

CARACTERIZACIÓN FLUIDO-TÉRMICA DE LÍQUIDOS ALTERNATIVOS EN UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA CON REFRIGERACIÓN ZIG-ZAG

SANTISTEBAN DIAZ, Agustín; DELGADO SAN ROMÁN, Fernando; CARCEDO HAYA, Juan;
RENEDO ESTÉBANEZ, Carlos J.; FERNANDEZ DIEGO, Inmaculada
ORTIZFERNANDEZ, Félix; FERNANDEZ DIEGO, Cristina

juan.carcedo@unican.es

Universidad de Cantabria

E.T.S. Ingenieros Industriales y de Telecomunicación

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

RESUMEN

El presente trabajo consiste en un estudio numérico de la capacidad de refrigeración de aceites dieléctricos en transformadores de potencia mediante una simulación basada en elementos finitos, con el objetivo de determinar las distribuciones de temperaturas y velocidades y los puntos de máxima temperatura (hot spots) en el interior de una sección 3D del devanado de baja tensión de un transformador de potencia.

Para ello se utiliza la herramienta informática COMSOL ® mediante la cual se simula una determinada geometría de transformador formada por discos de cobre y canales verticales y horizontales por los que pasa el fluido refrigerante, dispuestos de tal forma que el paso del fluido se realice en zig – zag.

Los resultados de la simulación permiten determinar las características del flujo a partir del número de Reynolds, la ubicación y magnitud de los puntos calientes, las velocidades medias de paso del flujo o la distribución de temperaturas del refrigerante, en función del fluido utilizado. En este caso se han realizado simulaciones para cuatro refrigerantes: un aceite mineral tradicional y otros tres que actualmente están siendo utilizados como sustitutos: aceite de silicona, éster natural y éster sintético.

Palabras clave: Aceites dieléctricos, transformador, simulación.

1. Introducción

El fluido refrigerante por excelencia en los transformadores de potencia es el aceite mineral derivado del petróleo, debido a sus buenas propiedades como refrigerante [1]. Sin embargo el empleo de aceite mineral conlleva riesgos a la seguridad debido a su baja temperatura de inflamación e ignición, llegándose a dar el caso de incendios en transformadores de potencia. Además estos aceites son complicados de eliminar y al ser derivados del petróleo producen un gran impacto ambiental.

Debido a sus ventajas medioambientales y contra incendios, la familia de los fluidos alternativos (ésteres naturales y sintéticos y aceites de silicona) desempeñará un papel cada vez más importante en los transformadores eléctricos del futuro como parte de esas redes.

La experiencia práctica y de laboratorio de los últimos años, en la cual se han utilizado estos aceites sin mayores problemas en transformadores de distribución, ha demostrado que su uso en este tipo de transformadores es absolutamente viable desde el punto de vista técnico.

Los líquidos alternativos al aceite mineral, a los que se dedica mayor desarrollo y analizados en este estudio son: ésteres naturales, ésteres sintéticos y aceites de silicona.

En el caso de los ésteres naturales, con los que se consideró trabajar como fluido dieléctrico desde la invención de los transformadores bañados en aceite a finales de 1880, su escasa disponibilidad y las incompatibilidades con los equipos de respiración libre (debido a su inestabilidad química) los reemplazó gradualmente por los aceites minerales.

Por lo que respecta a los ésteres sintéticos, han sido utilizados con éxito durante los últimos cuarenta años y continúan creciendo en popularidad. Principalmente usados en distribución y en transformadores donde la seguridad contra incendios y la protección medioambiental son una preocupación primordial. Se prueba cada vez más su uso en sustitución del aceite mineral en transformadores ya operativos en casos de transformadores de potencia y de tracción con exigentes condiciones de operación.

En cuanto al aceite de silicona, se utiliza desde los 70 en sustitución de aceites con PCBs. Al igual que los ésteres sintéticos, al ser un fluido altamente estable y resistente al fuego se usa en aplicaciones donde la seguridad contra incendios es un requisito imprescindible. Debido también a estas características se utiliza también en transformadores de tracción y compactos, ya que ambos suelen operar con temperaturas elevadas y también en casos como transformador de distribución. Por contra, su uso es cuestionable desde punto de vista medioambiental.

2. Objetivos

El presente trabajo consiste en el análisis térmico e hidráulico de varios aceites biodegradables empleados como fluidos refrigerantes en transformadores de potencia. El estudio está orientado a la sustitución del aceite mineral, que es el utilizado actualmente, por estos aceites biodegradables alternativos, por el hecho que suponen una alternativa al empleo del aceite mineral con el consecuente aumento de la seguridad y mejora del impacto medioambiental que se expondrá más adelante en este documento.

El objetivo de este estudio consiste en determinar las temperaturas y velocidades obtenidas en un transformador con una geometría determinada, cuyas características se definen en el siguiente apartado, empleando como fluido refrigerante varios de los líquidos alternativos citados, con el fin de determinar, mediante una comparación de los resultados obtenidos con cada uno de los aceites empleados, cuál todos ellos es el más indicado para la sustitución del aceite mineral y globalmente determinar qué propiedades ha de tener un aceite para emplearse en la refrigeración de este transformador en concreto. La misma metodología puede aplicarse a cualquier tipo de transformador sin más que redefinir el modelo geométrico [2, 3]

Para establecer una comparación entre todos los aceites refrigerantes se tomará como referencia las temperaturas y velocidades obtenidas en el mismo transformador refrigerado con aceite mineral.

Para realizar este análisis se empleará un software de elementos finitos de modo que se resuelve computacionalmente el problema, empleándose para ello el método de la dinámica de fluidos computacional (CFD). Para ello, en primer lugar se realiza el modelo 3D de una geometría de transformador en concreto. Posteriormente se lleva a cabo la simulación del proceso termofluidodinámico que tiene lugar durante el funcionamiento del transformador bajo diferentes hipótesis, como la utilización de uno u otro aceite refrigerante. Finalmente se realiza un análisis de los resultados obtenidos.

3. Método de trabajo

3.1. Características del transformador analizado

El método de análisis elegido para la resolución del problema es el método de elementos finitos, aplicado a la dinámica de fluidos. Este método se basa en la resolución iterativa de las ecuaciones diferenciales que rigen el problema en los elementos discretos que conforman el modelo basado en la geometría real.

El transformador analizado en el estudio se trata de un transformador trifásico con el núcleo en columnas, donde la disposición de los devanados es un apilamiento vertical de discos, situándose los devanados de alta y baja tensión de forma concéntrica alrededor del núcleo, siendo el devanado de baja tensión el que ocupa la posición interior. El conjunto de los devanados tiene forma vertical cilíndrica, estando encerrado en una cuba, siendo esta configuración una de las más comunes en transformadores de potencia.

Debido a la geometría cilíndrica de los devanados se puede simplificar la geometría del modelo debido a que presenta simetría axial. Por ello el transformador se compone de 18 porciones de 20 grados cada una, admitiéndose que el comportamiento en cada una de estas porciones es igual que en las demás y que por ello no tienen influencia en las porciones adyacentes. Cada una de estas porciones tiene un plano de simetría en su mitad, con lo que el modelo considera una porción de 10 grados del transformador aplicando condiciones de simetría en los contornos pertenecientes al plano medio de simetría. Analizando la porción de 10 grados del transformador se obtiene información suficiente para conocer el comportamiento de una porción del transformador y aplicar lo obtenido al resto del transformador. Además se ha idealizado que todos los devanados llevan asignado un mismo valor de producción de calor.

El análisis se centra en el devanado de baja tensión, ya que es por el que circula mayor intensidad, lo que supone mayores pérdidas por efecto Joule y mayores temperaturas. El devanado de baja tensión consta de 78 discos apilados de forma vertical y delimitados por 18 listones de madera con separadores y otros 18 listones sin ellos, haciendo un total de 36 listones, repitiéndose la misma configuración de listones tanto en la parte interior como en la exterior. Los separadores se sitúan con el fin de separar dos discos contiguos para cada uno de los 78 discos. Los discos se dividen en cuatro pasos, cada uno de ellos consta de 19 discos a excepción del primero que consta de 21 y que se muestra en la Figura 1.

Como se observa en la Figura 1, cada paso está formado por 19 discos y 20 conductos horizontales. El fluido entra por uno de los canales verticales, dependiendo del paso, y sale por el otro, siendo el canal de entrada y salida diferentes recorriendo los canales horizontales en el camino.

Como se ha comentado previamente los conductos verticales interiores están delimitados por una serie de 36 listones de madera equidistantes y pegados al interior del cilindro, cuya sección transversal es rectangular (8,9x15 mm). Por lo tanto el canal interior tiene una longitud de 8,9 mm y una anchura o longitud de arco de aproximadamente 40 mm. Del mismo modo los conductos verticales exteriores están delimitados por una serie de listones de madera de sección rectangular (6,4x15 mm) siendo así la longitud de los conductos de 6,4 mm y una longitud de arco de aproximadamente de 50 mm.

Los separadores tienen una anchura de 28 mm y una altura de 4,1 mm, lo que implica que los conductos horizontales tienen una altura de 4,1 mm. Además en los separadores van insertados los 18

listones de madera que llevan separador, también denominados sticks. Los discos están compuestos por 18 conductores de cobre de sección transversal de 2,1x14,3 mm, envueltos con papel aislante de espesor de 0,4 mm para una altura total del bobinado de 1511 mm. Cada paso se separa del siguiente con tapas de cartón de 1 mm de espesor que obligan al fluido a salir por el canal vertical que le corresponde.

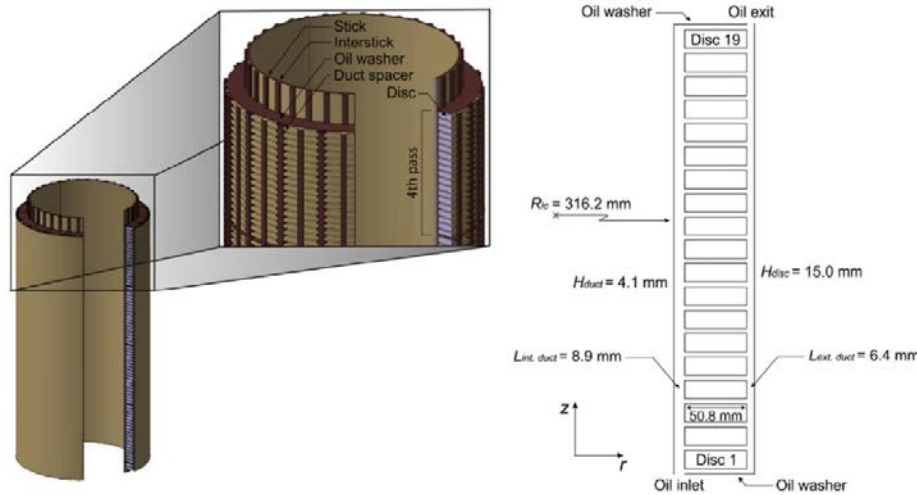


Figura 1: Esquema del transformador.

Las características eléctricas del transformador utilizado en el análisis vienen recogidas en la Tabla 1.

Tabla 1: Características eléctricas del transformador.

Característica	Valor
Potencia nominal	66 MVA
Tensión primario	225 KV
Tensión secundario	26,4 KV
Intensidad primario ($\cos\phi = 0,9$)	188,2 A
Intensidad secundario ($\cos\phi = 0,9$)	1604 A
Tipo de conexión	YNd1
Tipo de refrigeración	ONAN/ONAF (KNAN/KNAF)

3.2. Características de los aceites empleados

Los diferentes aceites empleados en el estudio son un aceite mineral, para establecer la referencia, un éster natural (Biotemp ®), un éster sintético (Midel 7131 ®) y un aceite de silicona (kf-96 ®). En la Figura 2 se muestran algunas de las propiedades de estos aceites que caracterizan su comportamiento térmico, como son la densidad, el calor específico, la conductividad térmica y la viscosidad cinemática.

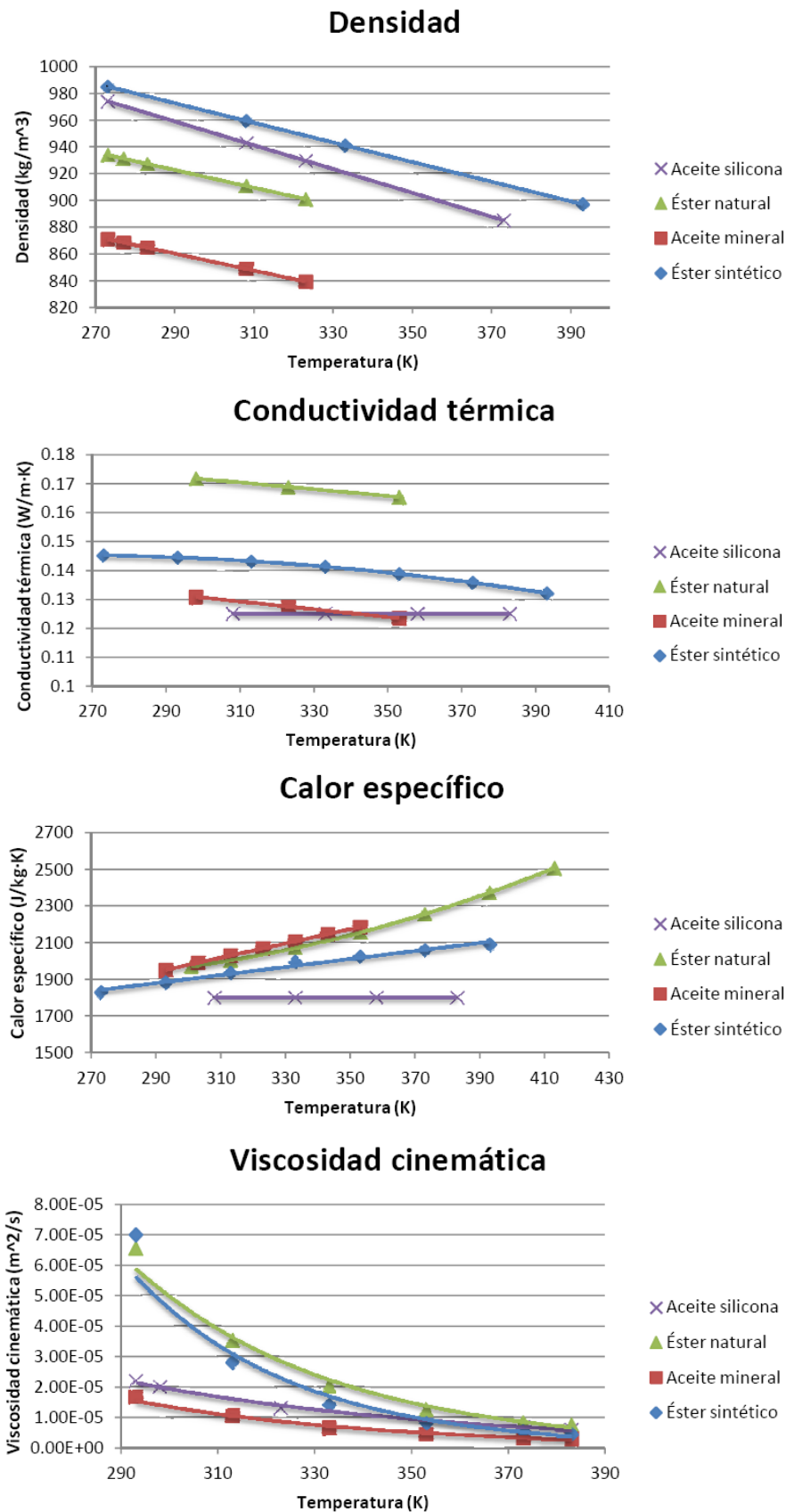


Figura 2: Propiedades de los aceites empleados.

3.3. Características de otros materiales empleados

Además de las condiciones de contorno, es necesario definir las propiedades de los materiales sólidos que componen el modelo, tales como cobre, madera, cartón y papel.

- Conductividad térmica del cobre: 383 W/(m·K)
- Densidad del cartón: 1150 kg/m³
- Calor específico del cartón: 2093,5 J/(kg·K)
- Conductividad térmica del cartón: 0,25 W/(m·K)
- Densidad de la madera: 418,5 kg/m³
- Calor específico de la madera: 2710 J/(kg·K)
- Conductividad térmica de la madera: 0,15 W/(m·K)
- Densidad del papel aislante: 930 kg/m³
- Calor específico papel aislante: 1340 J/(kg·K)
- Conductividad térmica del papel aislante: 0,19 W/(m·K)

3.4. Modelo numérico

La herramienta de cálculo se rige por un balance general de energía según la expresión

$$\nabla(-k * \Delta T) = Q - \rho * c_p * u * \Delta T \quad (\text{Ec. 1})$$

En la ecuación representada k es la conductividad térmica, cp es el calor específico y Q es el calor que se ha considerado que genera cada uno de los devanados. Las expresiones para k y cp son dependientes de la temperatura.

Para el análisis del movimiento del fluido se dispone de ecuaciones de conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento. Se trata de las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles donde se tienen en cuenta la velocidad del fluido y el campo de presiones.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U \times U) = -\nabla p + \mu(\nabla^2 U) + g(\rho - \rho_{\text{ref}}) \quad (\text{Ec. 3})$$

En estas ecuaciones se ha de tener en cuenta que tanto la densidad como la viscosidad son dependientes de la temperatura para los fluidos utilizados en el modelo. Las variaciones en la densidad del fluido dan lugar a fuerzas de flotabilidad, cuya expresión es $\rho \cdot g$. La ecuación 2 representa la conservación de la masa.

Además existe un conjunto de condiciones de contorno que es necesario introducir al modelo para que el comportamiento del mismo se asemeje lo más posible al comportamiento real del transformador. Estas condiciones de contorno están tomadas de [4].

4. Resultados alcanzados

A continuación se muestra una recopilación de los datos más importantes obtenidos para cada uno de los fluidos con el fin de poder establecer una comparación de los resultados. La Figura 3 muestra la temperatura media de los devanados para cada uno de los fluidos refrigerantes utilizados.

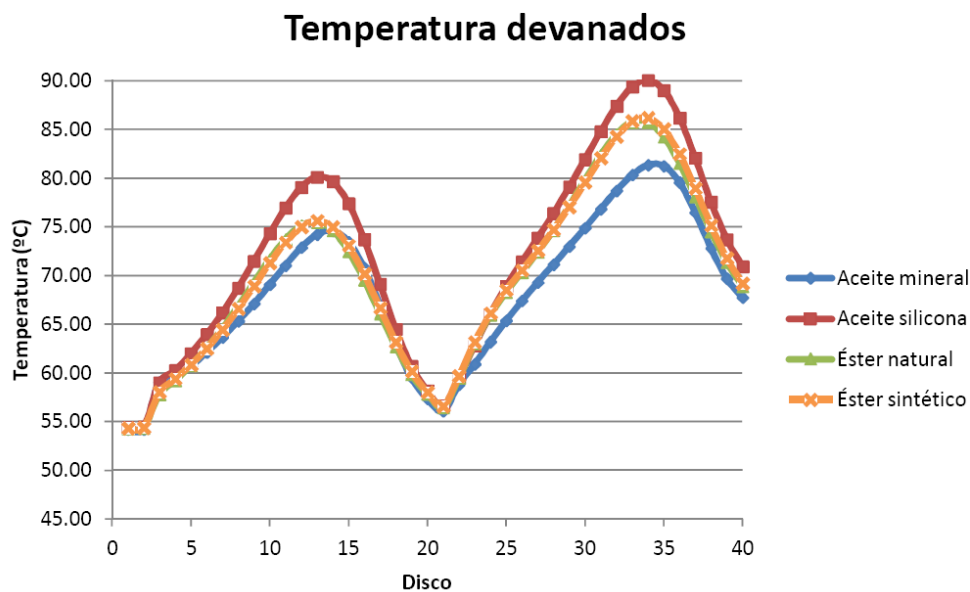


Figura 3: Temperatura media en los devanados.

La Tabla 2 recoge los datos más significativos obtenidos en la simulación con cada uno de los fluidos refrigerantes.

Tabla 2: Valores numéricos obtenidos mediante simulación.

Líquido refrigerante	T ^a media devanados	T ^a media fluido	T ^a máxima (hot spot)	Hot spot factor	Nº Reynolds máximo	Nº Prandtl medio
Aceite mineral	68,08 °C	57,26 °C	81,83 °C	1,32	24,90	94,39
Aceite silicona	72,02 °C	59,64 °C	90,39 °C	1,40	12,54	152,23
Éster natural	69,81 °C	58,08 °C	86,17 °C	1,38	7,66	236,11
Éster sintético	70,01 °C	58,27 °C	86,61 °C	1,37	11,18	200,58

5. Conclusiones

La localización de la máxima temperatura no se produce en el punto más elevado, como se podía pensar en un principio, sino que se alcanza a una cota inferior debido a la mayor cantidad de fluido circulando por los primeros y últimos canales de cada paso.

Las temperaturas más desfavorables son las obtenidas con el transformador refrigerado por aceite de silicona, debido principalmente a que el calor específico es menor que en los demás y no aumenta con temperaturas crecientes, no favoreciendo así la evacuación de calor.

El comportamiento de ambos ésteres es muy similar pese a tener propiedades diferentes, siendo mejor que el comportamiento del aceite de silicona.

Ninguno de los aceites biodegradables estudiados tiene la misma capacidad de refrigeración que el aceite mineral empleando las mismas condiciones de contorno, debido a la menor densidad de este que le permite circular por los canales con menor pérdida de carga y por tanto mayor velocidad, por lo que habría que estudiar las temperaturas máximas establecidas por la normativa para evitar la degradación del papel aislante.

6. Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo recibido por parte del Plan Español Estatal de I+D en el marco del acuerdo de subvención DPI2013-43897-P así como de la Fundación IBERDROLA bajo una Beca de Investigación en Energía y Medio Ambiente (2013).

7. Referencias

- [1] FRAILE MORA, J. *Máquinas eléctricas* (5ª ed.). Madrid: McGraw Hill. 2003.
- [2] SKILLEN, A. REVELL, H. IACOVIDES, W. WU. *Numerical prediction of local hot-spot phenomena in transformer windings*. Applied Thermal Engineering, 2012, vol. 36, pp96-105.
- [3] TORRIANO, F. CHAABAN, M. PICHER, P. *Numerical study of parameters affecting the temperature distribution in a disc-type transformer winding*. Applied Thermal Engineering, 2010, vol. 30, pp2034-2044.
- [4] TORRIANO, F. PICHER, P. CHAABAN, F. *Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding*. Applied Thermal Engineering, 2012, vol. 40, pp121-131.