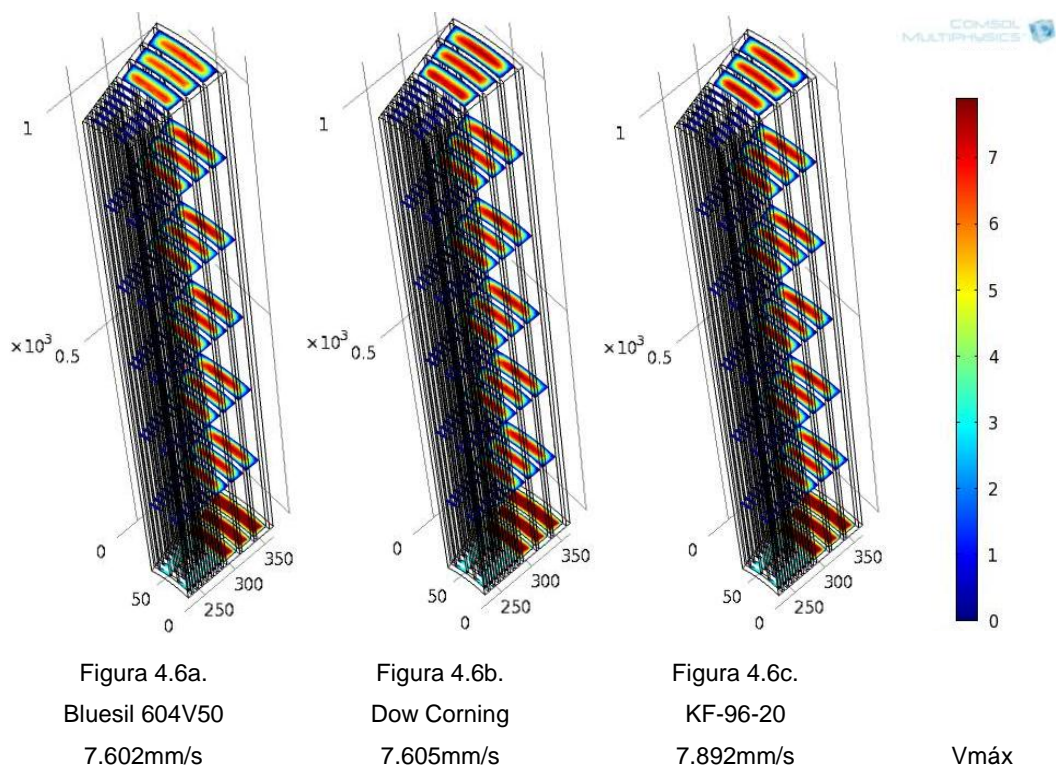


Figura 4.7. Velocidades conseguidas en los diferentes aceites de silicona.

La Figura 4.7 muestra el campo de velocidades, en mm/s, a diferentes alturas del modelo. Un primer análisis permite observar que los valores máximos de velocidad alcanzada se sitúan en los canales exteriores, que son más amplios, siendo la velocidad del fluido en los canales verticales que separan las capas conductoras prácticamente nula. La gran viscosidad de los líquidos alternativos no permite su flujo por

canales tan estrechos con una velocidad de entrada tan pequeña. Por ello, se ha procedido a realizar una segunda simulación con una mayor velocidad de entrada con el mejor líquido dieléctrico –el KF-96-20, que alcanza las menores temperaturas máximas y las mayores velocidades de los tres líquidos alternativos-, lo cual simula un régimen de refrigeración forzado (OFAN).

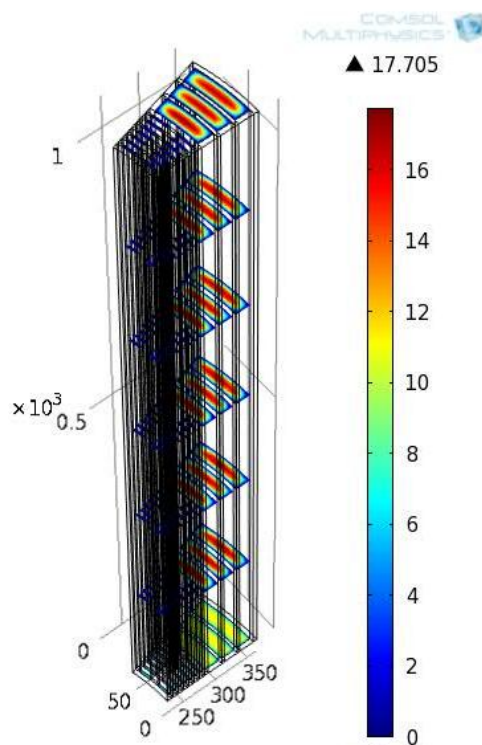


Figura 4.8. Velocidades del KF-96-20 para una velocidad de entrada de 10mm/s

En la Figura 4.8 se vuelve a analizar con una nueva simulación las velocidades alcanzadas por el líquido en el interior del conducto. En ella se observa que de nuevo la velocidad en los canales mas amplios se eleva, mientras que en los conductos mas estrechos vuelve a estancarse hasta ser prácticamente nula.

Por otra parte, tampoco solventa los problemas de temperatura, quedando por encima de la temperatura de diseño (65°C), por lo que se opta por dar una velocidad mayor, realizando un barrido paramétrico entre 10 y 15 mm/s para determinar el correcto funcionamiento del transformador, como podemos ver en la Figura 4.9.

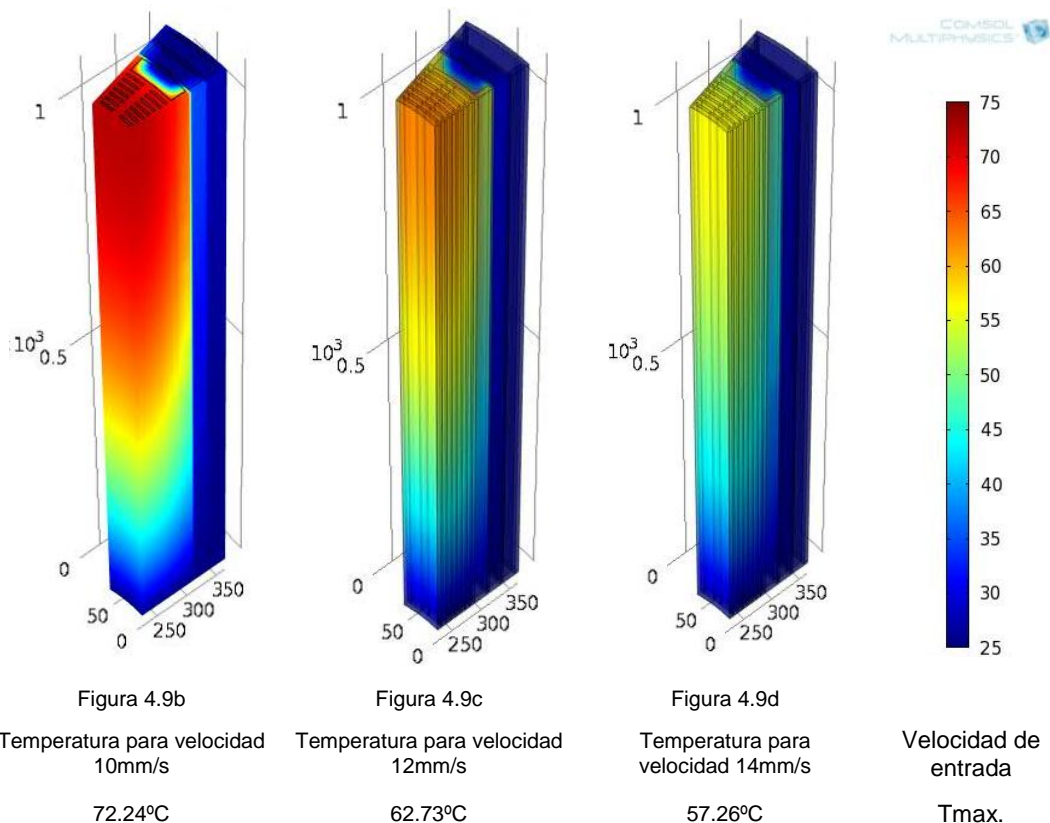


Figura 4.9. Temperaturas máximas alcanzadas por el KF-96-20 a diferentes velocidades forzadas.

4.4. Cálculo del número de Prandtl.

Como dijimos en el capítulo anterior (apartado 3.4.1.) el número de Prandtl compara las anchuras de ambas capas, térmica y de velocidades. Según Heat Transfer de Cengel Y.A. [17], el rango del número de Prandtl sugerido para aceites oscila entre 50 y 100,000.

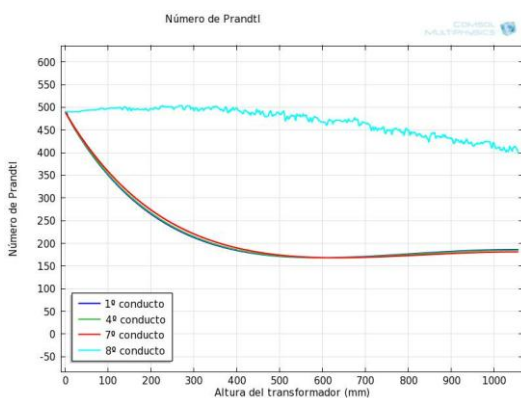


Figura 4.9a. Bluesil 604V50

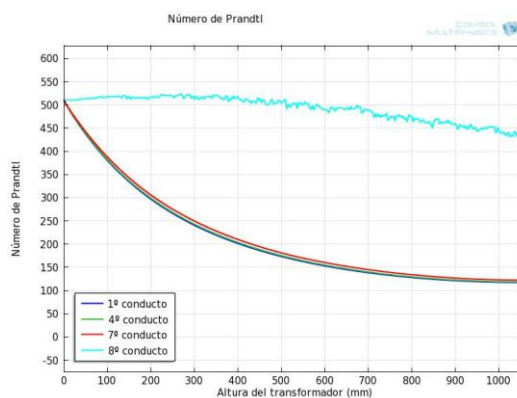


Figura 4.9b. Dow Corning 561

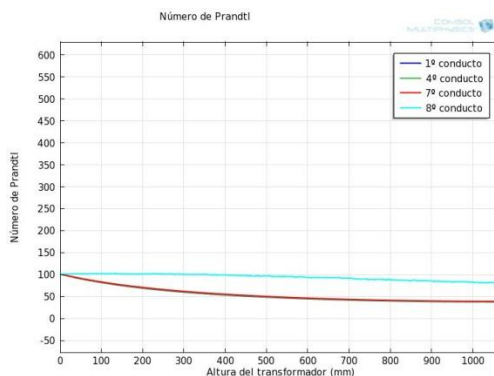


Figura 4.9c. KF-96-20

Figura 4.9. Numero de Prandtl para los aceites de silicona estudiados.

Por tanto, de la Figura 4.9, podemos sacar la conclusión de que para los aceites Bluesil y Dow Corning la temperatura aumenta rápidamente con la altura en detrimento de la velocidad, siendo este cociente mucho mas constante para el KF-96-20, el cual como ya se ha mostrado en las simulaciones, además de tener una menor evolución de temperatura respecto a la altura, consigue una velocidad mas alta.

4.5. Conclusiones del estudio.

De lo estudiado hasta ahora se puede concluir:

1. Los aceites analizados trabajan con temperaturas cercanas a las temperaturas máximas permitidas para los aislantes de papel, siendo en los casos particulares del Bluesil 604V50 y del Dow Corning 561 una temperatura superior a la aceptada según la normativa UNE-EN 62114, 60085 y 60034-1, que establece una temperatura máxima para los aislantes de clase térmica A de 105° C, entre los que se encuentran los papeles sumergidos en aceite. Asimismo, la norma UNE-EN 60034-1 fija un margen de seguridad de temperaturas de entre 5-15° C por debajo de lo establecido en la clase del aislante, por lo que el tercer líquido dieléctrico –KF-96-20- cumple con la mencionada norma.
2. Los aceites de silicona, que en un principio vienen a sustituir, tienen peor capacidad refrigerante que el aceite mineral. Dentro de

estos aceites de silicona, el KF-96-20 tiene mejores cualidades de refrigeración.

3. Para bajas velocidades de entrada, la alta viscosidad de los aceites de silicona, impide su flujo, lo que conlleva a una mala refrigeración debido al estancamiento del fluido.
4. Se requiere convertir el sistema de refrigeración del transformador de ONAN a OFAN para que el transformador trabaje con el nuevo aceite a temperaturas inferiores a la diseño, siendo esta, como mínimo, de 12mm/s.
5. Pese a aumentar la velocidad de entrada del fluido (conversión de la refrigeración de ONAN a OFAN), el flujo de éste en los canales más estrechos apenas se ve modificado. La razón de ello es su elevada viscosidad. Así pues, esta geometría no permitiría la sustitución del aceite mineral por un aceite de silicona.
6. Por último, indicar que este proyecto es el embrión de un estudio más amplio y detallado acerca del uso de aceites alternativos en la refrigeración y aislamiento de transformadores de potencia. Dicho futuro estudio requerirá de un mayor número de simulaciones, del análisis de otros líquidos, del ensayo de éstos en laboratorio para la determinación experimental de sus propiedades físico-químicas, de la construcción de prototipos que permitan comparar las simulaciones con la realidad, etc.

Capítulo 5. Referencias bibliográficas.

5.1 Bibliografía citada en el proyecto

- [1] Electric power transformer engineering. James H. Harlow
- [2] Delgado, F.; Ortiz, A.; Fernández, I.; Arroyo, A.; Mañana, M. “Sustitución del aceite mineral por líquidos alternativos en transformadores”.
- [3] Delgado, F.; Ortiz, A.; Fernández, I.; Renedo, C.J.; Pérez, S. “Evaluación del rendimiento de los líquidos dieléctricos alternativos para transformadores”
- [4] Tenbohlen S, Baum J, M. Schäfer M, et al. "Application of vegetable oil-based insulating fluids to hermetically sealed power transformers". CIGRÉ A2-102, 2008
- [5] Shirasaka Y. “Low fire risks transformer fluids – silicone based fluids and SF6 gas”. CIGRE Australian panel A2, session 4, Sydney, 2008
- [6] J.-M. Mufuta and E. van Den Bulck, “Modeling of mixed convection in the windings of a disc-type power transformer,” Applied Thermal Engineering, vol. 20, pp. 417–437, 2000
- [7] Dow Corning® 561 Silicone Transformer Liquid Technical Manual data. 2006
- [8] Bluestar Silicones’ Oils 47 Technical information data. 2011
- [9] Shin Etsu Silicone – Silicone Fluid-KF-96 Performance Test Results-Technical data. 2004.9/2011 B.P.
- [10] Nynas Transformer Oil - Nytro 10GBN. Naphthenics Product Data Sheet 99-03-08
- [11] SEEDT: Selecting energy efficient distribution transformers. A guide for achieving least-cost solutions, Polish Copper Promotion Centre and European Copper, Institute, 2008

[12] J.-M. Mufuta and E. van Den Bulck, "Modeling of mixed convection in the windings of a disc-type power transformer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, pp. 417–437, 2000

[13] COMSOL Multiphysics User's Guide

[14] Fraile Mora, J. "Máquinas eléctricas" Ed. McGraw Hill.

[15] Borsi, H. "Dielectric behavior of silicone and ester fluids for use in distribution transformers" IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society. Agosto 2002

[16] ASTM D2300 "Standard Test Method for Gassing of Electrical Insulating Liquids Under Electrical Stress and Ionization (Modified Pirelli Method)", ASTM International

[17] Cengel, Y.A "Heat transfer. A practical approach" Ed. McGraw Hill.

[18] Mataix. C. "Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas" Ed. El Castillo