

## Refrigeración en Transformadores

### Parte 1

#### 1. Introducción

La vida útil de los transformadores de potencia se encuentra determinada, fundamentalmente, por la capacidad de disipar la energía térmica, generada internamente, al medio ambiente externo.

De aquí surge la importancia de estudiar este proceso de generación y disipación de energía térmica, al mismo tiempo de poder establecer y fundamentar un modelo termoeléctrico que permita estimar los distintos estados de temperatura en el interior de la máquina.

Lo anterior, determina condiciones en el diseño del transformador, en relación a la adopción de la densidad de corriente en los conductores de los bobinados, así como la densidad de flujo magnético en el núcleo.

En el presente trabajo vamos a dedicarnos a analizar la refrigeración en los transformadores inmersos en aceite mineral, por lo que nuestras referencias serán las normas IEC 60354 e IEEE Std. C57.91.

En tal sentido, vamos a exponer, en primer lugar, el proceso de generación de energía térmica en el interior del transformador, localizando así las fuentes principales del mismo.

Continuaremos con la descripción de los modos de transmisión del calor y los sistemas de refrigeración que se han diseñado, para poder evacuar eficientemente la potencia de pérdidas.

Finalizaremos la Parte 1 con una introducción a los modelos térmicos convencionales, implementados para poder estimar los distintos estados de temperatura en el interior del transformador. El más importante de estos estados es el que determina la Temperatura del Punto Caliente, la cual se asocia con el envejecimiento térmico de la aislación.

En la Parte 2, nos dedicaremos a describir en detalle los modelos termoeléctricos, de naturaleza no convencional, aptos para poder determinar con mayor precisión los niveles de temperatura de la máquina.

Atendiendo a lo precedente, se ha estructurado este trabajo en dos partes, a saber:

#### Parte 1

1. Introducción.
2. Mecanismos de generación térmica.
3. Tipos de refrigeración.
4. Modelos térmicos convencionales.
5. Envejecimiento térmico, vida útil y efectos colaterales.

#### Parte 2

1. Modelo de analogía termoeléctrica.
2. Estimación de parámetros del modelo.
3. Identificación de parámetros del modelo.
4. Modelo termoeléctrico simplificado.
5. Conclusiones.

## 2. Mecanismos de generación térmica

Las fuentes principales de generación de energía térmica en un transformador son los bobinados y el núcleo magnético, las cuales se encuentran asociadas a las pérdidas en cada uno de estos componentes.

También debemos incorporar, como fuentes adicionales, a las pérdidas derivadas por desajustes en los conexiones internos de las acometidas de los bobinados (altas resistencias de contacto), así como las asociadas a las dispersiones.

En el caso de que el transformador opere en un ambiente de alta contaminación armónica, se deberán tener en cuenta las pérdidas asociadas a estas componentes.

Por lo tanto, uno de los objetivos principales en el diseño del transformador, será el de establecer los medios efectivos para poder disipar toda esta energía térmica derivada de las citadas pérdidas.

Es decir, se deberán evitar aumentos de temperatura en los bobinados, núcleo magnético y partes estructurales, que pueden provocar envejecimiento prematuro o daños en las aislaciones.

Lo anterior debe su justificación al hecho de que toda aislación sometida a altas sollicitaciones térmicas, durante tiempos extendidos, llevará a la pérdida de sus propiedades o funciones primarias.

A los efectos, se distinguen dos funciones primarias de la aislación de papel en los bobinados de un transformador:

- a) Resistencia mecánica.
- b) Rigidez dieléctrica.

La rigidez dieléctrica del papel envejecido por acción térmica, en un transformador inmerso en aceite, tiene la característica de mantener su valor durante un tiempo extendido, procediendo a una disminución significativa, luego de transcurrido ese lapso.

Sin embargo, la resistencia mecánica, durante el tiempo que se mantiene el valor de la rigidez dieléctrica, presenta una disminución de su valor, tornándose frágil el papel aislante.

Por lo dicho, será la propiedad de resistencia mecánica del papel la que sufra, en primera instancia, los efectos de la sollicitación térmica y el envejecimiento consecuente.

Como veremos, la determinación de todas las temperaturas internas del transformador será crucial a la hora de determinar un sistema de refrigeración adecuado, así como de asegurar una operación confiable de la máquina.

También se deberán considerar las condiciones de sobrecarga del transformador, junto a los valores límites o admisibles de las temperaturas del aceite y de los bobinados, las cuales se encuentran especificadas en las normas IEC e IEEE.

A continuación, procederemos a detallar los distintos tipos de refrigeración y los modos de transmisión del calor, que pueden desarrollarse en el interior y exterior de un transformador embebido en aceite mineral.

### 3. Tipos de refrigeración

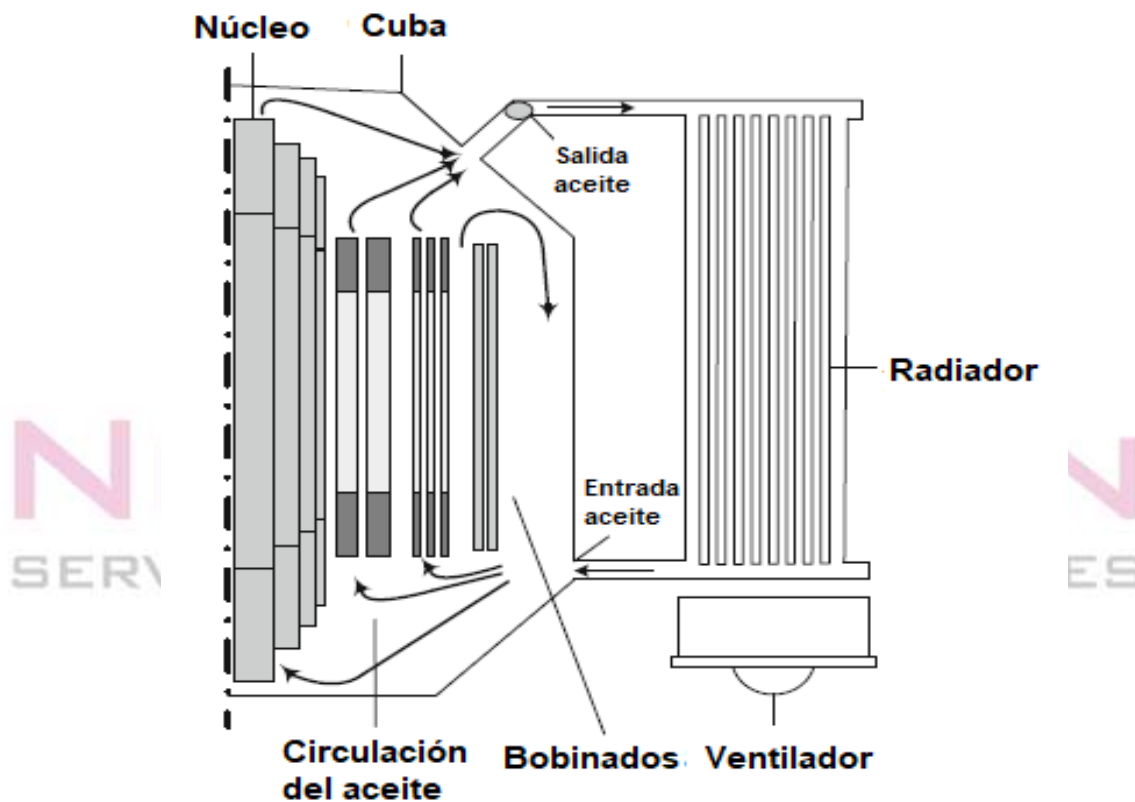
En un transformador, la transferencia del calor generado internamente, se establece a través de los modos de conducción, convección y radiación.

En un transformador en baño de aceite, el modo que predomina es el de convección.

A continuación haremos una breve descripción de estos procesos, con el fin de comprender luego los sistemas de refrigeración, diseñados para evacuar la energía calórica de pérdida.

En la figura N° 1 se muestra un corte de un transformador, en donde se aprecia el núcleo magnético y los bobinados, los cuales representan, como ya vimos, las fuentes principales de generación térmica, debido a las pérdidas que generan ambos componentes.

Figura N° 1



En la figura también se observa el proceso de circulación del aceite, conocido como efecto “termosifón”, el cual crea una corriente convectiva, debido a la diferencia en la densidad del aceite por diferencia de temperaturas.

Esta diferencia de densidades se establece ya que el aceite que ingresa por la parte inferior de la cuba (**Entrada aceite**) se encuentra a una temperatura menor y por lo tanto con una densidad mayor que el aceite que egresa por la parte superior de la cuba (**Salida aceite**), el cual posee una mayor temperatura.

De tal forma, se establece una corriente convectiva de transferencia del calor, con el aceite circulando de forma natural desde abajo hacia arriba, favoreciendo así la extracción de la energía calórica

del interior de la máquina, la cual se disipará al exterior a través del radiador (intercambiador de calor por aire).

Se destaca que el aceite en la parte inferior del radiador se encontrará a una menor temperatura al enfriarse (aumentado su densidad), ingresando de tal forma por la parte inferior de la cuba, constituyendo nuevamente la corriente convectiva natural.

Tendremos los siguientes modos de transmisión del calor.

a) Conducción

En la figura N° 1 se puede observar que la energía de calórica de pérdidas, generada en el núcleo magnético y en los bobinados, se transfiere al aceite circundante, el cual tiene la función de oficiar de agente de la refrigeración.

Se destaca que la transferencia de calor entre el núcleo y el aceite es directa.

Sin embargo, la transferencia entre los bobinados y el aceite se realiza en forma indirecta, ya que la energía calórica debe transferirse, en primer lugar, a través de la aislación.

Como consecuencia de la conducción del calor desde el conductor del bobinado hasta el aceite, a través de la aislación, la diferencia de temperatura entre el medio conductor y el medio refrigerante puede expresarse de la siguiente forma (Ley de Fourier de la conducción del calor):

$$\Delta T = t_1 - t_2 = R_t P_c$$

Siendo:

$t_1$  = temperatura del conductor del bobinado (°C).

$t_2$  = temperatura del medio refrigerante (aceite) (°C).

$P_c$  = potencia de pérdida calórica (W).

$R_t$  = resistencia térmica (°C/W).

La resistencia térmica depende de la geometría en la que se desarrolla el proceso de conducción de la energía calórica y también del material que conduce el calor, en este caso el papel aislante que conforma la aislación principal del bobinado.

Para una configuración de caras paralelas (conductor-aislación-aceite), la resistencia térmica se calcula con la siguiente expresión:

$$R_t = \frac{e}{k S}$$

En donde:

$e$  = espesor de la aislación (m).

$S$  = área de la sección transversal de transferencia (m<sup>2</sup>).

$k$  = conductividad térmica del material aislante (W/m°C).

Entonces:

$$\Delta T = \frac{p \cdot e}{k}$$

$p = P_o/S$  = cantidad de potencia calórica transferida por unidad de área (W/m<sup>2</sup>).

Se destaca que la conductividad térmica del papel aislante depende de la temperatura, por lo que deberá tenerse en cuenta, al momento de efectuar los cálculos en el diseño.

Otro hecho a tener en cuenta es que a menor conductividad (caso típico de los materiales aislantes), el salto de temperatura será mayor, con la consecuente transferencia de calor al papel y por lo tanto un incremento en el factor de envejecimiento del mismo.

De manera análoga, un aumento en el espesor de la aislación, provocará el mismo efecto nocivo sobre la misma, desde el punto de vista térmico.

#### b) Convección

Representa el principal mecanismo de transferencia de la potencia de pérdidas, en el interior y exterior del transformador.

Lo anterior se justifica debido al proceso físico de diferencia de densidad o efecto termosifón, ya explicado previamente.

En este caso, el salto térmico será (Ley de Newton):

$$\Delta T = t_1 - t_2 = \frac{P_{cv}}{h \cdot S}$$

Siendo:

$t_1$  = temperatura de la sección de transferencia convectiva (°C).

$t_2$  = temperatura del medio refrigerante (aceite) (°C).

$P_{cv}$  = potencia de pérdida calórica transferida por convección (W).

$h$  = coeficiente de transferencia del calor por convección en el aceite (W/°Cm<sup>2</sup>).

$S$  = área de la sección de transferencia convectiva (m<sup>2</sup>).

También en este caso, el coeficiente “h” dependerá de la geometría involucrada en el proceso de convección, así como las propiedades del medio refrigerante (en este caso el aceite).

La disipación del calor desde la cuba al medio ambiente también se efectúa de modo convectivo, incorporando además el proceso de radiación.

A los fines de los cálculos, el área de transferencia de la cuba al medio ambiente, a considerar en ambos procesos, se asume que es la misma.

c) Radiación

Este proceso de transmisión del calor se establece a través de la emisión de radiación de ondas desde un cuerpo caliente a otro cuerpo a menor temperatura.

Se diferencia de los procesos de conducción y convección, en que, en este caso, no se requiere necesariamente de un medio material para la transferencia.

Físicamente se expresa de la siguiente forma (Ley de Stefan-Boltzmann):

$$P_r = \beta \varepsilon S (T_s^4 - T_a^4)$$

En donde:

$P_r$  = potencia de pérdida transferida por radiación (W).

$\beta$  = constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \text{ E-8 W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4$ .

$\varepsilon$  = factor de emisividad de la superficie radiante (adimensional).

$S$  = área de la superficie radiante ( $\text{m}^2$ ).

$T_s$  = temperatura promedio de la superficie radiante ( $^\circ\text{K}$ ).

$T_a$  = temperatura del medio ambiente ( $^\circ\text{K}$ ).

El factor de emisividad “E” de una superficie depende de parámetros como ser la temperatura, el tipo de acabado (por ej, la pintura de la superficie), el ángulo de emisión y la longitud de onda de la radiación.

La transmisión de la potencia de pérdida a través de la cuba del transformador se establece tanto por convección como por radiación.

En los radiadores también ambos mecanismos tienen lugar, pero el de convección es el prevalente, pudiendo no incorporar la radiación en los cálculos.

Habiendo visto los modos de transferencia de la energía calórica de pérdidas en un transformador, pasaremos ahora a detallar los distintos tipos de diseño de los sistemas de refrigeración.

El objetivo de los mismos será el de evacuar al exterior la energía de pérdidas, evitando así el aumento de la temperatura en los componentes internos del transformador, en especial las aislaciones.

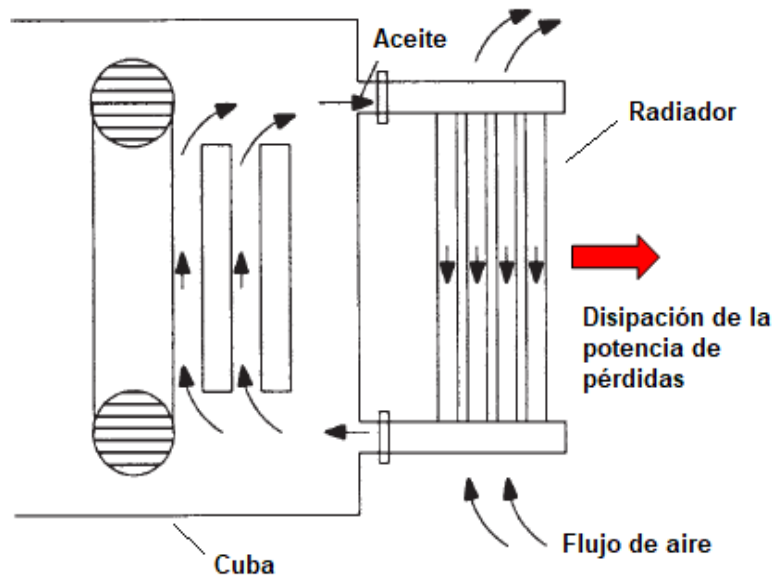
1) Refrigeración ONAN/OA

En este sistema el aceite circula de forma natural por diferencia de densidades, de forma tal que evacúa al calor derivado de las pérdidas en el núcleo y bobinados, disminuyendo así su densidad y procediendo luego a intercambiarlo en el radiador con el flujo de aire a menor temperatura.

En tal sentido, el aceite baja su temperatura y el aire la aumenta. Como consecuencia de este proceso, el aceite aumenta su densidad, ingresando por la parte inferior de la cuba y repitiendo el ciclo de refrigeración interna.

En la figura N° 2 se puede apreciar lo descripto.

Figura N° 2



Como ya hemos comentado, el mecanismo de transmisión del calor es fundamentalmente convectivo, tanto en el intercambio entre la parte activa y el aceite (también existe una proporción de transmisión conductiva), así como entre el aceite y el aire en los radiadores (también existe una proporción de transmisión por radiación).

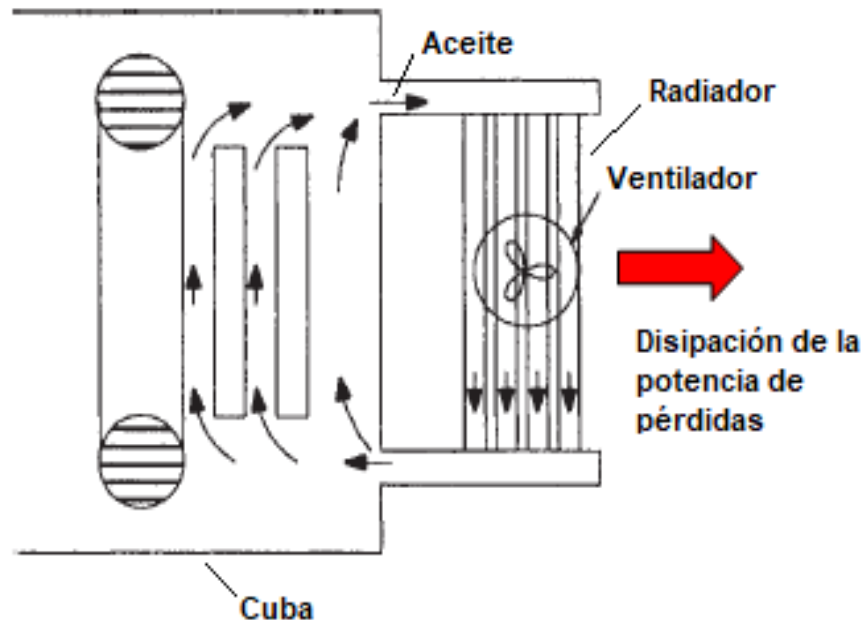
A este sistema se lo denomina ONAN, siglas en inglés de Oil Natural and Air Natural (o también OA), debido a que la disipación de la potencia de pérdidas en el interior del transformador se realiza al medio ambiente de forma natural, a través del denominado efecto "termosifón".

## 2) Refrigeración ONAF/FA

El sistema ONAF, por sus siglas en inglés Oil Natural and Air Forced (o FA), se caracteriza por la introducción de aire forzado, a través de la acción de ventiladores, con el objetivo de incrementar el coeficiente de transmisión del calor por convección, entre la superficie externa de los radiadores y el aire.

En la figura N° 3 se detalla, esquemáticamente, este sistema.

Figura N° 3



Desde el punto de vista de la implementación de un sistema de refrigeración, es común el uso de diseños del tipo ONAN/ONAF, de forma tal que, ante sobretensiones excesivas, se activen los ventiladores, con el fin de aumentar la disipación del calor.

Este sistema es muy utilizado en transformadores de gran potencia, ya que la potencia de pérdidas será mayor y por lo tanto la capacidad de disipación deberá incrementarse notoriamente.

Una forma de disponer los ventiladores es como se indica en la figura N° 3, es decir, al lado de los radiadores. Este montaje requiere de ventiladores de menor tamaño.

La otra disposición se basa en montar los ventiladores debajo de los radiadores, inyectando el aire de intercambio desde abajo hacia arriba.

En ambos casos, el diseño debe asegurar una mayor superficie de cobertura de los radiadores, en relación al cono efectivo que crea el flujo de aire de los ventiladores. El resto de la superficie del radiador no cubierta será intercambiada con el aire en circulación natural.

### 3) Refrigeración OFAF/FOA

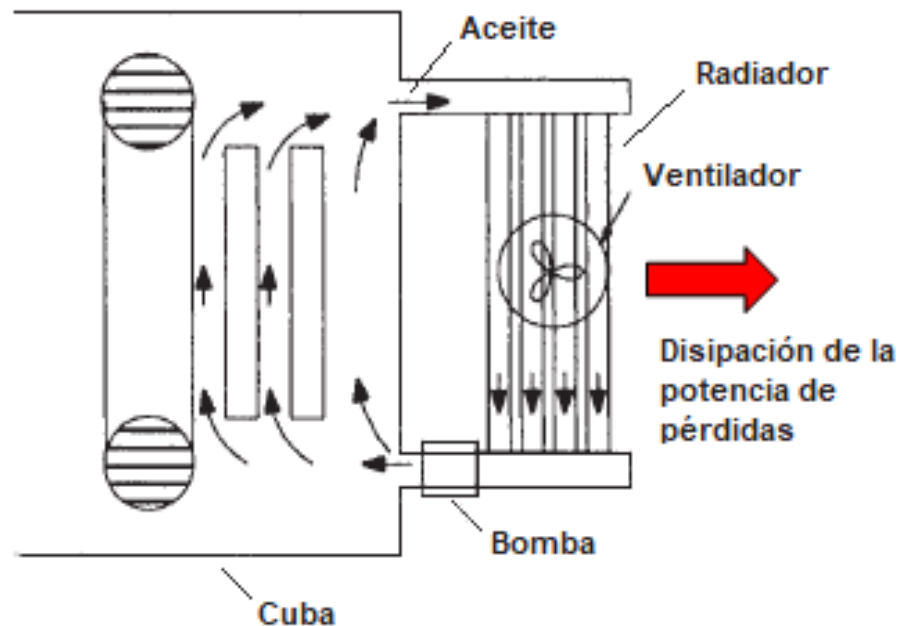
Según vimos en los dos sistemas previos, es importante destacar que la base de la circulación del aceite, en el ciclo de refrigeración, es el balance entre la presión ejercida por el efecto termosifón y la resistencia viscosa que ofrece el aceite.

Teniendo en cuenta que la velocidad de circulación del aceite es baja, en condiciones naturales, la capacidad de disipación del calor también será relativamente baja.

Por lo tanto, la esencia de este diseño se sustenta en aumentar la velocidad de circulación del aceite en el ciclo, a través del agregado de una bomba externa.

En la siguiente figura se observa el esquema de este sistema (Oil Forced and Air Forced).

Figura N° 4



Esta configuración es muy usada en transformadores de alta potencia, de forma tal de conseguir una alta capacidad de disipación térmica, atendiendo al hecho de que a mayor potencia nominal, mayor será la potencia de pérdidas.

Existen dos tipos de bombas a montar en este esquema; la primera es la de flujo axial y la segunda de flujo radial.

La bomba axial se utiliza en esquemas de refrigeración combinados del tipo ONAN/ONAF/OFAF, ya que ofrece menor resistencia al flujo del aceite, cuando se encuentra desactivada.

En la bomba radial, la cual ofrece mayor resistencia al flujo del aceite en estado no operativo, deberá estudiarse la configuración de los radiadores para determinar la decisión de su montaje.

#### 4) Refrigeración ODAF

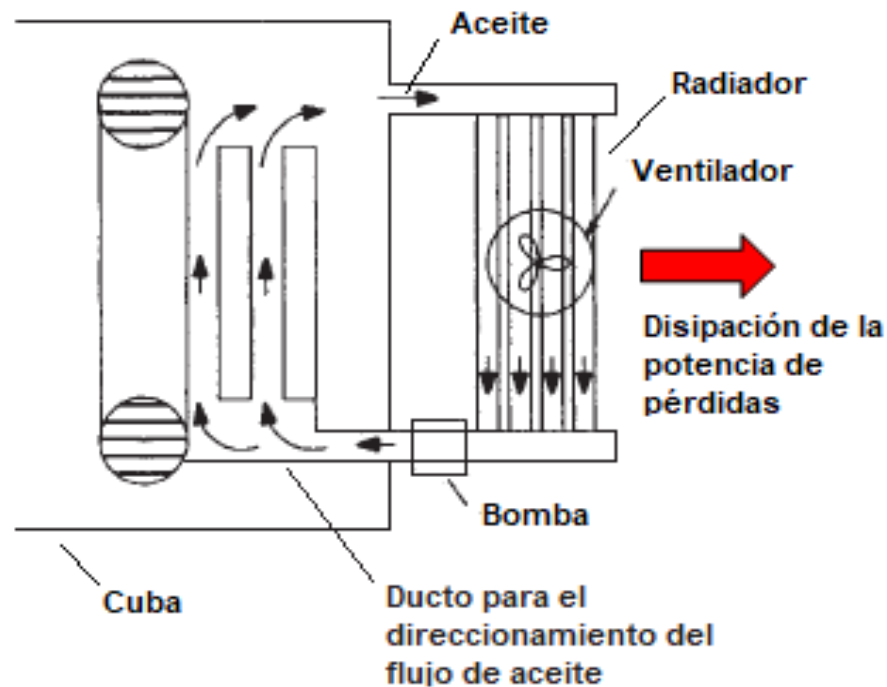
El desarrollo de esta configuración tiene su causa en la forma en que el flujo del aceite forzado se establece al entrar por la parte inferior del transformador.

Se observa que parte de este aceite no interactúa con la parte activa de la máquina, conformando un camino paralelo que no aporta a la refrigeración.

En tal sentido, se diseña un sistema con el agregado de ductos de direccionamiento del aceite forzado hacia los componentes de la parte activa, incrementando la capacidad de refrigeración y disipación del transformador.

En la figura N° 5 se detalla este esquema.

Figura N° 5



Esta configuración recibe el nombre de ODAF (Oil Directed and Air Forced), siendo muy utilizada en transformadores de alta potencia.

Hay que tener en cuenta que una de las desventajas de este sistema es la pérdida de presión del flujo de aceite sobre los componentes activos, debido a la fricción en los ductos de direccionamiento.

También hay que considerar que un estado de bloqueo de los ductos, o bien una fisura en los mismos, llevará a una disminución apreciable de la capacidad de refrigeración y por lo tanto a un consecuente aumento de las temperaturas internas en la máquina.

##### 5) Refrigeración OFWF y ODWF

Ambos sistemas corresponden a configuraciones en donde el medio de intercambio en los radiadores es el agua.

Tendremos, OFWF (Oil Forced and Water Forced) y ODWF (Oil Directed and Water Forced). La ventaja que posee este esquema de refrigeración, es que el agua tiene un mayor coeficiente de transmisión del calor en la superficie de los radiadores, lo cual lleva a que los mismos sean de menor tamaño para la misma capacidad de intercambio.

Son muy usados en transformadores de potencia, instalados en centrales hidroeléctricas, debido a la abundancia y disponibilidad de agua.

Desde el punto de vista operativo, se deberá prestar atención a que, en todo momento, la presión del aceite forzado sea mayor a la presión del agua, de forma tal de evitar cualquier tipo de fuga de agua hacia el aceite.

Debemos hacer algunas observaciones en cuanto a las ventajas y desventajas de los sistemas ONAN y ONAN/ONAF.

Si bien la refrigeración ONAN requiere más espacio físico, por la mayor superficie de intercambio de los radiadores, podemos decir que este diseño es más confiable ya que no dispone de ventiladores, sistemas de control asociados y además requiere de menos mantenimiento.

Otra ventaja del sistema ONAN es la reducción del ruido, al no disponer de ventiladores, situación adecuada en lugares que se requieran bajos niveles de ruido ambiental.

#### **4. Modelos térmicos convencionales**

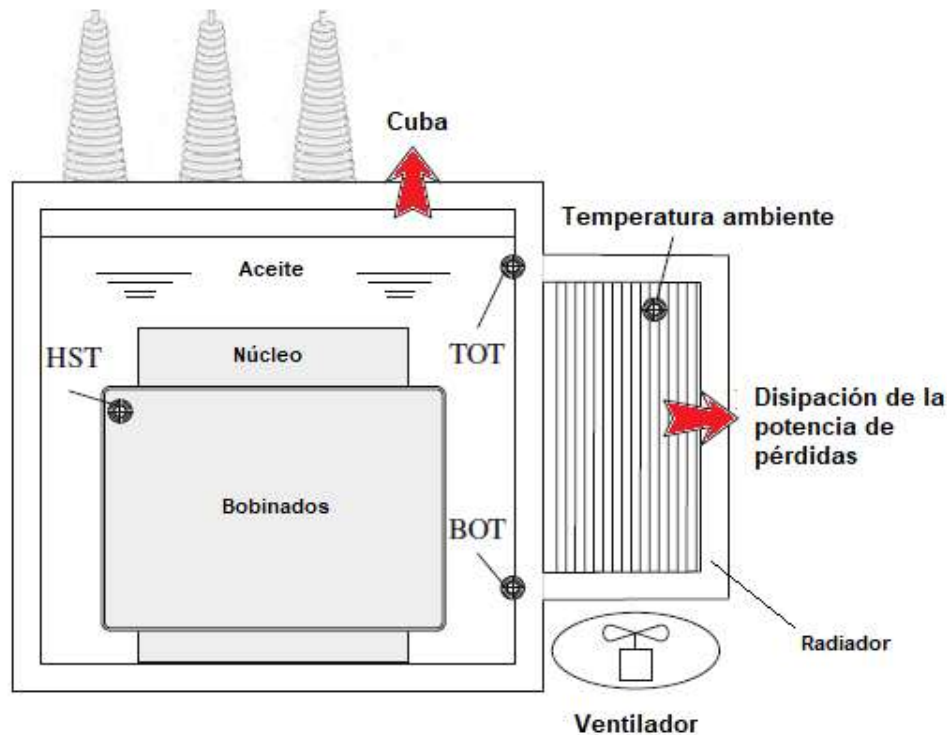
A los fines del estudio de los procesos térmicos en los transformadores, tanto la IEC 60354 (Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers) como la IEEE Std. C57.91 (Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators), han establecido cuatro modelos convencionales.

En el presente trabajo nos abocaremos a describir solamente los dos modelos que refieren al comportamiento térmico en régimen permanente, dejando los otros dos modelos, en régimen transitorio, para el desarrollo en otro artículo.

Previo a la descripción de cada uno de los modelos, veremos algunos parámetros de base, que son utilizados por los mismos.

Figura N° 6

**NOVA MIRON**  
SERVICIOS & TRANSFORMADORES



Teniendo en cuenta la figura N° 6, se definen los siguientes parámetros:

$T_a$  = temperatura ambiente.

$T_{BOT}$  = temperatura inferior del aceite, en carga nominal (BOT = Bottom Oil Temperature).

$T_{TOT}$  = temperatura superior del aceite, en carga nominal (TOT = Top Oil Temperature).

$T_{HST}$  = temperatura del punto caliente, en carga nominal (HST = High Spot Temperature).

$\Delta T_{BOT} = T_{BOT} - T_a$  = Sobretemperatura inferior del aceite con respecto al ambiente, en carga nominal.

$\Delta T_{TOT} = T_{TOT} - T_a$  = Sobretemperatura superior del aceite con respecto al ambiente, en carga nominal.

De la figura se observan los mecanismos de transmisión del calor, a través de los radiadores y de la cuba, en donde el convectivo, como ya hemos comentado, es el predominante.

A continuación haremos una breve descripción de cada uno de los modelos en régimen permanente, los cuales permiten determinar las temperaturas características del transformador, para un estado de carga específico.

### 1) Modelo de temperatura en régimen estacionario

Se asume que el transformador se encuentra operando en régimen estable con un factor de carga  $K$  ( $= I/I_n$ ).

En este estado, la temperatura en la parte inferior del aceite se expresa por:

$$T_{BOT}(K) = T_a + \Delta T_{BOT} \left( \frac{1 + R K^2}{1 + R} \right)^x$$

Y la temperatura en la parte superior del aceite:

$$T_{TOT}(K) = T_a + \Delta T_{BOT} \left( \frac{1 + R K^2}{1 + R} \right)^x + (\Delta T_{TOT} - \Delta T_{BOT}) K^y$$

En donde:

R = relación de las pérdidas en carga a corriente nominal y las pérdidas en vacío del transformador.

x = exponente relacionado con el incremento de la temperatura del aceite, debido a las pérdidas totales del transformador.

y = exponente relacionado con el incremento de la temperatura en los bobinados, debido a la corriente de carga.

Los parámetros del modelo (x, y, R) se obtienen de ensayos o bien se estiman en base a la experiencia.

## 2) Modelo de incremento de la temperatura del punto caliente en régimen estacionario

La temperatura del punto caliente ( $T_{HST}$ ), es decir la máxima temperatura que alcanzan los bobinados, es el factor limitante para la operación de un transformador.

La determinación de este parámetro es muy importante, ya que se asocia con el envejecimiento del papel aislante.

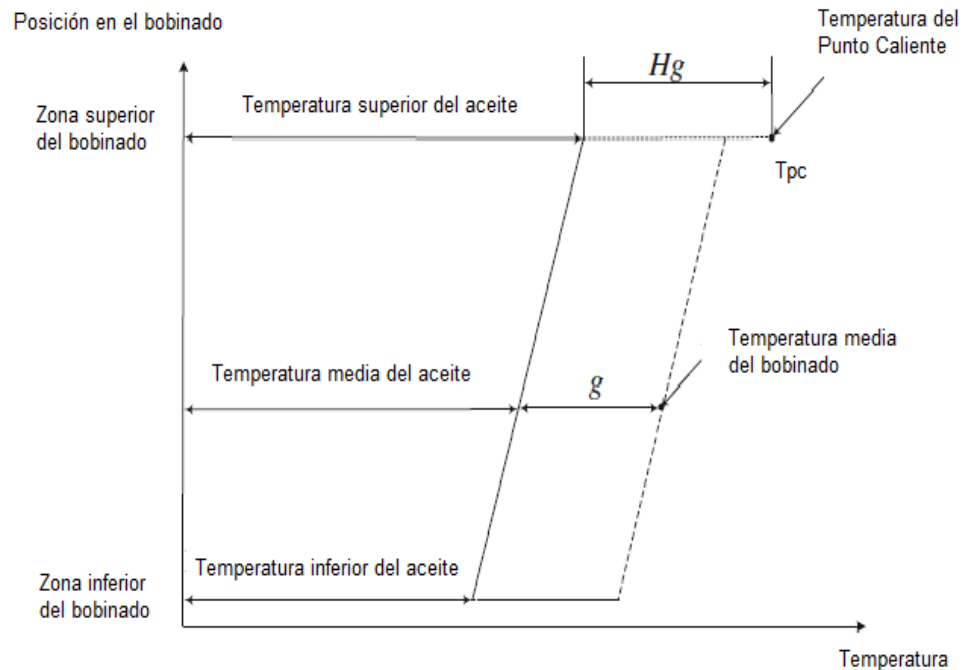
Una técnica para obtener la  $T_{HST}$  es la de medición directa, a través de una sonda de medición de fibra óptica.

No todos los transformadores vienen equipados con estas sondas de medición directa, por lo que, en estos casos, se procede a estimar el valor de la temperatura del punto caliente a través del presente modelo convencional.

### a) Modelo de la Característica Térmica Simplificada

En este modelo se asume un perfil térmico simplificado, en el interior del transformador, como se indica en la siguiente figura.

Figura N° 7



Se destaca:

- La temperatura del aceite en el interior del bobinado posee una característica de incremento lineal, sin importar el modo de refrigeración del transformador.
- El incremento de temperatura del conductor que conforma el bobinado, posee una característica lineal, desplazada del perfil térmico del aceite por un valor “g”, constante.
- El valor “g” resulta de la diferencia de las temperaturas medias del aceite y del bobinado.
- La temperatura del punto caliente ( $T_{HST}$  o  $T_{pc}$  en la figura) será mayor a la correspondiente temperatura del conductor en la parte superior del bobinado, ya que se deben tener en cuenta las pérdidas adicionales.
- En base a lo anterior se introduce el concepto de Factor de Punto Caliente (H), el cual puede adquirir valores entre 1,1 a 1,5, dependiendo de la potencia nominal, el tipo de bobinado y la tensión de cortocircuito del transformador.
- Por lo tanto, la temperatura del punto caliente será la suma de la temperatura del aceite en la parte superior del transformador y la temperatura dada por “g” y multiplicada por el factor “H”.

b) Modelo para la refrigeración natural del aceite (ON)

La temperatura del punto caliente se obtiene con la siguiente expresión:

$$T_{HST}(K) = T_{pc}(K) = T_a + \Delta T_{TOT} \left( \frac{1 + R K^2}{1 + R} \right)^x + H g K^y$$

c) Modelo para la refrigeración forzada del aceite (OF)

La temperatura del punto caliente se obtiene con la siguiente expresión:

$$T_{HST}(K) = T_{pc}(K) = T_a + \Delta T_{BOT} \left( \frac{1 + R K^2}{1 + R} \right)^x + 2 [\Delta T_M - \Delta T_{BOT}] K^y + H g K^y$$

$\Delta T_M$  = Sobretemperatura media del aceite con respecto al ambiente, en carga nominal.

## 5. Envejecimiento térmico, vida útil y efectos colaterales

La degradación del papel aislante de los bobinados es la causa del desarrollo de mecanismos de falla específicos, a saber:

- Fragilidad del papel, por lo que lleva a su resquebrajamiento o rotura.
- Generación de moléculas de agua, lo cual conlleva a reducir su rigidez dieléctrica.
- Carbonización localizada, por lo que lleva a un incremento de la conductividad y al consecuente sobrecalentamiento y fallas en el conductor.

La vida de servicio del papel se define como el período de tiempo del uso operativo, hasta que el deterioro se torna crítico.

A los efectos, la vida de servicio de un transformador, se puede determinar a través de la conocida fórmula de Montsinger, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$VE(T) = K e^{-\alpha T}$$

Siendo:

VE(T) = vida esperada del transformador en función de la temperatura [años].

K = constante [años].

$\alpha$  = constante [1/°C].

T = temperatura [°C].

En relación a esta expresión, se puede formular la Ley de Montsinger: “Para un rango de temperatura, comprendido entre 80 °C y 140 °C, la vida esperada de un transformador se reduce a la mitad para un incremento de 6 °C de la temperatura”.

Por lo tanto, la constante “α” se obtiene a partir del enunciado de esta Ley:

$$\alpha = \frac{\ln 2}{6} \rightarrow \alpha = 0,11552 \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$$

A partir de esta relación, podemos determinar el factor de envejecimiento del papel (Fe) adoptando una vida esperada normal a una dada temperatura de referencia (T<sub>r</sub>).

Por lo tanto, a una dada temperatura “T”, podemos obtener el factor de envejecimiento referido a la T<sub>r</sub>, de la siguiente forma.

$$\text{Fe}(T) = \frac{\text{VE}(T_r)}{\text{VE}(T)} = \frac{K e^{-0,11552 T_r}}{K e^{-0,11552 T}} \rightarrow \text{Fe}(T) = e^{0,1152 (T - T_r)}$$

Se acepta que la temperatura de referencia del punto caliente, asociada a una vida normal de la aislación de papel en un transformador inmerso en aceite, sea de 98 °C.

Esta especificación se encuentra en la norma IEC 60354 y refiere a una temperatura continua que provoca un envejecimiento normal del papel.

Por lo tanto, el factor de envejecimiento para esta condición de referencia y una dada temperatura de operación “T” del transformador, será:

$$\text{Fe}(T) = e^{0,1152 (T - 98)}$$

Esta expresión nos permite obtener el tiempo de vida consumido por un transformador que se ha sobrecargado durante un cierto tiempo, en relación a la vida normal.

Por ejemplo, supongamos que se requiere saber cuánto fue el tiempo equivalente de operación de un transformador que se sobrecargó a una temperatura de los bobinados de 135 °C durante 4 horas.

Tendremos:

$$\text{Fe}(135) = e^{0,1152 (135 - 98)} \rightarrow \text{Fe}(135) = 70,98$$

El tiempo equivalente será:  $t_e = 4 \times 70,98 \rightarrow t_e = 283,92$  horas ~ 12 días.

Por lo tanto, la operación del transformador a 135 °C durante 4 horas en el día, es equivalente a una operación de 12 días, en condiciones normales.

Es de destacar que este cálculo es aproximado y para obtener resultados más precisos se deberá recurrir a lo especificado en las normas IEC 60354 o IEEE Std. C57.91.

A continuación vamos a detallar el efecto colateral de electrificación estática, el cual se deriva del proceso de refrigeración del transformador.

Como ya hemos visto, al analizar los sistemas de refrigeración basados en la circulación de aceite forzado, hay que tener muy en cuenta la capacidad de las bombas,



La circulación a presión del aceite provoca la fricción del mismo con la aislación sólida de los bobinados y otros componentes de naturaleza dieléctrica.

Por lo tanto, se generarán cargas electroestáticas localizadas en el interior del transformador, las cuales llevarán a establecer altos niveles de potencial eléctrico.

La consecuencia inmediata de este potencial eléctrico, será la de establecer eventuales sobretensiones internas, cuyos efectos será la generación de descargas de alta energía, llevando al transformador a un estado de falla.

Se ha encontrado que muchos transformadores de alta potencia han fallado por este fenómeno, en donde la operación de las bombas de circulación del aceite es el factor principal de causa de este problema.

También se ha encontrado que los transformadores fabricados con dimensiones reducidas, en relación a las nominales de diseño, así como aquellos que poseen una relación Masa/Potencia reducida, poseen una alta probabilidad de desarrollar el proceso de electrificación estática, siendo así más propensos a las fallas.

Ingeniería Nova Miron S.A.



---

## **NOVA MIRON S.A.**

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • [www.novamiron.com.ar](http://www.novamiron.com.ar)

**SERVICIO DE ATENCION PERMANENTE** Cel.: 15 4945 1170 / 71 / 72