



Metodología para determinar la incertidumbre en la medición de pérdidas eléctricas para transformadores de distribución serie 15 KV

Methodology to determine the uncertainty in the measurement of electrical losses for distribution transformers series 15 KV

Ricardo Andrés Valencia Marín¹, Carlos Alberto Avendaño Avendaño²

Fecha de recepción: Agosto 28 de 2015

Fecha de aceptación: Septiembre 25 de 2015

Como citar: Valencia, R., & Avendaño, C. (2015). Metodología para determinar la incertidumbre en la medición de pérdidas eléctricas para transformadores de distribución serie 15 kV. Revista Tecnura, 19 (CITIE), 33-40. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.ICE.a03>

Resumen

Este documento pretende documentar una metodología para la determinación de la incertidumbre en la medición de pérdidas eléctricas para transformadores de distribución tipo seco clase H y sumergidos en líquido refrigerante serie 15 kV. La metodología a su vez permite la evaluación de conformidad dentro del sistema de medición que pueda existir en los laboratorios de ensayos de rutina para registrar las pérdidas eléctricas en los certificados de conformidad de pruebas con la incertidumbre asociada en la medición. Este trabajo abordará los aspectos técnicos, regulatorios y normativos nacionales e internacionales que deben ser implementados, analizados y evaluados de acuerdo con la dinámica actual que se presenta en el sector.

Palabras claves: Desviación sistemática e incertidumbre, pérdidas eléctricas, función modelo para pérdidas eléctricas, sistemas de medida, mesurando.

Abstract

This document tries to establish, to implement and to document a methodology for the determination of the uncertainty in the measurement of electrical losses for distribution transformers dry type class H and plunged in cooling liquid series 15 kV. Likewise, It allows the evaluation of conformity inside the system of measurement that could to exist in the laboratories of essays of routine on having registered the electrical losses in the certificates of conformity of tests with the uncertainty associated in the measurement. This work will approach the technical, regulative and normativenational and international aspects that must be implemented, analysed and evaluated in agreement with the current dynamics that one presents in the electrical sector.

Keywords: Systematic deviation and uncertainty, electrical losses, model function for electrical losses, measuring systems, measurand.

¹ Ingeniero Eléctrico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contacto: r.valenciam@outlook.com.

¹ Ingeniero Electricista, Docente del proyecto Curricular de Tecnología En Electricidad e Ingeniería Eléctrica por Ciclos, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contacto: calitoave@gmail.com.

INTRODUCCIÓN

Los constantes cambios exigidos a nivel regulatorio, técnico, metrológico y de calidad entre otros, generan y obligan a los laboratorios de ensayos eléctricos a demostrar que los resultados proporcionados por sus mediciones sean confiables y veraces. Basándose en esta premisa se identifica la necesidad de profundizar en la implementación de una metodología para determinar la incertidumbre en la medición de pérdidas eléctricas en transformadores de distribución bajo los ensayos de vacío y cortocircuito. Para la construcción de dicha metodología se hizo necesario la definición del método del ensayo, la descripción de los equipos de medición a utilizar y los factores de la calidad de potencia que pueden afectar los resultados de las mediciones.

Para este estudio se reconoce que las pérdidas eléctricas de los transformadores de distribución, son el objeto de garantía y penalización en la mayoría de los contratos, además que son importantes en la evaluación total del servicio y la eficiencia, así como en el apoyo del desarrollo sostenible con menores emisiones de CO₂ equivalentes y con un menor nivel de ruido.

En la etapa final de este estudio, se define una fase de evaluación y expresión de la incertidumbre en la medición de pérdidas eléctricas proporcionando una indicación cuantitativa de la calidad del resultado mediante la guía GTC 51 para el cálculo de una incertidumbre estándar combinada y la norma IEC 60076-19 de 2013 para la evaluación y expresión de dicha incertidumbre acordando la expresión de un mesurando de pérdidas en vacío y con carga como principales funciones modelo.

METODOLOGÍA

Se llevaron a cabo dos etapas principales en la ejecución de la metodología para determinar la incertidumbre en la medición de pérdidas eléctricas para transformadores, en las que se relaciona un estudio descriptivo con respecto a la instalación en la consola de prueba, evaluando el comportamiento y las tolerancias máximas permitidas de las variables de los ensayos de rutina de vacío o circuito abierto y cortocircuito acorde a la norma NTC 1031 y NTC 1005 respectivamente, así mismo como se establece en la Figura 1, se define en la segunda etapa un estudio experimental,

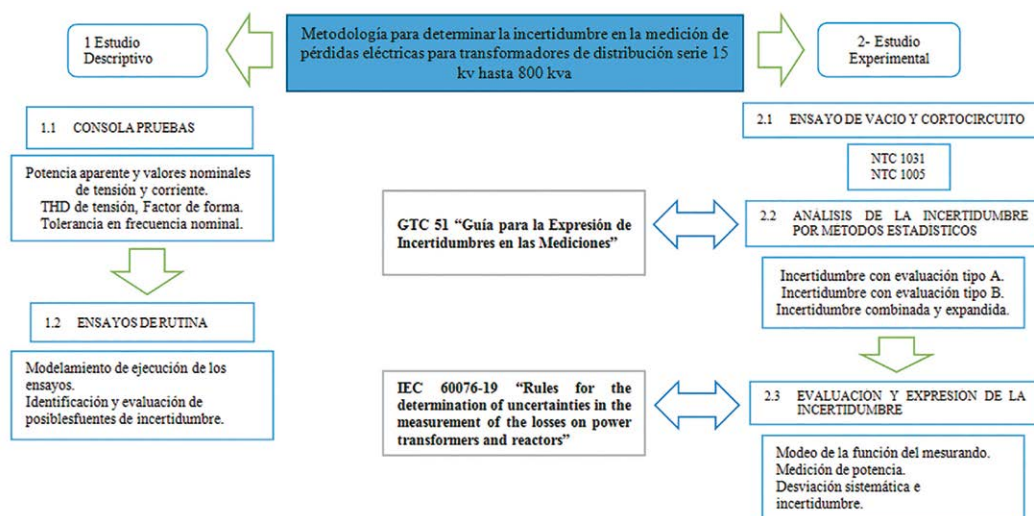


Figura 1. Diagrama de bloques para la metodología aplicada.

Fuente: elaboración propia.

en el cual se realizó la ejecución de los ensayos de rutina para la medición de pérdidas en toda una población establecida de transformadores de distribución, la cual tuvo como fin, establecer un histórico de pruebas para calcular una desviación estándar en la medición. Dicha desviación se puede expresar como una incertidumbre asociada a la medición, según lo establece el numeral 8 la Guía Técnica Colombiana GTC 51 como procedimiento específico. Cabe mencionar que para dicho procedimiento, los efectos que originan la incertidumbre en la medición deben ser de tipo aleatorio para una distribución normal o gaussiana.

Posteriormente, se dio paso a la evaluación y expresión de la incertidumbre en la medición de pérdidas eléctricas mediante las principales funciones modelo que establece la norma internacional IEC 60076-19 "Rules for the Determination of Uncertainties in the Measurement of the Losses on Power Transformers and Reactors", las cuales tienen como fin, asegurar un análisis más preciso con respecto a la desviación sistemática e incertidumbre de los equipos, según el tipo o sistema de medida que se utiliza.

Estudio Descriptivo

Este tipo de investigación cuantitativa se apoyó en la descripción general del sistema eléctrico

requerido para los ensayos de rutina, de vacío y cortocircuito; el cual se muestra en la Figura 2.

Se analiza el comportamiento en cinco puntos necesarios para el control y verificación de las distintas variables eléctricas controladas y utilizadas durante la medición, sometidos bajo ensayo, los cuales son:

Punto 1: Potencia aparente para determinar las capacidades máximas en la alimentación de corriente de cortocircuito de los transformadores sometidos bajo ensayo, con el fin de registrar la medición de pérdidas eléctricas con carga. Cabe agregar que dicha corriente de cortocircuito debe ser mayor al 25% de la corriente nominal del ensayo, con el fin de dar cumplimiento al numeral 3.5 de la norma NTC 1005 (primera actualización) para extrapolar y corregir los valores de tensión y pérdidas con carga:

Punto 2: Nivel de armónicos y THD de tensión, donde se recomienda la verificación de los límites permisibles establecidos por IEEE-519-2014 con relación a los valores de cada uno de los armónicos individuales de tensión, como los valores de distorsión armónica de acuerdo con el nivel de tensión y el tamaño relativo de la consola o instalación de la prueba. El registro de estos valores se debe hacer en el punto de acople común (PCC, por sus siglas en inglés), en la Figura 3 se muestra gráficamente este punto.

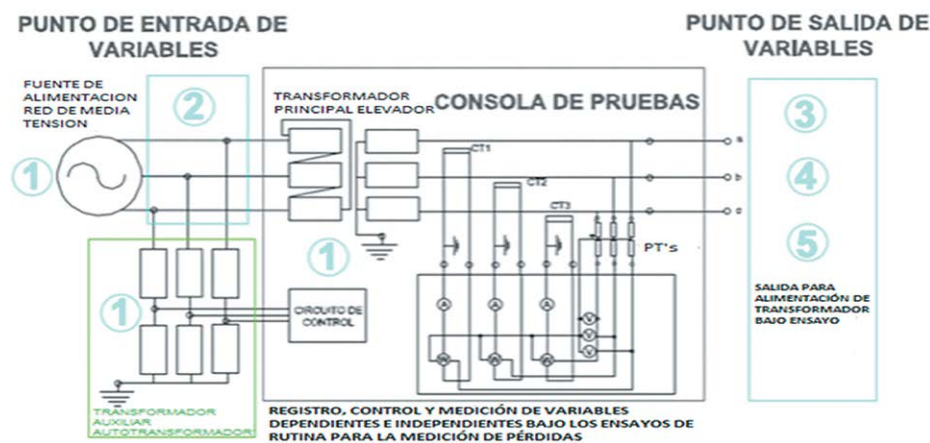


Figura 2. Instalación de prueba necesaria para los ensayos de rutina en la medición de pérdidas eléctricas

Fuente: elaboración propia.

Punto 3: Facto de forma, debido a que la característica distorsionada de la corriente sin carga de un transformador, puede hacer que la tensión del generador presente ondas distorsionadas (de factor de forma diferente de 1.11) y pérdidas diferentes de las que corresponden a una onda sinusoidal (para factores de forma mayor que 1.11 las pérdidas disminuyen y para factores de forma menor que 1.11 aumentan) fenómeno descrito en NTC 1031, 1998. Se pretendió entonces, en este caso tomar el registro de los valores medios y valores eficaces o RMS de tensión a una frecuencia nominal de 60 Hz en la salida trifásica de la instalación o consola de pruebas.

Se recomienda dar cumplimiento que la diferencia en las lecturas registradas de tensión RMS y tensión pico estén dentro del 3%, debido a que el numeral 10.5 de la norma IEC 60076-1 establece que, *“The test voltage wave shape is satisfactory if the readings U' and U are equal with in 3%. If the difference between voltmeter readings is larger than 3% validity of the test is subject to agreement”*. (IEC 60076-1, 2000, p.65).

Punto 4 y 5: Frecuencia nominal, valores nominales de tensión y corriente en la instalación o consola de prueba para los ensayos de rutina, con el fin de asegurar y evaluar la tolerancia máxima establecida en el numeral 4.1.11 de la norma NTC 1031, para los respectivos ensayos de rutina de vacío y cortocircuito. Se recomienda que durante el ensayo de vacío del transformador se verifique la frecuencia al valor indicado del valor de la frecuencia nominal

del transformador bajo prueba. (NTC 1031, 1998, p.4). Es importante que la tensión o la corriente de prueba se ajusten al valor de tensión o de corriente nominal del transformador bajo ensayo.

En caso de disponer de un sistema de medida indirecto debido al uso de transformadores de medida, se considera necesario tener en cuenta la revisión de la clasificación, exactitud y especificación de dichos transformadores de corriente y de tensión según la categoría de laboratorio o campo de prueba definidos por NTC 2743.

El estudio descriptivo permitió a la vez, establecer el modelo necesario para el procedimiento general de la ejecución de los ensayos de vacío y cortocircuito para la medición de pérdidas eléctricas con el fin de estimar las posibles fuentes de incertidumbre, teniendo en cuenta las variables dependientes y/o independientes a controlar durante el proceso de medida según la NTC 1031 “Ensayos para la Determinación de Pérdidas y Corriente sin Carga” y NTC 1005 “Determinación de la Tensión de Cortocircuito”.

Esta etapa del estudio de igual forma, permitió identificar las fortalezas y las debilidades que se pueden presentar en la metodología de acuerdo al sistema de medida, al método de ensayo utilizado y a la clase de equipos de medición.

Estudio Experimental

Por otra parte, la investigación aportó con relación al cálculo de la incertidumbre, la aplicación

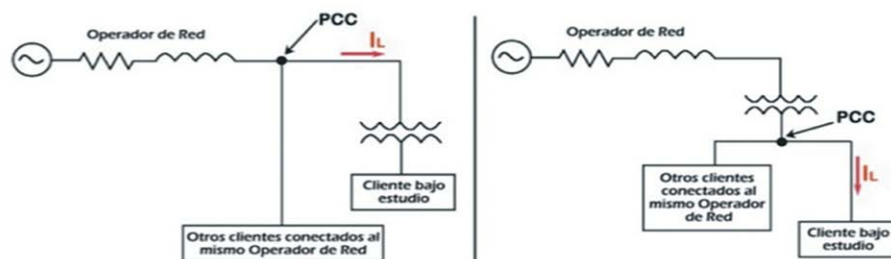


Figura 3. Visualización del punto de acople común (PCC).

Fuente: elaboración propia.

de un procedimiento específico acorde a la Guía Técnica Colombiana GTC 51 “Guía para la Expresión de Incertidumbre en las Mediciones”, con el fin de evaluar y expresar dicha incertidumbre con una evaluación de tipo A (evaluación que se pueden determinar exclusivamente a partir del análisis estadístico de un conjunto de observaciones individuales) y de tipo B (evaluación que proviene de una fuente externa, ajena a las posibles que se puedan llevar a cabo en el laboratorio), con el fin de obtener una incertidumbre estándar combinada, según se establece en el numeral 5.1.2 de dicha guía GTC 51.

El resultado se denomina incertidumbre estándar combinada presentada como uc donde las incertidumbres individuales calculadas con las evaluaciones de tipo A o de tipo B se pueden combinar de forma válida mediante la “raíz de la suma de los cuadrados” o “raíz cuadrada media” con respecto a las incertidumbres individuales de cada uno de los equipos de medida obtenidos por medio de certificados de calibración, tal como se relaciona a continuación con la ecuación (1).

$$uc = uc = \sqrt{u(V)^2 + u(I)^2 + u(W)^2 + u(PA)^2 + u(PB)^2} \quad (1)$$

Donde,

uc , se define como *Incertidumbre estándar combinada*.

$u(V)$, se define como la incertidumbre estándar de medición del voltímetro.

$u(I)$, se define como la incertidumbre estándar de medición del amperímetro.

$u(W)$, se define como la incertidumbre estándar de medición del vatímetro.

$u(PA)$, se define como incertidumbre asociada a la medición de pérdidas con evaluación de tipo A.

$u(PB)$, se define como incertidumbre asociada a la medición de pérdidas con evaluación de tipo B.

Cabe agregar que en la expresión de incertidumbre se debe agregar un factor K de cobertura (generalmente $K=2$ para un 95% de nivel de confianza) con el fin de obtener una incertidumbre expandida, donde se tiene como propósito, establecer un intervalo en el que se espera abarcar una fracción grande de la distribución de los valores, los cuales en este caso puedan ser atribuidos al mesurando P para el caso de medición de pérdidas eléctricas en vacío o con carga. La incertidumbre típica de medida se determinó conforme al numeral 8 de la GTC 51.

Finalmente con el procedimiento específico de cálculo de una incertidumbre expandida en toda una población de transformadores de distribución medidos bajo ensayos, es importante evaluar y expresar dicha incertidumbre mediante el modelo de las funciones que establece la norma internacional IEC 60076-19 para asegurar un cálculo de incertidumbre más preciso, según el sistema de medida que se defina en el laboratorio o campo de prueba y según el método de ensayo que se tenga definido para la medición de pérdidas eléctricas.

Modelo de función principal en expresión como mesurando para pérdidas sin carga o vacío:

El modelo funcional para el ensayo de vacío se muestra en la ecuación (2).

$$P_{NLL} = K_{CN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_C}{100}} \times K_{VN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_V}{100}} \times \frac{P_W}{1 - (\Delta_{\varphi V} - \Delta_{\varphi C}) \tan \varphi} \times \left[\frac{U_N}{K_{VN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_V}{100}} U_M} \right]^n \times \left(1 + \frac{U_{avg} - U_{rms}}{U_{avg}} \right) \quad (2)$$

En la cual;

$K_{CN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_C}{100}}$, es el parámetro asociado al error de relación del transformador de corriente.

Donde, K_{cn} es la relación de transformación o la escala correspondiente del transformador de corriente (CT) asignada en la medición de corriente de vacío durante el ensayo. Y ε_c es el respectivo error de transformación registrado por el transformador de corriente (CT). ε_c normalmente es registrado en certificados de calibración, por lo general puede llegar a ser despreciable dependiendo de la clase de exactitud del transformador de medida (CT).

$K_{VN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_V}{100}}$, es el parámetro asociado al error de relación del transformador de tensión.

Donde, K_{vN} es la relación de transformación o la escala correspondiente del transformador de tensión (PT) asignada en la medición y registro de tensión nominal del ensayo. Y ε_v es el respectivo error de transformación registrado por el transformador de tensión (PT). ε_v normalmente es registrado en certificados de calibración, por lo general puede llegar a ser despreciable dependiendo de la clase de exactitud del transformador de medida (PT).

$\frac{1}{1 - (\Delta_{\phi V} - \Delta_{\phi C}) \tan \phi}$, es el parámetro asociado a la corrección de potencia.

Donde el desplazamiento de fase de los transformadores de medida (CT y PT) $1 - (\Delta_{\phi V} - \Delta_{\phi C}) \tan \phi$. El ángulo ϕ , es determinado como el ángulo de fase entre la tensión y corriente (ver ecuación 3).

$\left[\frac{U_N}{K_{VN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_V}{100}} U_M} \right]^n$, es el parámetro asociado a la tensión de medida.

Donde el exponente n está asociado con el comportamiento no lineal de las pérdidas en vacío. Se asume un valor $n = 2$, debido a que la densidad del flujo magnético que circula en el hierro del núcleo, aumenta proporcionalmente al cuadrado de la

tensión nominal aplicada del ensayo de vacío. Se tiene U_N como la tensión nominal del ensayo y U_M como la tensión medida y registrada del ensayo.

$\left(1 + \frac{U_{avg} - U_{rms}}{U_{avg}} \right)$, influencia de la distorsión de la forma de onda de tensión sobre las pérdidas en vacío.

Donde U_{avg} es la indicación del valor medio de la tensión y U_{rms} es la indicación de su valor eficaz.

Considerándose como el cálculo principal dentro de dicha función de mesurando para pérdidas en vacío, se tiene el ángulo de fase entre tensión y corriente ϕ (ver ecuación (3)), el cual no solo relaciona los parámetros de potencia activa P_w registrado por el vatímetro, tensión U_M y corriente medida I_M durante el ensayo de vacío, sino también el ángulo de desplazamiento de fase de los transformadores de medida (PT y CT) $\Delta_{\phi V}$, $\Delta_{\phi C}$.

$$\varphi = \varphi_M - \Delta_{\phi V} + \Delta_{\phi C} = \cos^{-1} \left(\frac{P_W}{I_M U_M} \right) - \Delta_{\phi V} + \Delta_{\phi C} \quad (3)$$

Con relación a la estimación de la incertidumbre en pérdidas en vacío se referencia la norma internacional IEC 60076-19, con el fin de obtener un balance general de contribución de incertidumbre en la medida, el cual es determinado por el cálculo de una incertidumbre estándar combinada y expandida. Es importante aclarar que se podría clasificar como fuentes posibles de incertidumbre para la medición de pérdidas en vacío cuando el factor de potencia es mayor a 0,2. y cuando las indicaciones de los voltímetros en valores rms y valores medios están dentro del 3% de diferencia.

Modelo de función principal en expresión como mesurando para pérdidas con carga:

El modelo funcional para el ensayo de corto circuito se muestra en la ecuación.

$$P_2 = K_{CN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_C}{100}} \times K_{VN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_V}{100}} \times \frac{P_W}{1 - (\Delta_{\phi V} - \Delta_{\phi C}) \tan \phi} \times \left[\frac{I_N}{K_{CN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_C}{100}} I_M} \right]^2 \quad (4)$$

En la cual:

$\left[\frac{I_N}{K_{CN} \frac{1}{1+\frac{\varepsilon_C}{100}} I_M} \right]^2$, es el parámetro asociado a la corriente medida efectiva (I_M) durante el ensayo con relación a la corriente de referencia (I_N) a la cual el transformador debe ser sometido. Se tiene en cuenta ε_C definido como el error de relación de transformación del transformador de medida (CT), el cual puede ser despreciable en la mayoría de los casos, así mismo se tiene K_{CN} definido como la escala correspondiente del transformador de medida (CT), la cual fue utilizada como la escala más adecuada para la medición.

De igual manera, se registra el cálculo principal del ángulo de fase entre la tensión y la corriente φ medida durante el ensayo de cortocircuito (ver ecuación (5)), donde se relacionan los datos registrados de potencia, tensión, corriente y los ángulos de desplazamiento de fase de los transformadores de medida (CT y PT) $\Delta_{\varphi V}$, $\Delta_{\varphi C}$.

$$\varphi = \varphi_M - \Delta_{\varphi V} + \Delta_{\varphi C} = \cos^{-1} \left(\frac{P_W}{I_M U_M} \right) - \Delta_{\varphi V} + \Delta_{\varphi C} \quad (3)$$

Se define que las pérdidas con carga medidas y registradas durante el ensayo de cortocircuito P_2 están constituidas por las pérdidas $I^2 R$ (pérdidas por efecto Joule) y por pérdidas adicionales P_{a2} , por tanto, la relación entre estos elementos con respecto a la corriente nominal o de referencia del ensayo I_N se tiene mediante la ecuación (6).

$$P_2 = I_N^2 R_2 + P_{a2} \quad (6)$$

Donde, R_2 hace referencia a la resistencia ohmica de los devanados del transformador, por tanto es necesario asociar la incertidumbre del equipo de medida de resistencia (micro-ohmímetro) como u_{R2} . Con relación a las pérdidas adicionales referenciadas P_{ar} , se asocia u_{θ_2} como incertidumbre del sensor de temperatura al registrar θ_2 como temperatura del transformador bajo ensayo. La ecuación (7) muestra las pérdidas totales con carga a la temperatura de referencia la cual es tomada del anexo E de IEC 60076-1:2011.

$$P_{LL} = I_N^2 \times R_r \times P_{ar} = I_N^2 R_2 \frac{t + \theta_r}{t + \theta_2} \times u_{R2} + P_{a2} \frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} \times u_{\theta_2} \quad (7)$$

Donde, $\frac{t + \theta_r}{t + \theta_2}$ y $\frac{t + \theta_2}{t + \theta_r}$ tienen como fin el cálculo de la resistencia a referenciar por medio de un factor de corrección por temperatura generalmente con $\theta_r = 85^\circ\text{C}$ para transformadores de distribución sumergidos en líquido refrigerante y $\theta_r = 145^\circ\text{C}$ para tipo seco abierto clase H, así mismo, por medio de un coeficiente térmico t para devanados en cobre con $t = 234.5^\circ\text{C}$ y para devanados en aluminio con $t = 225^\circ\text{C}$ según sea el caso. θ_{r2} se define como la temperatura del ensayo, la cual para dar cumplimiento de las condiciones establecidas por la norma NTC e IEC 60076-1, se debe registrar la medición de la temperatura de los devanados antes y después del ensayo para el caso de los transformadores tipo seco y el registro de la temperatura del aceite o del tanque principal del transformador en caso de los transformadores sumergidos en líquido refrigerante.

De igual manera la resistencia R_r se referencia a una temperatura θ_r (ecuación (8)), por tanto:

$$R_r = R_2 \frac{t + \theta_r}{t + \theta_2} \quad (8)$$

Así mismo, las pérdidas adicionales a una temperatura de referencia están definidas por la ecuación (9).

$$P_{ar} = P_{a2} \frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} \quad (9)$$

En cuanto al balance general como atribución a la incertidumbre en la medición de pérdidas con carga bajo el ensayo de cortocircuito, se referencia en la tabla 1 de IEC 60076-19 para un cálculo de una incertidumbre estándar combinada y expandida, teniendo en cuenta cada uno de los equipos utilizados con su incertidumbre asociada. Así mismo, para las pérdidas eléctricas que son referenciadas a una temperatura θ_r según el tipo de transformador, se referencia la Tabla 4 de IEC 60076-19 con el fin de precisar la contribución de la incertidumbre a la temperatura de referencia mediante el cálculo de la incertidumbre estándar combinada y expandida.

CONCLUSIONES

Tomando como ejemplo base el caso práctico de este proyecto, se evidenció para transformadores de distribución de 800 kVA, una incertidumbre cerca del 5% con relación al valor de pérdidas con carga medidas durante el ensayo de cortocircuito. Se consideró como una posible fuente de incertidumbre el registro de temperatura, el cual debe ser registrado en promedio antes y después del ensayo de rutina con el fin de realizar un procedimiento de cálculo más preciso de las pérdidas con carga a temperatura de referencia. Así mismo, el procedimiento de extrapolación para el caso donde la corriente de cortocircuito medida no alcance la corriente de cortocircuito nominal del ensayo, pero esta sea mayor al 25% de la nominal.

Con relación a la incertidumbre calculada con la guía GTC 51 en toda una población de transformadores de distribución de 30 a 800 kVA y la incertidumbre expresada por medio de la función modelo que establece la norma IEC 60076-19, se evidenció una diferencia de la incertidumbre asociada a la medida de pérdidas sin carga cerca del 20.4% para el caso ejemplo en ensayo de vacío. Lo que determinó que el balance de contribución de la incertidumbre de los equipos y transformadores de medida utilizados bajo ensayo, hiciera más precisa la determinación de la incertidumbre en la medición de pérdidas en vacío.

De acuerdo a las técnicas establecidas para la estimación de la incertidumbre en la medición de pérdidas eléctricas, se evidenció que la incertidumbre asociada a la medida de potencia es directamente proporcional a la capacidad en potencia aparente del transformador, por lo que en un transformador de 800 kVA se establece por ejemplo, una incertidumbre hasta del 17% del valor medido de pérdidas sin carga en ensayo de vacío o circuito abierto. Se considera que dicho parámetro, posiblemente se deba a que no se emplea la

corrección de las pérdidas sin carga a una base de onda sinusoidal, utilizando el registro de una lectura independiente del valor medio con respecto al valor eficaz de tensión, por tanto se puede atribuir lo anterior como una posible fuente de incertidumbre durante la medida de pérdidas sin carga. Se consideró finalmente, la evaluación del factor de forma (no diferente a 1.11) y el factor de potencia no mayor a 0.2 como principales fuentes de incertidumbre dentro de la medición de pérdidas sin carga o vacío, por tanto deben ser variables eléctricas medidas y controladas durante la ejecución del ensayo.

REFERENCIAS

- ICONTEC, (2009). *Guía sobre Incertidumbre en la Medición Industrial*. Bogotá D.C, Colombia.
- IEC/TS 60076-19. (2013). *Technical Specification: Rules for the determination of uncertainties in the measurement of the losses on power transformers and reactors*. Geneva, Switzerland: IEC.
- ISO. (1997). *Guía para la Expresión de Incertidumbre en las Mediciones*. Bogotá D.C, Colombia: Norma Técnica Colombiana GTC 51. Icontec (Traducción certificada).
- NABL National Accreditation Board for Testing and Calibration Laboratories. (2004). *Sample Calculations for Uncertainty of Measurement in Electrical Testing*. India: NISCAIR.
- NTC 1005. (2003). *Transformadores. Determinación de la tensión de cortocircuito*. Bogotá D.C, Colombia: Icontec.
- NTC 1031. (1998). *Transformadores. Ensayos para la determinación de pérdidas y corriente sin carga*. Bogotá D.C, Colombia: Icontec.
- NTC-ISO. (2003). *Sistemas de gestión de la medición. Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición*. Bogotá D.C, Colombia: Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 10012. Icontec (Traducción certificada).

