

EVALUACION DE UNA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA OBTENER EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN SUMERGIDOS EN ACEITE

H. Cadavid R. - J. Preciado R.

Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle, Cali - Colombia

Resumen— En este trabajo se realiza un estudio comparativo de dos metodologías de calentamiento en transformadores de distribución sumergidos en aceite, las cuales difieren en el tiempo de ejecución y los criterios de decisión. Así, una de ellas está normalizada y exige un tiempo de ejecución de 13 a 20 horas dependiendo de la potencia del transformador y el volumen de aceite, mientras que la otra metodología no está normalizada y emplea un tiempo menor que la anterior. Lo que se busca fundamentalmente con el estudio comparativo es evaluar esta última metodología teniendo en cuenta las bondades que ofrece, pero considerando también las desventajas que tiene.

I. INTRODUCCION

Los transformadores son elementos indispensables dentro de un sistema de potencia, ellos se encargan de elevar o reducir los niveles de tensión y corriente para facilitar la transmisión y distribución de potencia eléctrica.

Por ser máquinas estáticas tienen una alta eficiencia debido a que no poseen rodamientos o problemas de fricción propios de las máquinas rotativas; sin embargo los transformadores generan pérdidas que se evidencian en forma de calor.

Estos dispositivos bajo condiciones de trabajo generan calentamiento en los devanados y en el aceite, dicho calentamiento debe encontrarse entre ciertos rangos admisibles estipulados por normas nacionales e internacionales.

Existen metodologías para determinar el calentamiento en los transformadores, tales como la NTC 316-1998, IEEE C57.12.90-2006 cap II, IEC 60076-2 de 1993 y NBR 5416 – 1997. Todas ellas emplean parámetros similares entre sí.

II. PARÁMETROS TÉRMICOS DEL TRANSFORMADOR

Determinar los puntos donde se presenta mayor concentración de temperatura dentro del transformador, no es tan simple, debido a que la distribución de temperatura no es homogénea. Es por eso que existen diversos modelos matemáticos [1][2], de simulación [3][4][5] y mediciones directas e indirectas [6] para determinarlos.

Los parámetros térmicos del transformador tales como la

elevación de temperatura en el aceite, la elevación en los devanados y la elevación de temperatura del punto más caliente del devanado, se pueden calcular obteniendo el siguiente comportamiento [1]

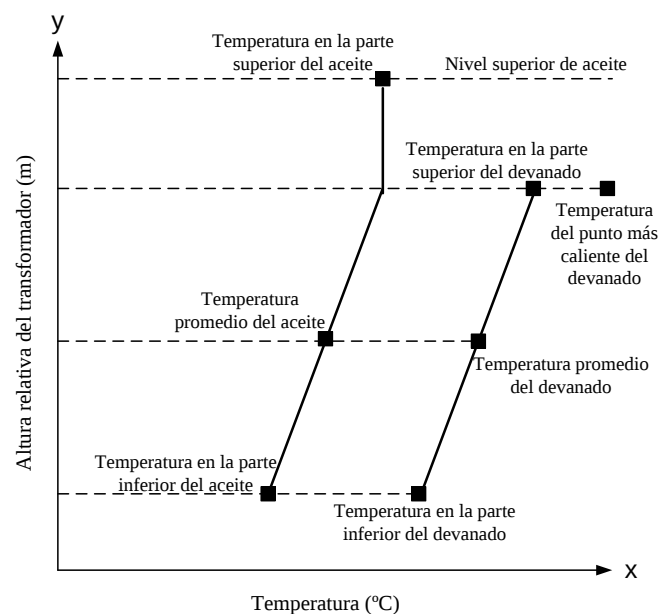


Figura 1. Diagrama de la distribución de temperaturas en el transformador

Como se puede apreciar en la Figura 2, la temperatura del aceite se va incrementando linealmente desde la parte inferior del transformador hasta la parte superior de los devanados. Desde este punto hasta el nivel superior del aceite la temperatura se mantiene constante suponiendo estado estacionario, pero en realidad existe un retardo y este comportamiento no es constante desde la parte superior del devanado hasta la parte superior del aceite.

También es notable que la temperatura de los devanados aumenta en forma lineal desde la parte inferior del devanado hasta la parte superior del mismo, teniendo un aumento con respecto a la temperatura del aceite.

La temperatura del punto más caliente ubicada en la parte superior del devanado tiene un valor mayor a la temperatura promedio del mismo, debido a las pérdidas adicionales que se incrementan en esta parte del devanado. Su ubicación es solo una aproximación para efectos de cálculo [7].

III. METODOLOGIA NORMALIZADA IEEE

El ensayo se inicia energizando el transformador en la derivación que genera la corriente más alta, para obtener las pérdidas totales, hasta que la temperatura del aceite se estabilice, es decir, hasta que la elevación de temperatura del aceite en la parte superior con respecto al ambiente ($\Delta\theta_{TO}$) no varíe más de 1°C durante tres horas consecutivas [8]. Después se aplica la corriente nominal durante una hora, se desenergiza el transformador y se mide la resistencia de cada uno de los devanados, este último paso se debe repetir para cada uno de los arrollamientos. Posteriormente se relaciona la resistencia con la temperatura mediante la ecuación (1) de [8] para poder calcular la temperatura de cada devanado, finalmente mediante un proceso de regresión se obtiene la temperatura de cada devanado justo en el momento de desenergizar el transformador [8].

$$T = \frac{R}{R_o} (T_k + T_o) - T_k \quad (1)$$

Donde

- T : Temperatura de los devanados, correspondiente al valor de resistencia al momento del corte R (en °C)
- T_o : Temperatura de los devanados, correspondiente al valor de resistencia de la prueba de rutina R_o (en °C)
- R_o : Resistencia de la prueba de rutina
- R : Resistencia al momento del corte
- T_k : Constante térmica (234.5°C para devanados en cobre y 225°C para devanados en aluminio)

IV. METODOLOGIA PROPUESTA

Existe la posibilidad de optimizar y reducir el tiempo utilizado en el anterior procedimiento al aplicar la metodología propuesta en [6], En la cual el calentamiento se puede realizar aplicando una corriente constante y aunque el tiempo de estabilización es muy similar al método convencional, es posible aplicar el criterio recomendado por la IEC [9] para reducir el tiempo del ensayo.

El criterio recomendado por la IEC consiste en usar tres lecturas consecutivas de elevación de temperatura en el aceite ($\Delta\theta_{TO1}$, $\Delta\theta_{TO2}$, $\Delta\theta_{TO3}$), distanciadas entre sí un tiempo similar al de la constante de tiempo del aceite [1], para calcular la elevación final de estado estable ($\Delta\theta_U$), de acuerdo con la ecuación (2) de [9]. El ensayo finaliza cuando se cumpla la relación $\Delta\theta_{TO3}/\Delta\theta_U \geq 0,95$.

$$\Delta\theta_U = \frac{(\Delta\theta_{TO2})^2 - (\Delta\theta_{TO1} * \Delta\theta_{TO3})}{2 * \Delta\theta_{TO2} - \Delta\theta_{TO1} - \Delta\theta_{TO3}} \quad (2)$$

El cálculo de la elevación de temperatura de los devanados cambia totalmente en comparación con la metodología

normalizada, debido a que no hay mediciones de resistencia de devanados, tampoco se suministra corriente nominal por una hora y no se aplica la ecuación (1).

En vez de esto el procedimiento de cálculo de la temperatura promedio de los devanados se hace a partir de la medición de las pérdidas y la corriente de carga: este procedimiento se basa en el cambio de las pérdidas con la temperatura tal como lo ilustra la ecuación (3) de [8]:

$$P_{CC(\theta_w)} = P_{i^2R(T_m)} \left(\frac{T_k + \theta_w}{T_k + T_m} \right) + P_{adic(T_m)} \left(\frac{T_k + T_m}{T_k + \theta_w} \right) \quad (3)$$

Donde:

- $P_{CC(\theta_w)}$: Pérdidas de corto circuito que se miden durante el ensayo de elevación de temperatura [W]
- $P_{i^2R(T_m)}$: Pérdidas en los devanados [W]
- T_k : Es la constante térmica de los devanados (234.5 °C para cobre y 225°C para aluminio)
- θ_w : Es la temperatura de los devanados [°C]
- T_m : Es la temperatura de referencia [85 °C]
- $P_{adic(T_m)}$: Son las pérdidas adicionales por flujos de dispersión [W]

La idea con este método consiste en calcular la temperatura promedio en los devanados (θ_w) utilizando un método numérico basado en la teoría de Gauss Seidel [10].

El objetivo básico es despejar (θ_w) (temperatura promedio de los devanados) debido a que se tienen todos los demás elementos de la ecuación. Para ello despejamos la variable (θ_w) que acompaña el primer término de la ecuación por estar en el numerador del factor que multiplica a $P_{i^2R(T_m)}$.

Se determino utilizar cuatro iteraciones y un factor de aceleración de 1,67 a la ecuación (3) [11]. De igual forma se debe corregir la expresión a la corriente nominal mediante la ecuación (4) [8]:

$$P_{CC(\theta_w)} = P_{ccm} \left(\frac{I_n}{I} \right)^2 \quad (4)$$

Donde:

- P_{ccm} : Pérdidas en devanados mas pérdidas adicionales corregidas [W]
- $P_{CC(\theta_w)}$: Pérdidas de corto circuito que se miden durante el ensayo de elevación de temperatura [W]
- I_n : Es la corriente nominal [A]
- I : Es la corriente medida [A]

Para aplicar el método numérico se define una condición inicial que será la iteración cero, es decir, $\theta_w^{(0)}$ con un valor n; en este caso $\theta_w^{(0)} = T_m = 85$ °C para efectos de simplicidad (ver anexo C [11]), por que así se reducirá la ecuación

anterior y todo el factor que acompaña $P_{adic(Tm)}$ será 1. De esta manera es posible calcular la iteración número uno $\theta_w^{(1)}$ reemplazando los valores que ya se tienen.

Una vez obtenido este valor se debe aplicar el respectivo factor de aceleración como sigue [12]:

$$\theta_{w_{acel}}^{(k+1)} = \theta_w^{(k)} - 1.67(\theta_w^{(k+1)} - \theta_w^{(k)}) \quad (5)$$

Donde:

- $\theta_w^{(k)}$: Es la temperatura de los devanados en la iteración (k) [°C]
- $\theta_{w_{acel}}^{(k+1)}$: Es la temperatura de los devanados en la iteración (k+1) con el factor de aceleración [°C]
- $\theta_w^{(k+1)}$: Es la temperatura de los devanados en la iteración (k+1) [°C]

Con el resultado encontrado se calcula la segunda iteración $\theta_w^{(2)}$ y se repite el proceso hasta obtener la tercera y luego la cuarta. Es recomendable registrar varios valores de potencia y corriente de carga para obtener un promedio y así reducir el error por el muestreo del instrumento de medida que se introduce a la hora de realizar el cálculo.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se probaron seis transformadores monofásicos al 100 % de su carga nominal, y un transformador trifásico con cuatro niveles de carga (50%, 70%, 100% y 115%) realizando así diez pruebas de calentamiento. Tales ensayos se realizaron dos veces, los primeros diez aplicando la metodología normalizada y los otros aplicando la metodología propuesta para un total de 20 pruebas de calentamiento realizadas.

Las características de los transformadores probados se muestran a continuación:

TABLA I

CARACTERÍSTICAS DE LOS TRANSFORMADORES PROBADOS

TRANSFORMADORES PROBADOS	CARACTERÍSTICAS NOMINALES	NIVEL DE CARGA (PU)
1	1F, 15 KVA, 13200 V / 246 V	1
2	1F, 15 KVA, 13200 V / 244 V	1
3	1F, 15 KVA, 13200 V / 240 V	1
4	1F, 25 KVA, 13800 V / 240 V	1
5	1F, 50 KVA, 13200 V / 240 V	1
6	1F, 15 KVA, 13200 V / 240 V	1
7	3F, 75 KVA, 13200 V / 214 V	0,5
		0,7
		1,0
		1,15

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas a los siete transformadores indicando en detalle una de ellas:

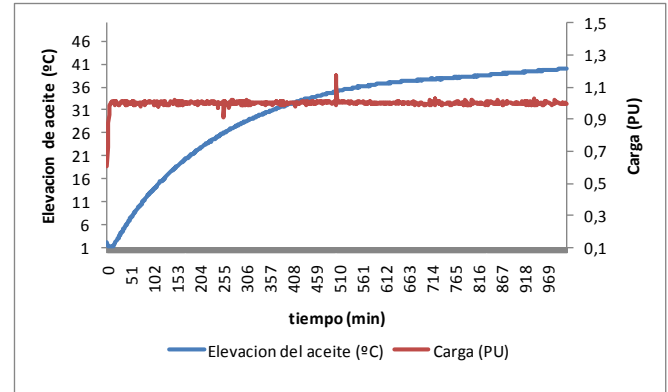


Figura 2. Elevación del aceite y carga del transformador

La elevación de temperatura de equilibrio térmico del aceite fue 39,991 °C y se alcanzó luego de 1013 minutos de prueba (16.88 horas). Una vez logrado esto se energizó por una hora el transformador con corriente nominal para posteriormente medir la resistencia de los devanados luego de la desconexión, obteniendo así la curva de enfriamiento de los mismos, con la relación resistencia – temperatura como lo muestran las Figuras 3 y 4.

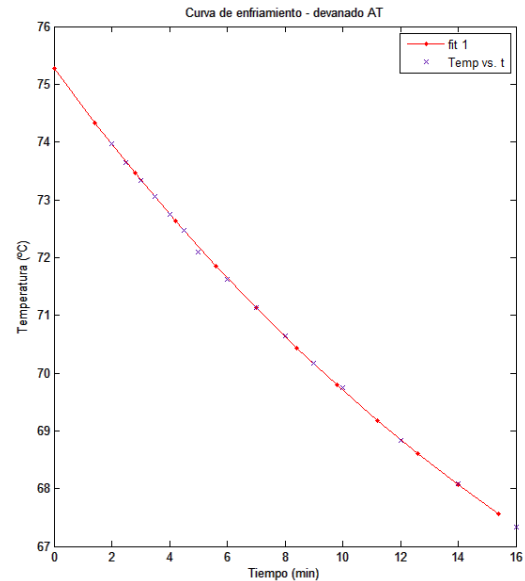


Figura 3. Curva obtenida de la regresión realizada en Matlab (AT)

La temperatura de equilibrio térmico del devanado de alta tensión fue de 75.266 °C al momento del corte de suministro de corriente nominal (tiempo t = 0).

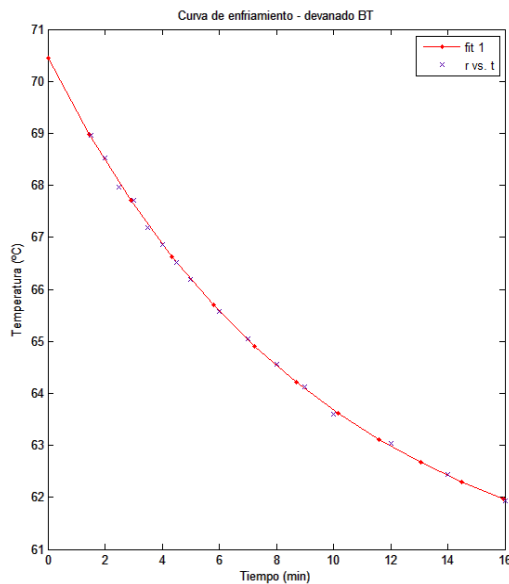


Figura 4. Curva obtenida de la regresión realizada en Matlab (BT)

Del mismo modo la temperatura de equilibrio térmico del devanado de baja tensión fue de 70.448 °C al momento del corte de suministro de corriente nominal (tiempo $t = 0$).

A partir de los resultados obtenidos es posible calcular la temperatura promedio de los dos devanados que para este caso fue de 72.857 °C.

Una vez enfriado el transformador, éste se probó nuevamente usando la metodología propuesta, para lo cual se obtuvieron tres lecturas de elevación de temperatura del aceite, distanciadas entre sí un tiempo similar al de la constante de tiempo del aceite (3.0 horas) [1].

$$\Delta\theta_{TO2} = 56,094 \text{ }^{\circ}\text{C (minuto 360)}$$

$$\Delta\theta_{TO3} = 60,460 \text{ }^{\circ}\text{C (minuto 540)}$$

$$\Delta\theta_{TO4} = 62,935 \text{ }^{\circ}\text{C (minuto 720)}$$

Aplicando la ecuación (2) se obtuvo la elevación final del aceite ($\Delta\theta_U$) que fue 38,426 °C teniendo una variación de 1,565 °C con respecto a la elevación de temperatura de equilibrio térmico del aceite obtenida con la metodología normalizada. Este error es aceptable considerando que el sistema de medición presenta una tolerancia total de $\pm 2.7^{\circ}\text{C}$ [13]. Se debe aclarar que se tomaron cuatro valores de elevación de temperatura del aceite para aplicar el criterio debido a que con los primeros tres no se cumplió la relación $\Delta\theta_{TO3}/\Delta\theta_U \geq 0,95$. De esta forma se utilizó un tiempo parcial de 720 minutos (12 horas) ahorrándose 293 minutos (4,88 horas) respecto al tiempo utilizado bajo la metodología normalizada, esto equivale a un ahorro del 28,92 % en el tiempo de ejecución para obtener la elevación de la temperatura en el aceite.

Una vez obtenida la elevación del aceite, se revisó el registro de corriente y potencia para con éstos datos realizar el proceso matemático y así calcular la temperatura promedio

de los devanados y posteriormente su elevación. En el anexo C de [11] se muestra a manera de ejemplo el proceso de cálculo matemático para obtener dicha temperatura en un transformador monofásico.

La temperatura de los devanados fue 87,20 °C, este valor corresponde a la temperatura promedio de los dos devanados del transformador, debido a que esta metodología supone que la distribución de la temperatura es homogénea. Tal valor obtenido varía 14,34 °C con respecto a la temperatura promedio de los devanados obtenida con la metodología normalizada. Este error NO es aceptable considerando que la tolerancia máxima calculada es $\pm 1,36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [11].

A continuación se muestra un resumen con los resultados de las pruebas realizadas en todos los transformadores.

TABLA II

RESULTADOS DE PRUEBAS REALIZADAS (ELEVACION DE ACEITE)

TRANS/ PROBADO	NIVEL DE CARGA [PU]	PROCEDI/ IEEE	PROCEDI/ PROPUESTO	VARIACIÓ N [°C]	AHORRO DE TIEMPO [%]
		$\Delta\theta_{OIL}$ [°C]	$\Delta\theta_{OIL}$ [°C]		
1	1	31,290	33,186	1,896	25,773
2	1	40,109	41,473	1,364	17,241
3	1	42,913	43,051	0,138	12,302
4	1	42,407	41,408	0,999	30,164
5	1	48,220	48,512	0,292	35,656
6	1	39,991	38,426	1,565	28,923
7	0,5	21,562	20,392	1,170	38,636
	0,7	28,214	28,857	0,643	40,659
	1,0	42,301	42,898	0,597	35,714
	1,15	50,312	49,624	0,688	41,621

TABLA III

RESULTADOS DE PRUEBAS REALIZADAS (ELEVACION - DEVANADOS)

TRANS/ PROBADO	NIVEL DE CARGA [PU]	PROCEDI/ IEEE	PROCEDI/ PROPUESTO	VARIACIÓ N [°C]
		$\Delta\theta_w$ PROMEDIO [°C]	$\Delta\theta_w$ PROMEDIO [°C]	
1	1	11,936	15,700	3,764
2	1	5,624	11,900	6,276
3	1	5,145	12,600	7,455
4	1	6,904	12,900	5,996
5	1	5,855	10,900	5,045
6	1	5,301	21,100	15,799
7	0,5	2,517	20,000	17,483
	0,7	8,214	24,500	16,286
	1,0	14,292	13,300	0,992
	1,15	14,815	3,600	11,215

Cabe aclarar que la tabla II hace referencia a la elevación del aceite sobre el ambiente y la tabla III a la elevación promedio de los devanados sobre el aceite.

Los ensayos de calentamiento realizados para obtener la elevación del aceite mostraron que efectivamente la metodología propuesta cumple el objetivo planteado de obtener la elevación del líquido refrigerante con un error admisible en un tiempo menor. Es posible notar que para transformadores de igual potencia probados con un mismo nivel de carga, la temperatura del aceite no es igual tanto en una metodología como en otra. Esto se debe a que los transformadores pesen a tener iguales potencias, sus tamaños

son distintos, de tal manera que la disipación del calor no se produce de la misma forma y el nivel de aceite también cambia.

Es posible observar como la elevación de temperatura del aceite aumenta a medida que el transformador trifásico es probado con niveles de carga más altos, esto muestra que un transformador cargado por encima de lo nominal manejará temperaturas mayores y por consiguiente se envejecerá más rápidamente en comparación con un transformador cargado nominalmente.

Un hecho para resaltar en el procesamiento de los datos fue que al aplicar la metodología propuesta en los transformadores monofásicos, éstos no cumplieron el criterio $\Delta\Theta_{TO3}/\Delta\Theta_U \geq 0,95$ con los tres primeros valores de elevación del aceite, es decir, se necesitó tomar un cuarto valor. Por otra parte el transformador trifásico si cumplió el criterio antes citado con los tres primeros valores de elevación del aceite para los cuatro niveles de carga.

A partir de los resultados obtenidos, es posible afirmar que la metodología propuesta es valida para determinar la elevación de temperatura del aceite en transformadores de distribución con tipo de refrigeración ONAN.

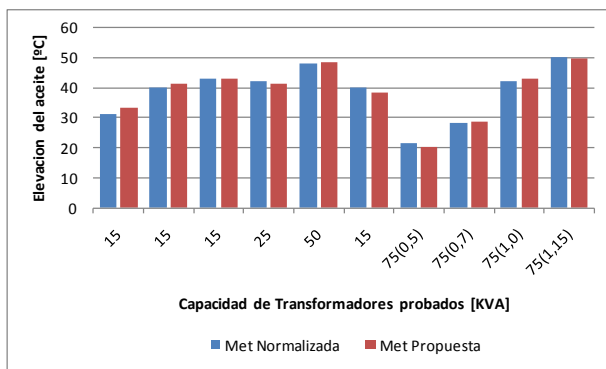


Figura 5. Comparación de las elevaciones del aceite

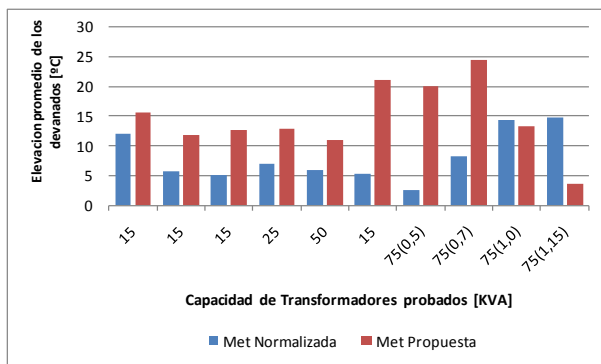


Figura 6. Comparación de las elevaciones en los devanados

CONCLUSIONES

Se evaluó la metodología propuesta (MP) en [6] para obtener la elevación del aceite y de los devanados en transformadores de distribución sumergidos en aceite, comparándola con la metodología definida en la norma IEEE [8]. Se tuvo en cuenta su alcance, considerando también las bondades que la hacen atractiva pero resaltando de igual forma las desventajas que ofrece.

La MP está justificada principalmente en la reducción del tiempo de prueba. Para la evaluación de la MP se tuvieron en cuenta los siguientes factores: la constante de tiempo del aceite, el tipo de refrigeración y la cargabilidad del transformador, el material de los devanados, y el cambio de las pérdidas con la temperatura, así como también los criterios definidos por la IEC [9].

Una de las principales falencias de la MP es que supone que la distribución de la temperatura es homogénea en los devanados, pero tal aseveración no es cierta. Por esta razón el cálculo de la temperatura promedio de los devanados bajo la MP no fue validado, debido a que los errores generados superan la tolerancia máxima establecida.

Una falencia notable de las dos metodologías es que no consideran plenamente el calentamiento en el núcleo a la hora de calcular la temperatura en los devanados. Por un lado la MP lo desprecia totalmente basándose en el hecho de que dicha temperatura está asociada a un régimen de trabajo bajo carga y las pérdidas en el núcleo se basan en un régimen de trabajo sin carga. Pero este argumento no es válido [14] ya que el calentamiento en el núcleo si influye sobre la temperatura de los devanados por la elevación de temperatura del aceite sobre el ambiente, debido a que ahí se consideran las pérdidas totales y dentro de éstas están las de vacío. La metodología normalizada por su parte no lo desprecia pero tampoco lo considera plenamente, debido a que cuando se energiza por una hora a corriente nominal para luego medir la resistencia de los devanados, el aceite tiende a enfriarse y el efecto del calentamiento del núcleo comienza a perderse. Esto se vuelve más crítico cuando se requieren medir la resistencia de varios devanados.

La MP tiene limitaciones de aplicación debido a que fue validada en transformadores de distribución con refrigeración ONAN. Para otro tipo de refrigeraciones no fue validada y en principio no se podría decir que aplica para transformadores con refrigeraciones forzadas (ONAF, OFAF, ODAF etc). A no ser que se defina una nueva constante de tiempo del aceite para transformadores con este tipo de refrigeraciones.

Se debe tener en cuenta que el cálculo de la temperatura de los devanados bajo la MP solo es aplicable cuando el material de éstos es (cobre / cobre), o (aluminio / aluminio), debido a

que si el transformador presenta devanados de distinto material la expresión que relaciona el cambio de las pérdidas con la temperatura no sería válida debido a que ésta relaciona las pérdidas de todos los devanados sin discriminarlos.

Cabe mencionar que los procedimientos en donde se considera la medición de la resistencia de los devanados mientras éstos se enfrían ofrecen la posibilidad de estimar la constante de tiempo de los mismos, pero debido a que la MP obtiene la temperatura de los devanados a partir de valores de corriente y potencia no es posible calcular dicha constante, lo que le hace perder un valor agregado.

Por otra parte se concluye que el procedimiento de obtención de la elevación de temperatura del aceite bajo la MP si fue validado debido a que las variaciones en las medidas no superaron el error establecido por el sistema de medición [13].

A partir de lo mencionado anteriormente es recomendable aplicar la MP para obtener la elevación del aceite y aplicar la metodología normalizada para obtener la elevación de los devanados, combinando las dos metodologías para obtener confiabilidad en los resultados y ahorro de tiempo en la prueba.

REFERENCIAS

- [1] INTERNATIONAL STANDARD. Loading guide for oil-immersed power transformer. Switzerland.: IEC, 2005. 60p. IEC 60076-7 / 2005.
- [2] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. Guide for loading mineral oil-immersed overhead-type distribution transformer with 55°C or 65°C average winding rise. New York.: ANSI, 1995. 108p. IEEE Std C57-91-1995 Cor-2002.
- [3] D. Susa, M. Lehtonen, H. Nordman. Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2005.
- [4] M. Hell, P. Costa, F. Gomide. Recurrent neurofuzzy network in thermal modeling of power transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007.
- [5] J. Sturgess. Using finite-element models to test power transformers can prevent embarrassing failures. IEE Power Engineer, April 2005
- [6] Michael E. Muñoz. Metodología para determinar la carga en transformadores de distribución. Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica - Universidad del Valle – Colombia 2008
- [7] L. Pierce. An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding. IEEE. Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, July 1992.
- [8] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE Standard Test Code for Liquid - Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. New York.: ANSI, 2007. 82p. IEEE Std C57.12.90-2006
- [9] COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACION ELECTROTECNICA, CENELEC. Transformadores de potencia, Parte 2: Calentamiento. 3 UNE - EN 60076 - 2. [Norma técnica]. Madrid, España : AENOR, Junio 1998. p. 29.
- [10] Chapra C. Canale P. Métodos numéricos para ingenieros. - 4ed. McGraw-Hill Book Company, 2003
- [11] Julián A. Preciado. Evaluación De Una Metodología Propuesta Para Obtener El Comportamiento Térmico En Transformadores De Distribución Sumergidos En Aceite. Tesis de Pregrado en Ingeniería Eléctrica - Universidad del Valle – Colombia 2009
- [12] Grainger John J. & Stevenson William D. ANALISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA, McGraw-Hill
- [13] J. Mejía, E. Vásquez. Automatización de las pruebas de temperatura en equipos de distribución eléctricos. Tesis de pregrado - Universidad del Valle. Colombia, 2006.
- [14] Taheri, Sh. Vahedi, A. Gholami, A. Taheri, H. Estimation of hot spot temperature in distribution transformer considering core design using FEM - Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International.