

## Refrigeración en Transformadores

### Parte 2

#### 1. Modelo de analogía termoeléctrica

Como hemos visto en el ítem 2 de la Parte 1, los modos de transferencia del calor dependen de ciertas propiedades físicas de los materiales involucrados en el proceso, las temperaturas y la magnitud de la diferencia entre las mismas.

También vimos que, para el caso de un proceso de conducción del calor, la diferencia de temperaturas entre el medio emisor (a mayor temperatura) y el receptor (a menor temperatura) se puede expresar a través de la conocida Ley de Fourier del calor:

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

En donde  $R_t$  representa la denominada resistencia térmica, expresada por:

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

En donde:

$e$  = espesor del camino de transmisión (m).

$S$  = área de la sección transversal de transferencia ( $m^2$ ).

$k$  = conductividad térmica del material de transferencia ( $W/m^\circ C$ ).

Por lo tanto:

$$P_c = \frac{\Delta T}{R_t}$$

También podemos expresarlas en función de  $G_t = 1/R_t$ , denominando a este parámetro Conductancia Térmica.

Es decir:

$$P_c = G_t \Delta T$$

De aquí, podemos establecer una analogía entre el proceso físico térmico y el proceso físico eléctrico, ya que la expresión previa puede asimilarse por la correspondiente Ley de Ohm:

$$I = \frac{U}{R} = G U$$

Siendo:

$I$  = corriente eléctrica (A).

U = diferencia de potencial eléctrico (V).

R = resistencia eléctrica ( $\Omega$ ).

G = conductancia eléctrica (S).

Lo anterior establece que la formulación matemática de ambos procesos físicos sea similar, pudiendo utilizar los circuitos eléctricos equivalentes, así como todas las técnicas de resolución asociadas, para representar y calcular los procesos de transferencia de calor.

De igual forma que hemos establecido la analogía termoeléctrica con el mecanismo de conducción del calor, también puede formalizarse con los mecanismos de convección y radiación.

A continuación se muestra una tabla con las formulaciones.

| Magnitud            | Conducción                 | Convección       | Radiación                             |
|---------------------|----------------------------|------------------|---------------------------------------|
| Potencia calórica   | $\frac{kS}{e} (T_1 - T_2)$ | $hS (T_1 - T_2)$ | $\beta \varepsilon S (T_1^4 - T_2^4)$ |
| Resistencia térmica | $\frac{e}{kS}$             | $\frac{1}{hS}$   | $\frac{1}{h_r S}$                     |

En el caso de la radiación, el parámetro de transmisión asociado ( $h_r$ ) será dependiente de las temperaturas involucradas en el proceso. Queda determinado por la siguiente expresión:

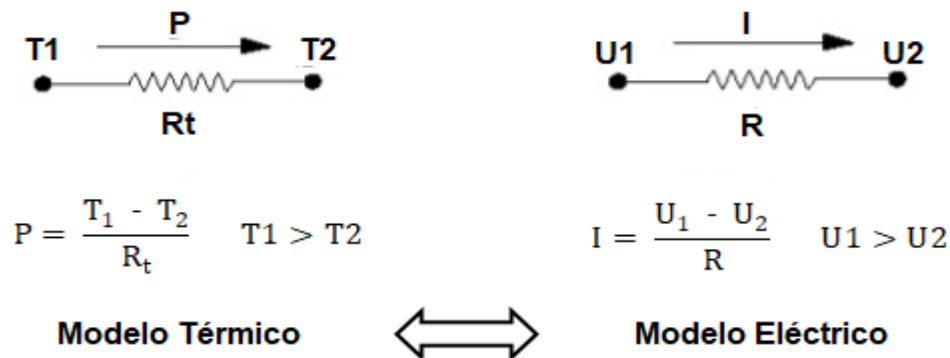
$$h_r = \beta \varepsilon (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)$$

Para que la analogía tenga consistencia física se deben cumplir un conjunto de condiciones, a saber:

- Debe aplicarse en régimen permanente, en decir luego de finalizados los procesos transitorios. Luego se introducirá el parámetro de Capacidad Térmica, con el cual se podrán modelar los procesos transitorios, resultando válido el modelo.
- Los parámetros termofísicos deben permanecer con valores constantes durante la transferencia del calor. Ante variaciones por efectos ambientales o de refrigeración, el modelo permite la formulación por grupos de datos.
- La transferencia del calor debe ser unidimensional.
- No deben existir fuentes internas de calor en la trayectoria de transferencia del calor.

En la figura N° 1 se observan los esquemas análogos de ambos sistemas físicos, así como las magnitudes que se encuentran relacionadas.

Figura N° 1



En la siguiente tabla se destacan las magnitudes térmicas y eléctricas, así como sus correspondientes analogías.

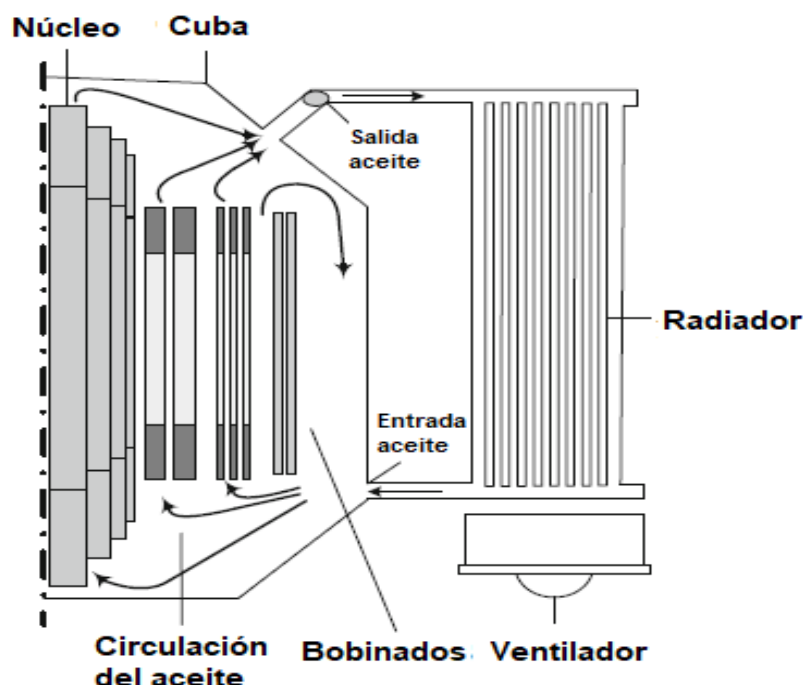
| Magnitud Térmica                  | Magnitud Eléctrica          |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| $\Delta T$ (Sobretensión)         | U (diferencia de potencial) |
| P (potencia de pérdidas calórica) | I (corriente eléctrica)     |
| Rt (resistencia térmica)          | R (resistencia eléctrica)   |

Como ya hemos visto en la Parte 1, en un transformador, la transferencia del calor generado internamente, se establece a través de los modos de conducción, convección y radiación.

Pero es importante destacar que en un transformador en baño de aceite, el modo que predomina es el de convección.

En la figura N° 2 se muestra un corte de un transformador, observando el núcleo magnético y los bobinados. Ambos son las fuentes principales de generación térmica, debido a las pérdidas que generan.

Figura N° 2



Como ya hemos indicado en el ítem 2 de la Parte 1, la energía calórica de pérdidas, generada en el núcleo magnético y en los bobinados, se transmite al aceite refrigerante, procediendo luego a intercambiarse en los radiadores con el aire ambiente, de forma tal de evacuar el calor y al mismo tiempo enfriar al aceite.

La importancia del sistema de refrigeración radica fundamentalmente en que los materiales aislantes involucrados (papel y aceite) poseen límites térmicos bien definidos.

Valores de temperatura que sobrepasen estos límites, llevarán a una degradación acelerada de los materiales aislantes que conforman el transformador.

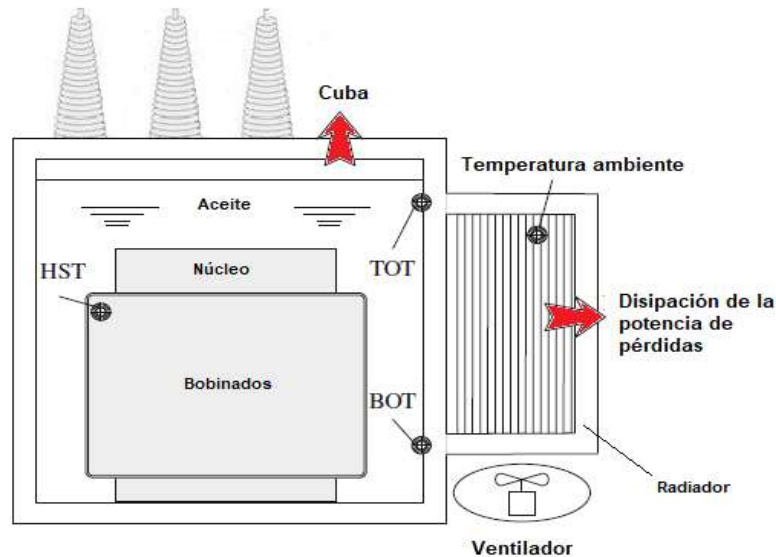
Como referencia podemos indicar los siguientes límites térmicos:

Papel → 90 °C.  
Aceite mineral → 140 °C.

Por lo tanto, la función principal del aceite, como agente refrigerante, será la de evitar que los niveles de temperatura dentro del transformador, superen los valores indicados.

La base conceptual para desarrollar el modelo de analogía termoeléctrica, además de las relaciones entre las magnitudes físicas, será la ya vista en el ítem 4 de la Parte 1, por lo que a continuación volvemos a desplegar la figura que alude a estos conceptos.

Figura N° 3



Recordando, tendremos:

$T_a$  = 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.

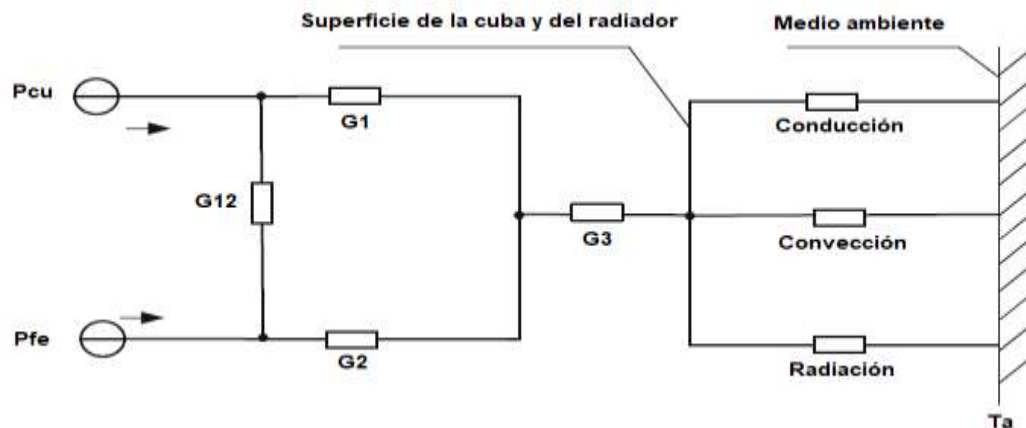
$\Delta T_{HST} = T_{HST} - T_a$  = Sobretemperatura del punto caliente con respecto al ambiente, en carga nominal.

Como punto de partida para desarrollar el modelo, podemos establecer un esquema térmico, correspondiente a los tres procesos de transmisión del calor que ocurren en un transformador.

Como ya sabemos, el que prevalece, de todos estos mecanismos de transferencia, es el de convección.

En la figura N° 4 se aprecia el esquema térmico citado.

Figura N° 4



Tendremos:

$P_{cu}$  = potencia de pérdidas generada en los conductores de los bobinados.

$P_{fe}$  = potencia de pérdidas generada en el núcleo magnético.

$G_1$  = conductancia térmica por la transferencia de calor desde los bobinados al aceite.

$G_{12}$  = conductancia térmica por la transferencia de calor desde los bobinados al núcleo magnético.

$G_2$  = conductancia térmica por la transferencia de calor desde el núcleo magnético al aceite.

$G_3$  = conductancia térmica por la transferencia de calor desde el aceite a la cuba y los radiadores.

Conducción = conductancia térmica por la transferencia conductiva del calor desde la cuba y radiadores al medio ambiente.

Convección = conductancia térmica por la transferencia convectiva del calor desde la cuba y radiadores al medio ambiente.

Radiación = conductancia térmica por la transferencia radiante del calor desde la cuba y radiadores al medio ambiente.

$T_a$  = temperatura ambiente.

El esquema previo es válido para transformadores con sistema de refrigeración ONAN y también ONAF.

Teniendo en cuenta la analogía térmica-eléctrica, podemos establecer un circuito equivalente, en donde quede modelado el sistema ONAN/ONAF/OFAF de un transformador.

A tal fin, tendremos en cuenta las fuentes de generación térmica, asociadas a las pérdidas en los conductores de los bobinados, a las del núcleo magnético y a las adicionales.

En el modelo se establecen como fuentes de corriente (ver la analogía de magnitudes), concentrando en éstas a todas aquellas pérdidas distribuidas que se encuentren relacionadas a los tres mecanismos de generación principales ( $P_{cu}$ ,  $P_{fe}$  y  $P_{ad}$ , representando esta última a las pérdidas adicionales).

Además de los componentes resistivos/conductivos, también se incorporan en el modelo los procesos de inercia térmica, representados por la Capacidad Térmica o Calorífica.

Este componente permite al modelo incorporar los fenómenos transitorios, de forma tal de evaluar los aspectos dinámicos de las temperaturas.

Por lo tanto, la primera condición del modelo de analogía, ahora incorpora los procesos transitorios, además de los permanentes.

Esta propiedad es una medida de la energía térmica necesaria para incrementar la temperatura de una cierta sustancia/material en una unidad de temperatura.

El concepto asociado de inercia térmica refiere a la capacidad del material, en mayor o menor medida, de experimentar cambios de temperatura ante el suministro de energía calórica.

Se relaciona con el Calor Específico de un dado material, de la siguiente forma:

$$C = c m = c \delta V$$

$C$  = capacidad térmica o calorífica del material ( $J/^{\circ}C$ ).

$c$  = calor específico del material ( $J/kg\ ^{\circ}C$ ).

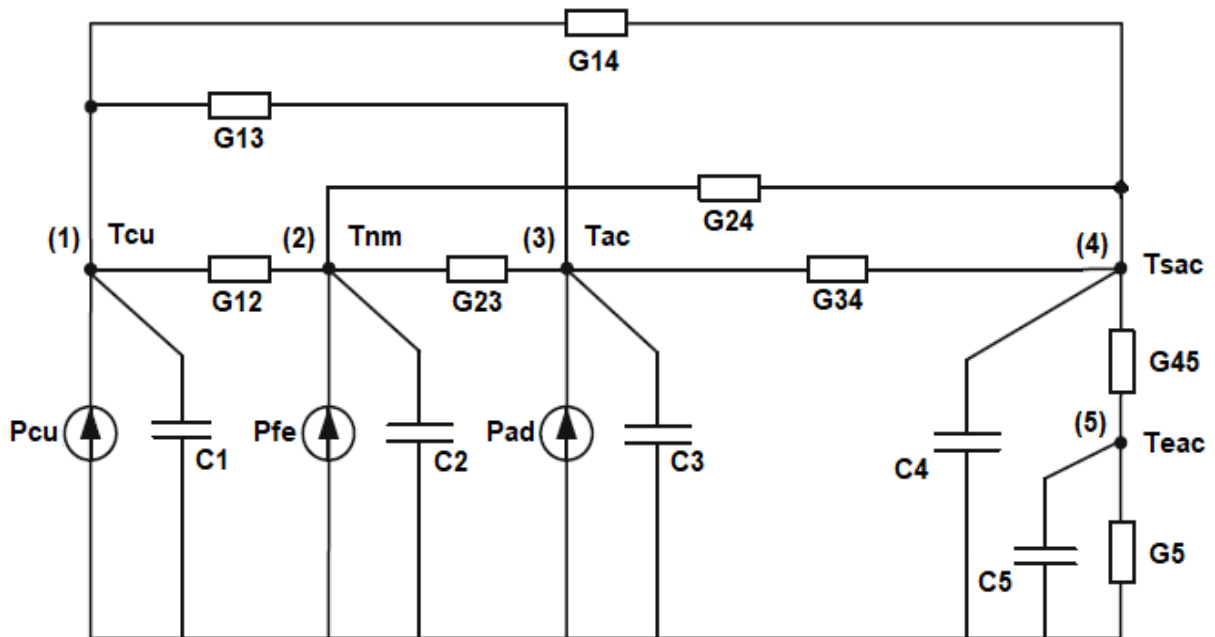
$m$  = masa del material (kg).

$\delta$  = densidad del material ( $kg/m^3$ ).

$V$  = volumen del material ( $m^3$ ).

En la figura N° 5 se muestra el circuito equivalente del modelo de analogía termoeléctrica.

Figura N° 5



Siendo:

$P_{cu}$  = potencia de pérdidas generada en los conductores de los bobinados.

$P_{fe}$  = potencia de pérdidas generada en el núcleo magnético.

$P_{ad}$  = potencia de pérdidas adicionales.

$G_i$  = conductancia térmica del nodo "i".

$G_{ij}$  = conductancia térmica entre los nodos “i” y “j”.

$T_{cu}$  = sobrettemperatura de los bobinados con respecto al medio ambiente.

$T_{nm}$  = sobrettemperatura del núcleo magnético con respecto al medio ambiente.

$T_{ac}$  = sobrettemperatura del aceite con respecto al medio ambiente.

$T_{sac}$  = sobrettemperatura de salida del aceite con respecto al medio ambiente.

$T_{eac}$  = sobrettemperatura de entrada del aceite con respecto al medio ambiente.

Se destaca que las transferencias a través de la convección, conducción y radiación del calor, se representan por conductancias térmicas.

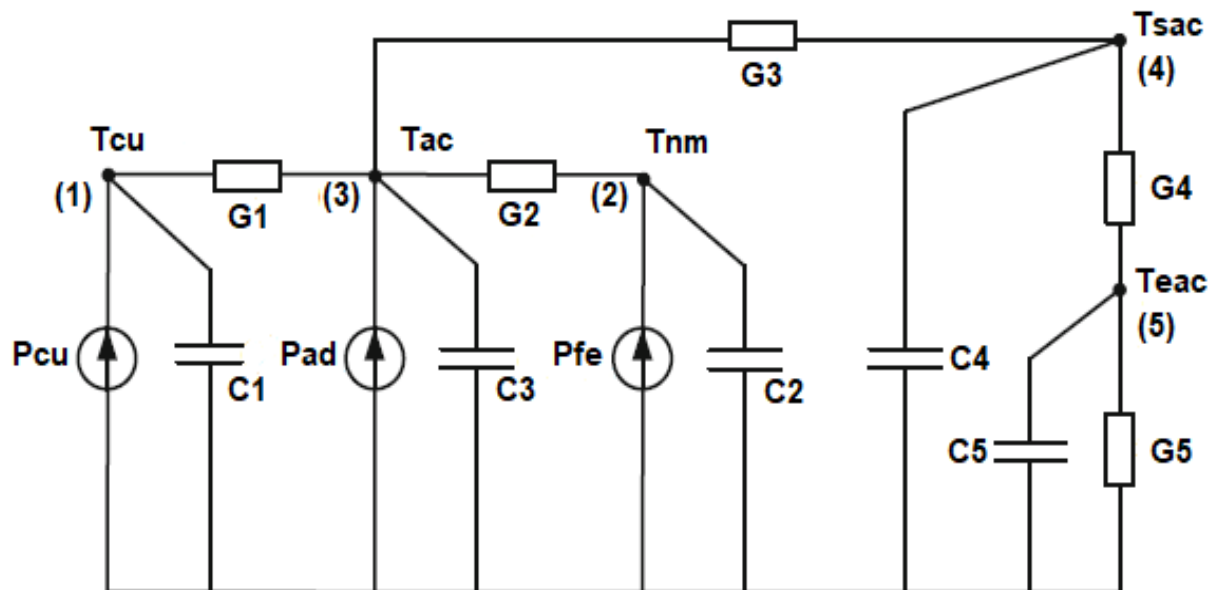
El modelo presenta 5 nodos, por lo cual, el sistema será de 5to orden, resoluble a través del Método de los Nodos de la Electrotecnia básica o de la Teoría de Circuitos.

Es importante notar que cada capacidad térmica se encuentra unívocamente relacionada con un nodo (referencial de temperatura en el modelo térmico y de tensión en el modelo eléctrico).

En tal sentido, no habrá capacidades de acoplamiento entre nodos del circuito.

Si se procede a aplicar técnicas de reducción de ramas del circuito, se obtiene el siguiente circuito equivalente simplificado de 5to orden.

Figura N° 6



Tomando este circuito como referencia para el cálculo, se puede establecer la siguiente ecuación diferencial, que permite resolverlo:

$$[P(t)] = [G] [T] + [C] \frac{d[T]}{dt}$$

$[P(t)]$  es la matriz ( $K^{5 \times 1}$ ) de la fuentes de potencia de pérdidas del transformador, denotando la dependencia en el tiempo de los valores de las mismas.

$[G]$  es la matriz ( $K^{5 \times 5}$ ) de las conductancias térmicas del modelo.

$[C]$  es la matriz ( $K^{5 \times 5}$ ) de las capacidades térmicas del modelo.

$[T]$  es la matriz ( $K^{5 \times 1}$ ) de las sobretemperaturas de los nodos circuitales del modelo, con respecto a la temperatura del medio ambiente.

La matriz  $[T]$  es la incógnita a resolver del sistema propuesto, de forma tal de tener calculados e identificados todos los niveles de temperatura del transformador ( $T_{cu}$ ,  $T_{nm}$ ,  $T_{ac}$ ,  $T_{sac}$  y  $T_{eac}$ ).

## 2. Estimación de parámetros del modelo

En este ítem vamos a evaluar y estimar los distintos parámetros que conforman el modelo de analogía térmica (figura N° 6).

A tal fin, tendremos:

### a) Procesos de generación de pérdidas

Como ya hemos visto, las fuentes de generación de pérdidas internas en un transformador se pueden concentrar en los tres siguientes mecanismos:

- Pérdidas en el núcleo magnético (Foucault e Histéresis) =  $P_{fe}$ .
- Pérdida en el material conductor de los bobinados (Joule) =  $P_{cu}$ .
- Pérdida por dispersión en los bobinados =  $P_{ad}$ .

Con el fin de poder determinar las características de las fuentes de potencia de pérdidas ( $[P(t)]$ ), análogas a las fuentes de Corriente Eléctrica, adoptaremos las siguientes consideraciones:

- Las pérdidas en el material conductor de los bobinados será función del estado de carga del transformador, así como del nivel de temperatura de los bobinados. Para el caso de que el material conductor sea el cobre, podemos expresar la fuente de generación de pérdidas, a través de la siguiente expresión:

$$P_{cu}(K, T_B) = P_{cuN} K^2 \left( \frac{235 + T_B}{235 + T_N} \right)$$

En donde:

$K$  = factor de carga.

$T_B$  = temperatura de los bobinados en el estado de carga operativo.

$T_N$  = temperatura de los bobinados en el estado de carga nominal.

$P_{cuN}$  = pérdidas en el cobre en el estado de carga nominal.

De esta expresión se deduce que la fuente de pérdida, debido al material conductor de los bobinados, posee una dependencia en el tiempo, atendiendo a las variaciones temporales de la carga y de la temperatura que adquieren los bobinados.

- Las pérdidas en el núcleo magnético se asumen constantes, independiente del estado de carga y de la temperatura que adquiera el núcleo magnético. Se adopta el valor obtenido de los ensayos de fábrica.
- Esta fuente de pérdidas se adopta a través de un porcentaje de las pérdidas totales, por lo que también serán dependientes del tiempo (principalmente del estado de carga).

#### b) Parámetros de transferencia del calor

- La Capacidad Térmica (análoga a la Capacidad Eléctrica), puede estimarse (ver ítem 1):

$$C = c m = c \delta V$$

Por ejemplo, para estimar la capacidad térmica del núcleo magnético (C2 en el modelo), debemos disponer de la masa (m) del núcleo, así como el calor específico del acero eléctrico (0,12 kcal/kg °C = 0,502 kJ/kg °C).

Se destaca que los valores de este parámetro se mantienen constantes, no dependiendo de los niveles de temperatura de cada nodo, ni de los estados de carga del transformador.

- La Conductancia Térmica (análoga a la Conductancia Eléctrica), es un parámetro no lineal, dependiente de la diferencia de temperaturas que poseen los nodos entre los cuales se establece el camino de transferencia del calor. De igual forma, también dependerá del modo de transmisión del calor asociado a este parámetro. Una de las formas de estimarla es a través de la siguiente expresión:

$$G = a \Delta T^b$$

Siendo:

a y b = coeficientes asociados al mecanismo de transmisión del calor.

$\Delta T$  = diferencia de temperaturas entre nodos que conforman el camino de transferencia del calor.

c) Dispositivo de Imagen térmica

Este dispositivo de medición de la temperatura de los bobinados, permite controlar el sistema de refrigeración en grandes transformadores de potencia.

Cuando la temperatura de los bobinados alcanza un valor umbral de referencia, los ventiladores y/o las bombas de circulación se activan, estableciendo de tal forma un ciclo de refrigeración de aire y aceite forzado.

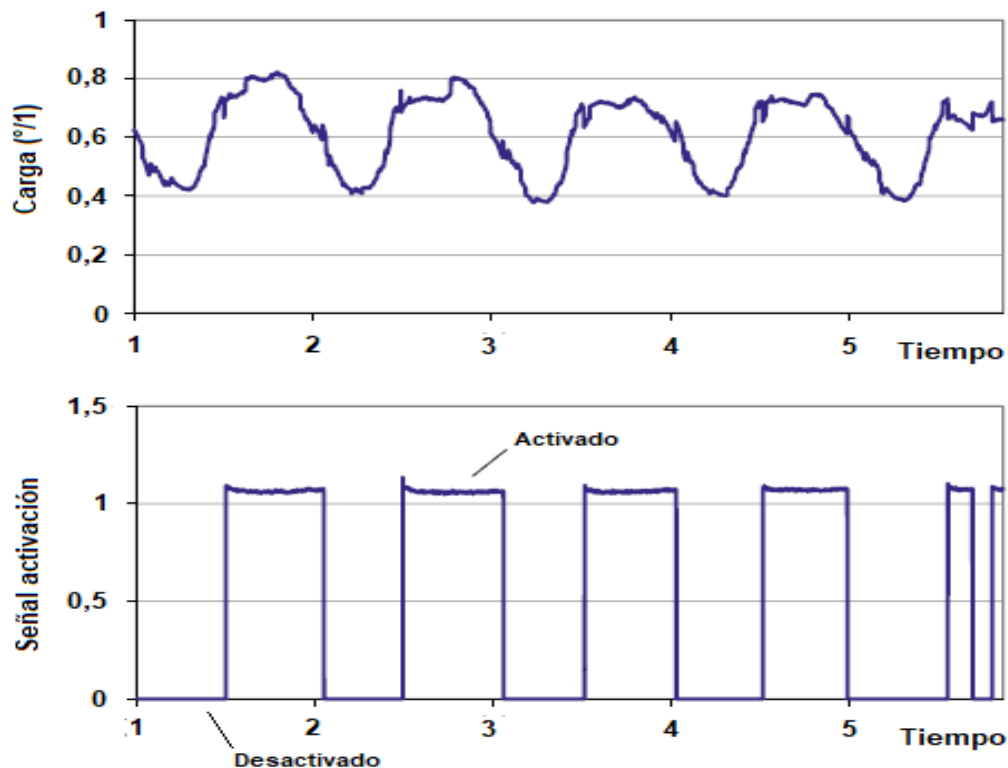
Este esquema es útil en los transformadores cuya operación está condicionada por períodos de tiempo, en donde se establecen sobrecargas extendidas.

Como ya vimos en la Parte 1, será vital la refrigeración bajo estas condiciones, para lograr así una vida útil dilatada del transformador, en relación al envejecimiento prematuro, asociado a estos períodos de sobrecarga.

En la figura N° 7 se observa una característica de carga diaria de un transformador de potencia de transmisión (desde el día 1 al día 5), así como el registro de la señal de activación/desactivación del sistema de control de la refrigeración forzada.

La señal se activa y desactiva en función de la indicación de la imagen térmica, la cual mide en todo momento la temperatura de los bobinados.

Figura N° 7



d) Variabilidad de la inercia térmica

En este ítem entra en juego el concepto de difusividad térmica, el cual comprende la capacidad de un dado material en difundir el calor a lo largo de su volumen.

Es decir, al medir la velocidad del cambio de la temperatura en el volumen del material hasta alcanzar el equilibrio (velocidad de cambio nula), representa un indicador indirecto de la inercia térmica de éste.

Se define de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{\text{calor difundido por el material}}{\text{calor almacenado en el material}} = \frac{k}{c \delta}$$

La unidad de esta magnitud física es  $[m^2/s]$  y se encuentra relacionada, a través del modelo de analogía termoelectrónica, con el parámetro Constante de Tiempo eléctrica, dado por el producto entre la resistencia eléctrica y la capacidad eléctrica ( $\tau = RC$ ).

En tal sentido la relación entre la magnitud difusividad térmica y la constante de tiempo eléctrica será:  $\alpha \equiv 1/RC$ .

El hecho a tener en cuenta es que la difusividad térmica del aceite presenta importantes variaciones a lo largo del tiempo, en función del tipo de refrigeración que se implemente.

Como ya vimos, un transformador puede operar en ciertos estados de carga con refrigeración natural y en otros estados (de sobrecarga) con refrigeración forzada (activación de las bombas y ventiladores).

Lo anterior se justifica ya que la masa de aceite involucrada en el proceso de transmisión del calor, es sustancialmente distinta en ambos procesos de refrigeración.

Es decir, habrá una variación significativa en los valores de los parámetros térmicos del modelo de analogía termoeléctrica, por lo que se deberá adecuar dinámicamente los mismos a lo largo del tiempo.

### 3. Identificación de parámetros del modelo

De todo lo dicho previamente, se concluye que lo más complicado en el modelado térmico del transformador, será la estimación de los parámetros circuitales (C y G).

Uno de los enfoques para identificar los parámetros termoeléctricos, será el de implementar ensayos fuera de línea, atendiendo a condiciones especificadas en las normas.

Como resulta obvio, este enfoque no resulta práctico, en relación a grandes transformadores de potencia, debido a que la salida de servicio del mismo, para ejecutar estos ensayos, tiene asociados impedimentos de índole operativa-económica.

Además, los valores obtenidos de un eventual ensayo de calentamiento, no son lo suficientemente precisos como para reflejar los estados térmicos del transformador, para distintos estados de carga, condiciones ambientales y de refrigeración, a lo largo del tiempo.

Un enfoque más acertado será el de identificar los parámetros del modelo, a través de datos obtenidos con el transformador en línea (condiciones operativas reales, así como ambientales y de refrigeración).

### 4. Modelo termoeléctrico simplificado

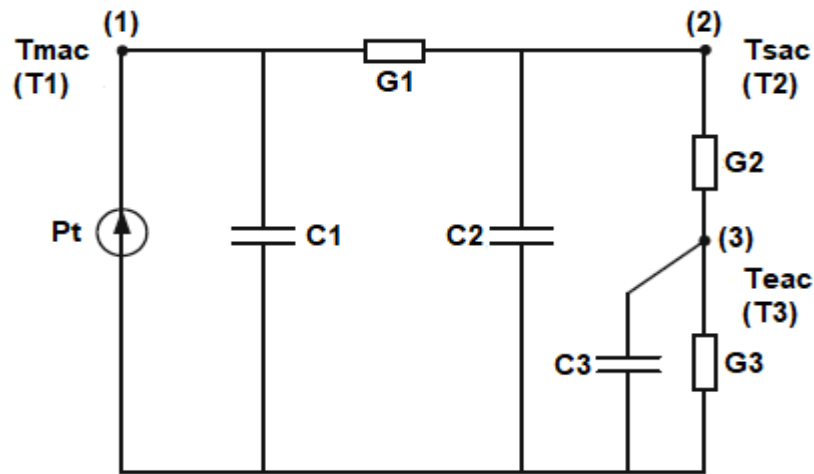
Debido a la complejidad asociada a la resolución del modelo termoeléctrico de 5 nodos, además de la reducida disponibilidad de variables operativas en línea, que permitan estimar los parámetros, se ha establecido una nueva instancia de modelado.

Por lo tanto, el enfoque se orienta a establecer un sistema basado en 3 nodos, en dónde las variables de base para la estimación de los parámetros sean solamente dos, a saber:

- $T_{BOT} = T_{eac} = T_3$  = temperatura inferior del aceite, en carga nominal.
- $T_{TOT} = T_{sac} = T_2$  = temperatura superior del aceite, en carga nominal.

En la figura N° 8 se muestra el esquema del modelo termoeléctrico simplificado de 3 nodos.

Figura N° 8



Siendo:

Pt = Fuente de pérdidas totales (Pcu, Pad y Pfe).

G1 = conductancia térmica combinada de los bobinados y el núcleo magnético.

G2 = conductancia térmica de los radiadores desde la salida a la entrada del aceite.

G3 = conductancia térmica de los radiadores al medio ambiente.

Ci = capacidad térmica de cada nodo del circuito, correspondiente a cada nivel de temperatura.

T1 = sobrettemperatura media del aceite, con respecto al medio ambiente.

T2 = sobrettemperatura superior del aceite, con respecto al medio ambiente.

T3 = sobrettemperatura inferior del aceite, con respecto al medio ambiente.

En primer lugar, se destaca una simplificación en las inercias térmicas del núcleo magnético, bobinados y parte del aceite refrigerante, en una única capacidad C1.

Además, las fuentes de pérdidas de calor Pcu, Pfe y Pad, se reducen a una única fuente Pt.

Se observa del esquema, que las temperaturas Teac y Tsac se mantienen sin alteración en el modelo, sabiendo que las mismas pueden derivarse directamente de mediciones en línea.

Los parámetros C2, C3, G2 y G3, son representativos de los dos nodos principales del sistema.

Entonces, la ecuación diferencial que describe el proceso térmico en el transformador se expresa de la siguiente forma:

$$[Pt(t)] = [G] [T] + [C] \frac{d[T]}{dt}$$

[P(t)] matriz ( $K^{3 \times 1}$ ) de la fuentes de potencia de pérdidas del transformador, denotando la dependencia en el tiempo de los valores de las mismas.

[G] la matriz ( $k^{3 \times 3}$ ) de las conductancias térmicas del modelo.

[C] matriz ( $k^{3 \times 3}$ ) de las capacidades térmicas del modelo.

[T] matriz ( $k^{3 \times 1}$ ) de las sobretemperaturas de los nodos circuitales del modelo, con respecto a la temperatura del medio ambiente.

El objetivo es el de resolver la ecuación:

$$\frac{d[T]}{dt} = [C]^{-1} \{ [Pt(t)] - [G] [T] \}$$

Siendo:

$$[Pt(t)] = \begin{bmatrix} Pt(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C1 & 0 & 0 \\ 0 & C2 & 0 \\ 0 & 0 & C3 \end{bmatrix}$$

$$[G] = \begin{bmatrix} G1 & -G1 & 0 \\ -G1 & G1 + G2 & -G2 \\ 0 & -G2 & G2 + G3 \end{bmatrix}$$

$$[T] = \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{bmatrix} \quad \left[ \frac{d[T]}{dt} \right] = \begin{bmatrix} \frac{dT1}{dt} \\ \frac{dT2}{dt} \\ \frac{dT3}{dt} \end{bmatrix}$$

En tal caso, la temperatura del punto caliente ( $T_{HST}$ ), se obtendrá por cálculo, en base a los niveles T2 y T3, obtenidos de la solución del sistema previo.

Considerando lo establecido en la IEC 60354 y lo visto en el ítem 4 de la Parte 1, para un transformador con refrigeración natural, podemos establecer (solamente influye el nivel de temperatura T2):

$$T_{HST}(K) = T_{pc}(K) = T_a + \Delta T_2(K) + H g K^Y$$

En la figura N° 9 se muestra un diagrama de carga diaria de un transformador de potencia perteneciente al sistema de transmisión.

Junto a éste, se detallan las características a través del tiempo de las temperaturas T2 y T3, tanto del relevamiento de los datos medidos en campo, así como las obtenidas del cálculo en el modelo térmico simplificado.

Se destaca que los errores derivados del modelo, en comparación con los reales medidos, son pequeños, por lo que el esquema de analogía simplificado es apto para modelar los estados de temperatura del transformador.



También podemos resaltar que este modelo permite evaluar distintos escenarios de carga, incorporando variaciones rápidas o intempestivas en el SEP.

Finalmente se observa la característica de la señal de activación del sistema de refrigeración forzada, el cual opera en forma automática ante los distintos niveles térmicos del transformador.

Figura N° 9



---

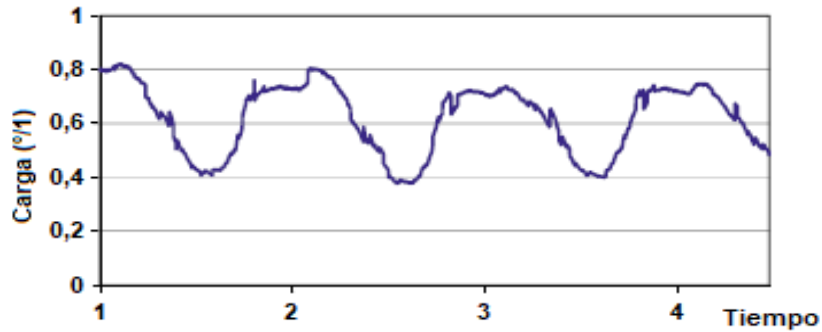
**NOVA MIRON S.A.**

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

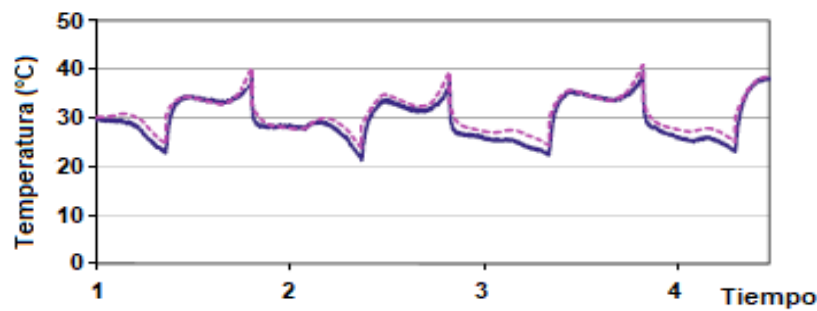
Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • [www.novamiron.com.ar](http://www.novamiron.com.ar)

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

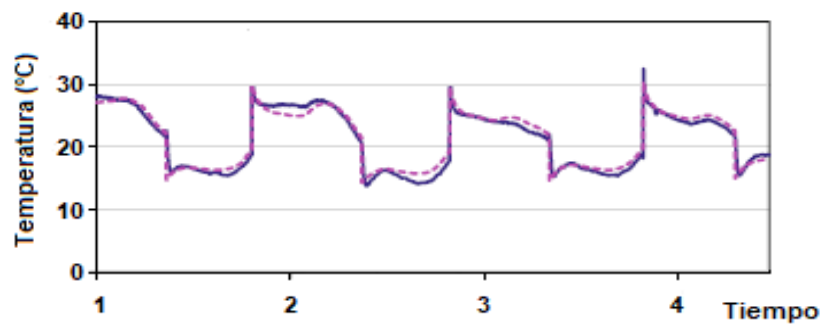
Carga Diaria



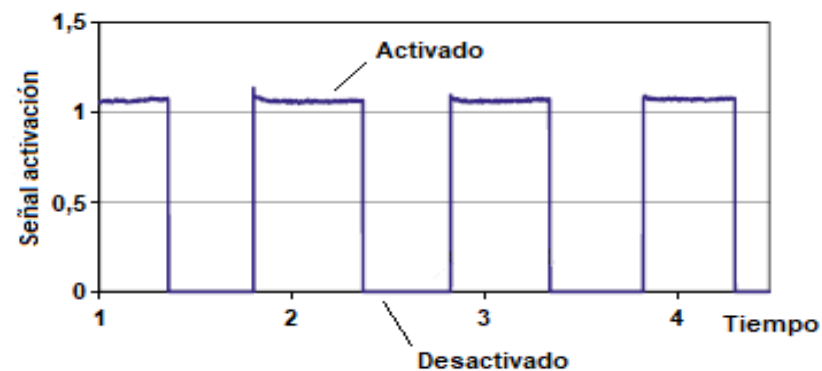
Sobretensión superior del aceite — Medida — Modelo térmico



Sobretensión inferior del aceite — Medida — Modelo térmico



Estado refrigeración forzada



## 5. Conclusiones

- La sollicitación térmica es un factor determinante en la vida útil de un transformador, por lo que se han desarrollado distintas técnicas para su estudio y análisis. Entre éstas podemos destacar las relacionadas con la elaboración de modelos de analogía electrotérmica, de base analítica. También se han desarrollado técnicas basadas en métodos numéricos, a través de los elementos finitos.
- Los mecanismos de transferencia del calor en un transformador son los de conducción, convección y radiación. El mecanismo de convección es el principal en un transformador inmerso en aceite.
- El diseño del transformador deberá contemplar los medios efectivos para disipar la energía térmica desarrollada en el interior del mismo, como consecuencia de las pérdidas.
- La refrigeración ONAN presenta ventajas en relación a la O&M de la instalación, ya que es más confiable que un sistema ONAF, en el sentido de que no dispone de ventiladores, así como controles asociados. Fundamentalmente requiere de menos mantenimiento.
- Como ventaja adicional del sistema ONAN, podemos nombrar la reducción del ruido, al no disponer de ventiladores. Esta característica es fundamental en entornos en donde se exijan bajos niveles de ruido ambiental.
- La temperatura del punto caliente ( $HST$  o  $T_{HST}$ ), representa el valor de la máxima temperatura que puede alcanzar en cualquier instante, los bobinados de un transformador. Es un indicador del límite térmico, que a su vez limita los estados de carga del transformador.
- La resistencia mecánica del papel es la propiedad que más rápidamente queda afectada por la sollicitación térmica y es la que determina el estado de vida del transformador. La fragilidad del papel, como consecuencia de la degradación mecánica, llevará también al desarrollo de procesos de falla de origen dieléctrico.
- La electrificación estática es un problema que se encuentra directamente asociado con la velocidad del flujo del aceite en el interior del transformador y por lo tanto con la capacidad de la bomba del circuito forzado.
- Se puede conseguir una relajación de la concentración de carga, derivada de la electrificación estática, instalando las bombas en la parte superior de los radiadores, de forma tal de lograr un incremento del camino de circulación del aceite, antes de ingresar nuevamente por la parte inferior del transformador.



- Los modelos de analogía termoeléctrica permiten obtener las temperaturas en tiempo real de los componentes internos de un transformador, el cual posee un sistema de refrigeración ONAN/ONAF, ante distintas condiciones operativas de carga y ambientales.
- En el modelo termoeléctrico simplificado se establecen las temperaturas del nivel superior e inferior del aceite como variables de estado principales, ya que pueden obtenerse directamente de la medición en línea. A partir de éstas se calcula la temperatura del punto caliente.
- Estos modelos permiten determinar la dinámica de los procesos térmicos, internos al transformador. De tal forma, establecen las formulaciones, tanto transitorias como permanentes, de los distintos estados de temperatura.
- Si bien los modelos desarrollados para el análisis térmico son efectivos, debemos destacar que muchas de las estimaciones, en las cuales se basan, son de naturaleza empírica. En tal sentido, se vienen realizando esfuerzos para adaptarlos y mejorarlos, de forma tal de que reflejen con mayor precisión los efectos reales de las temperaturas sobre los componentes del transformador.
- De la mano de lo anterior, se han desarrollado modelos que incorporan los efectos de la contaminación armónica, en la sobretemperatura del punto caliente.

Ingeniería Nova Miron S.A.

**NOVA MIRON**  
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

---

**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 ATENCIÓN PERMANENTE** Cel.: 15 4945 1170 / 71 / 72