

“Nueva práctica para determinar el deterioro del aislamiento de los transformadores de corriente (CTs) en subestaciones de alta y extra alta tensión”

Alejandro Santa Calderón alsanta@intercolombia.com

INTERCOLOMBIA

Cl 12 sur # 18 – 168 - Cel. 3102257339

Medellín-Antioquia

1. Introducción.

El monitoreo de la condición a los equipos de subestaciones eléctricas de alta y extra alta tensión, se ha convertido en una herramienta fundamental que sustenta la toma de decisiones a través del ciclo de vida del activo. La adecuada definición de una estrategia de mantenimiento que considere los modos de falla de los equipos, permite establecer las variables que deben ser monitoreadas para controlar el riesgo de falla, disminuir los costos de operación y mantenimiento de los equipos y definir una metodología adecuada para la sustitución de los mismos. Además de la mejora en los procesos de la selección de equipos a través de la retroalimentación al diseño.

Esta perspectiva transversal al ciclo de vida del activo, se ha convertido en parte esencial de la estrategia de implementación del proyecto de Gestión de Activos en **ISA – INTERCOLOMBIA**.

El presente artículo da una introducción a un nuevo método que amplía el potencial de la prueba de factor de potencia o Tangente delta para evaluar la condición del aislamiento Papel – Aceite en transformadores de corriente (CTs), equipos cuyo riesgo de falla posee grandes implicaciones en la operación del sistema eléctrico, no solo por la pérdida del suministro eléctrico a las cargas, sino por la posible afectación a otros equipos de la misma bahía (o bahías aledañas) e incluso por posibles lesiones al personal que se encuentra en la subestación, debido a la condición

explosiva de la falla cuando se trata de transformadores con aislamiento externo en porcelana (Housing).

Esta variante al método clásico de la prueba de pérdidas en el dieléctrico, utiliza la evaluación de la respuesta en frecuencia del aislamiento, a través de un barrido en frecuencia para un rango entre 15 y 400Hz, permitiendo visualizar cambios representativos a través del tiempo de la tendencia a la degradación del aislamiento papel – aceite, que no pueden ser visualizados mediante la prueba realizada únicamente a 60Hz.

Este artículo, también presenta la implementación de una metodología de evaluación de la prueba, que no solo se encuentra ligada al método gráfico cualitativo, sino a una cuantificación analítica de la degradación del aislamiento.

2. Porque evaluar el aislamiento de un transformador de corriente?

De acuerdo con el análisis de los modos de falla más recurrentes en transformadores de corriente de alta y extra alta tensión, se ha determinado que la afectación al sistema aislante papel-aceite es el modo más riesgoso, que desencadena fallas que conducen a la explosión del transformador. Con base en esta premisa, es necesario determinar cómo evoluciona la condición del aislamiento a través del tiempo mientras el equipo se encuentre operativo. Para ello es fundamental

medir las pérdidas de tipo conductivas y de polarización en el aislamiento, y la variación de la capacitancia inherente a la presencia de un dieléctrico entre elementos energizados y referenciados a tierra (elementos con diferencia de potencial).

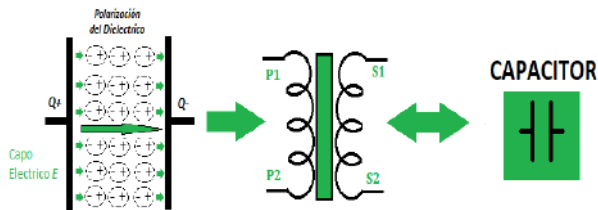


Figura 1. Comportamiento capacitivo del dieléctrico en presencia de un campo eléctrico E .

Debido a la característica capacitiva que presenta el sistema aislante papel-aceite, ante diferencias de potencial, la corriente que fluye a través del mismo debiese ser de tipo capacitivo I_c en su totalidad, no obstante, esta es una condición ideal, pues a través del aislante existirán corrientes de fuga o pérdidas del dieléctrico de tipo resistivas I_r , las cuales serán producto de contaminantes presentes en el aislamiento como carbones, compuestos polares, burbujas de gases, entre otros, que sumados a variaciones térmicas en el equipo conducen a su incremento de la conductividad a través del sistema y al incremento de energía disipada en forma de calor que producen la paulatina descomposición tanto del papel como del aceite, generando una disminución en la vida útil del aislamiento y por ende del equipo.

De acuerdo a las condiciones expuestas, un modelo simple del aislamiento estará conformado por una resistencia, que representará las pérdidas a través del dieléctrico y una capacitancia que representa el comportamiento fundamental del aislamiento para almacenar energía en presencia de una diferencia de potencial. Estos elementos podrán ser representados en configuraciones

serie o paralelo, de acuerdo al fenómeno que quiera ser analizado [1] [2].

En la industria (pruebas a equipos de subestaciones mediante el método convencional), la configuración de mayor uso para representar las pérdidas en el dieléctrico es el paralelo entre una capacitancia C_p y una resistencia R_p , debido a que dicho modelo representa la oscilación entre el comportamiento puramente capacitivo del aislamiento y las pérdidas por el dieléctrico, que están relacionadas con problemas en el sistema de aislamiento (humedad disuelta en el aceite, contaminantes producto de la degradación del papel y del aceite ante el estrés del dieléctrico por condiciones operativas, etc). Adicionalmente la aparición de corrientes de fuga superficiales (producto de sustancias contaminantes depositadas en la superficie del aislamiento externo) también permiten ser consideradas utilizando esta configuración [1].

Por su parte, la configuración serie, es de gran uso para representar los fenómenos de polarización del dieléctrico, al momento de este ser expuesto a una diferencia de tensión, cuyo comportamiento es totalmente opuesto a la aparición de tensión entre sus terminales respecto al comportamiento del circuito en paralelo. El fenómeno de polarización está relacionado con diferentes fenómenos, algunos son:

- **Polarización electrónica:** debida al movimiento de la nube de electrones al momento de aplicarse un campo eléctrico sobre los mismos.
- **Polarización interfacial:** la concentración de cargas eléctricas en las interfaces o separaciones de los dieléctricos de distintas características.
- **Polarización iónica:** Por movimiento de los átomos cargados (iones) en presencia de una diferencia de potencial

- Polarización por orientación:**
 Alineación de los dipolos permanentes en función de la dirección del campo eléctrico.

Normalmente estos fenómenos se evidencian a frecuencias que rondan los 20Hz al realizar la prueba de FP%.

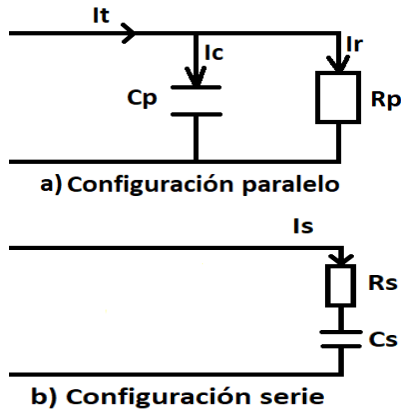


Figura 2. Configuraciones Paralelo (a) y serie (b) para modelar la respuesta dieléctrica ante fenómenos de conducción y polarización respectivamente.

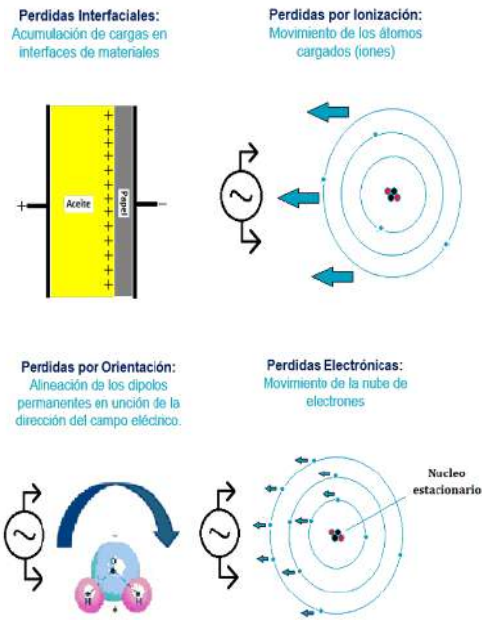


Figura 3. Representación de los fenómenos de polarización

Ahora, si se considera el modelo circuital en paralelo de la Figura 2 (a) y se representa de forma vectorial, obtendremos una forma de

medir las pérdidas a través del aislamiento. Esta medida ha sido nombrada Factor de potencia, Tangente delta ($\tan\delta$) o factor de disipación.

Para ello debeos considerar:

$$P\acute{e}rdidas (W) = V * I_r \quad [1]$$

$$Capacitancia (Cp) = I_c / V \omega \quad \text{de donde} \quad I_c = C_p * V * \omega \quad \text{con} \quad \omega = 2 * \pi * F \quad [2]$$

$$Corriente total (I_t) = \sqrt{I_r^2 + I_c^2} \quad [3]$$

$$I_t * \cos \theta = I_r \quad [4]$$

$$\text{Por (4) en (1)} \quad W = V * I_t * \cos \theta \quad [5]$$

$$\text{Donde de (5)} \quad \cos \theta = FP$$

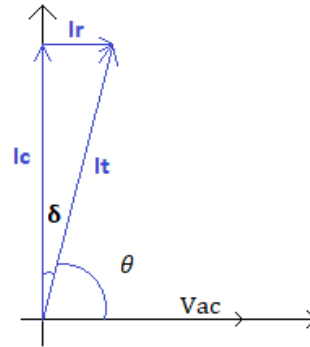


Figura 4. Representación vectorial de corrientes y tensiones.

El factor de potencia, es un valor que nos indica las pérdidas relativas de todo el sistema de aislamiento de un equipo. El FP%, representa la eficiencia del aislamiento en una escala inversa entre 0% y 100%, relacionando una mejor condición del aislamiento (menos pérdidas) cuando es cercano a cero. La evaluación convencional del factor de potencia, se realiza a frecuencia industrial, razón por la cual se reduce la posibilidad de ver un problema en el aislamiento que venga evolucionando de acuerdo a los diferentes tipos de pérdidas (donde las pérdidas por polarización son observables alrededor de los 20Hz), adicionalmente no permite identificar la fuente del deterioro (caracterizar el tipo de pérdida) que presenta el aislamiento en el

equipo, pues se trata de un resultado puntual a una sola frecuencia.

3. Factor de potencia con frecuencia variable

El VFPP (Variable Frequency Power Factor, por sus siglas) [2] es una medida del Factor de potencia, realizada para diferentes valores de frecuencia, con el fin de ampliar la ventana de evaluación del incremento de las pérdidas a través del aislamiento de los equipos de subestaciones eléctricas, permitiendo caracterizar la razón del deterioro del aislamiento [2] [3].

Aunque la técnica puede ser aplicada en equipo inductivo, presenta una gran eficiencia al evaluar transformadores de corriente y bujes de tipo capacitivo con sistema de aislamiento papel-aceite [4] [5].

Revisando los modelos expuestos anteriormente (ver Figura 2) y las ecuaciones que rigen la evaluación de las pérdidas en el dieléctrico [Eq 2] es posible evidenciar que al utilizar un método que usa un rango de frecuencias que toma valores bajos y altos, se puede tener una ventana a las pérdidas tanto por polarización, como por conducción. Para que en el modelo en paralelo el aislamiento sea ideal, la resistencia debe ser infinita, no obstante, a medida que la resistencia decae, comienzan a aparecer valores de I_r que conducen al incremento del Factor de potencia. En equipos cuyo aislamiento presenta alta degradación, aunque el incremento de corriente resistiva es sustancial, siempre será muy pequeño comparado con la magnitud de la corriente capacitiva, no obstante, la razón entre ambas representa variaciones apreciables de la condición del aislamiento (siendo la base de la evaluación de Tangente delta) [1] [6] [11] [12] [13].

Ahora, para evaluar el modelo que considera la polarización del dieléctrico, es preciso recurrir a la variación en frecuencia, para notar el comportamiento de las corrientes resistivas y capacitivas. Si se observa la ecuación [Eq 1] es posible determinar que ante variaciones de la frecuencia la magnitud del corriente I_r , permanecerá constante, sin embargo, si este mismo análisis lo aplicamos a la ecuación [Eq 2], notaremos que la magnitud de la corriente I_c variara (se incrementará si crece la frecuencia y disminuirá si la frecuencia lo hace). Por tal razón, al comparar a bajas frecuencias, las magnitudes de la corriente resistiva y capacitiva, se notará que I_r es mayor a I_c , lo que se verá representado en la ecuación [Eq 5], como grandes variaciones en el factor de potencia.

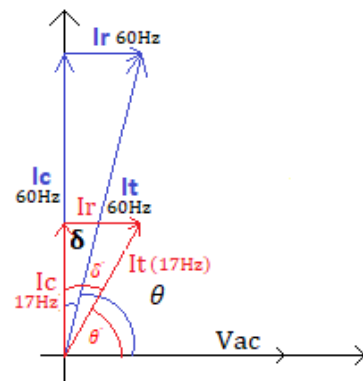


Figura 4. Representación vectorial de las variaciones de la componente capacitiva y resistiva a 60Hz y a 17Hz (Nótese que I_r permanece constante)

4. Método de evaluación del factor de potencia a 60hz y con frecuencia variable

Factor de potencia a 60Hz:

Si se considera el método convencional de factor de potencia a frecuencia industrial ($F=60\text{Hz}$ para el sistema colombiano), al momento de realizar la evaluación de resultados se requiere tener las siguientes consideraciones:

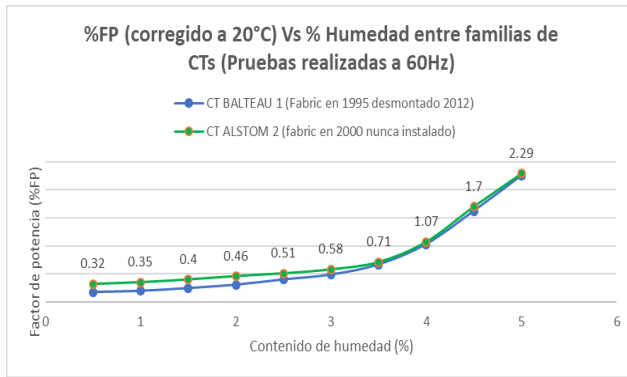


Figura 5. Tendencia del FP% ante incremento de humedad en un CT (prueba 2013).

De acuerdo a la **Figura 5**, pequeñas variaciones entre pruebas respecto a la medida de factor de potencia a 60Hz, pueden implicar grandes deterioros en el aislamiento.

Por lo tanto, la mejor forma de evaluar el comportamiento del FP% medido a 60Hz es mediante datos históricos para observar la tendencia. Sin embargo, existen algunos criterios fundamentales a ser considerados al momento de manejar la información reportada por la prueba (debido a la alta influencia que estas condiciones tienen sobre los resultados de la prueba)

- Temperatura medioambiente (alta influencia sobre los resultados cuando las temperaturas del ambiente de operación son elevadas) [7] [5] [8].
- Deterioro por contaminación de la superficie del equipo probado (Bujes, o Transformadores de medida, principalmente en zona costera, lugares de alta humedad, cerca de regiones mineras, etc).
- Errores en la preparación de la Prueba (acercamiento del cableado al equipo de prueba, malas conexiones y deterioro del cableado).
- Falla de aislar físicamente los terminales.

Factor de potencia con frecuencia variable:

Para el desarrollo de la prueba de FP% con variación de la frecuencia, se realiza la prueba en un rango entre 15Hz y 400Hz, para lo cual se obtiene una tendencia de los valores que puede ser graficada, y a través de la cual es posible evaluar mediante el comportamiento de las pendientes entre 15Hz y 60Hz y entre 60Hz y 400Hz el estado de deterioro del sistema de aislamiento papel aceite.

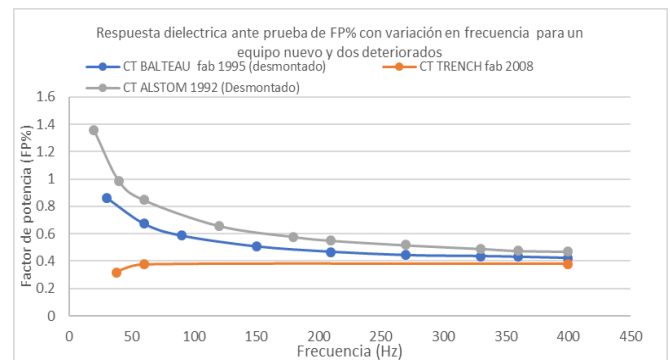


Figura 6. Respuesta dieléctrica ante prueba de factor de potencia VFPF para un equipo nuevo y uno deteriorado.

Conforme a los modelos presentados en los numerales anteriores y a las gráficas representadas en la Figura 6, si las pérdidas por conducción son muy pequeñas en el sistema de aislamiento papel – aceite, la pendiente para rectas trazadas respecto a 60Hz serán positivas (nótese en la figura 6 la tendencia de las pendientes para la gráfica naranja). Esta condición indica que el aislamiento del equipo se encuentra libre de deterioro, el cual es el comportamiento predominante en un equipo nuevo. Para el caso de alta presencia de pérdidas de polarización (entre 15 y 40Hz y 150 y 400Hz), se observará un cambio en la tendencia de las pendientes trazadas respecto a los 60Hz, la cual será negativa. Adicionalmente las pérdidas de tipo conductivo, conllevaran al desplazamiento positivo en el **eje y** de la curva (ver graficas gris y azul en la Figura 6).

Debido a que el comportamiento de la prueba VFPF se evalúa como un conjunto de datos de manera gráfica, es posible incluso observar la tendencia al deterioro del aislamiento, sin realizar una compensación de temperatura a 20°C. Es importante resaltar que el factor de corrección por temperatura (genérico), se encuentra estipulado por el estándar IEEE Std C57.12.90-2006 en su sección 10.10.5. [9] sin embargo, fue removido de la norma, en su actualización [8], de acuerdo a la siguiente nota:

“Nota 3.b. -La experiencia ha demostrado que la variación en el factor de potencia con la temperatura es sustancial y errática de modo que ninguna curva de corrección única se ajuste a todos los casos”.

Cabe resaltar que las características de adsorción del aceite mineral en presencia de la temperatura, varían de acuerdo al porcentaje de humedad disuelto en el aceite, lo cual afectará al Factor de potencia y a su vez modificarán la tendencia del Factor de corrección, incluso para 60Hz. Esta condición conlleva a que las curvas de corrección por temperatura deban ser creadas para diferentes porcentajes de humedad presente en el aceite (para lo cual se debería tener claro el porcentaje de humedad en cada equipo). A su vez el factor de corrección solo está definido para la frecuencia de 60Hz.

Por tanto, aunque pueden presentarse variaciones en las pérdidas por polarización y conducción por cambios de temperatura, la tendencia del deterioro del aislamiento punto a punto se mantendrá, lo cual convierte al método VFPF en un elemento de evaluación efectivo para determinar el estado del sistema de aislamiento papel – aceite de los equipos.

Para el método de evaluación se deben tener las siguientes consideraciones:

Evaluación de pendientes entre Rango 1 (15Hz y 60Hz) y Rango 2 (60Hz y 400Hz) con el fin de determinar el signo de las mismas para determinar, la evolución de las pérdidas por polarización en los rangos de 15Hz a 40Hz y 150 a 400Hz, como las pérdidas por conducción.

A continuación, se presentan tablas evaluativas del comportamiento de las pendientes tanto por porcentaje de la pendiente como por signo, de acuerdo a la estadística obtenida para un total de 30 equipos evaluados para un rango de frecuencias entre 30Hz y 400Hz. Este método evaluativo puede ser implementado en un programa computacional que mediante lógica difusa establezca el deterioro de cada equipo y las acciones a realizar [10].

Tendencia al deterioro del aislamiento (Papel - Aceite) de acuerdo al signo de las pendientes para la prueba VFPF		
Signo de la Pendiente entre 15Hz y 60Hz	Signo de la Pendiente entre 60Hz y 400Hz	Consideración
+	+	Equipo sin presencia de pérdidas por polarización y sin pérdidas de tipo
+	-	Equipo cuyo aislamiento presenta bajas pérdidas por polarización, adecuado para el funcionamiento
-	+	Equipo con una evolución en el deterioro del aislamiento por pérdidas de polarización producto del envejecimiento del aislamiento. Debe hacerse seguimiento
-	-	Aislamiento deteriorado, por presencia de compuestos polares y otros contaminantes, debe revisarse el incremento de factor de potencia respecto a pruebas anteriores para evaluar el deterioro por conducción y revisarse el valor de las pendientes, para determinar si debe o no ser desmontado.

Tabla 1. Tendencia al deterioro del aislamiento (Papel-Aceite) de acuerdo al signo de las pendientes.

Valoración de las pendientes negativas para las pérdidas por polarización en transformadores de corriente con aislamiento papel-aceite	
Pendiente (%) entre 30 Hz y 60 Hz	Condición
M = 0%	Equipo en condiciones adecuadas de operación
M entre 0% y -0.01%	Equipo con envejecimiento del aislamiento y presencia de pérdidas polares, debe realizarse seguimiento
M entre -0.01% y -0.02%	Equipo con deterioro apreciable del sistema papel aceite con altas pérdidas por polarización, debe programarse su reemplazo
M < -0.02%	Equipo con muy altas pérdidas por polarización, debe ser desmontado con la mayor brevedad posible

Tabla 2. Valoración de las pendientes negativas (entre 30Hz y 60Hz) para las pérdidas por polarización en transformadores de corriente con aislamiento papel aceite.

En la tabla 3, no se observa la evaluación de las pendientes para la recta entre 60Hz y 400Hz, debido que independiente del valor de la pendiente (no del signo), la condición más relevante de pérdidas por polarización ha sido evidenciada para las pendientes entre 15Hz y 60Hz (para el caso de evaluación, entre 30Hz y 60Hz). **Este criterio de evaluación se obtuvo de manera empírica, de acuerdo a los datos evaluados en 30 transformadores de corriente, para las curvas evaluadas entre 30Hz y 400Hz.**

Por lo anterior, este criterio se convierte en un elemento a ser retroalimentado a medida que se vayan obteniendo mayor cantidad de pruebas, con el fin de fortalecer el método de evaluación. También debe realizarse de manera comparativa con el histórico del equipo.

De acuerdo a las pruebas realizadas, ha sido posible determinar el desmontaje de alrededor de 20 equipos por variaciones apreciables en la curva de factor de potencia. Esta decisión fue sustentada por pruebas de DGA, contenido de humedad en el aceite de los transformadores de corriente y en algunos de los casos por detección de descargas parciales mediante el método RFI.

5. Conclusiones.

- El método VFPP amplía la ventana de evaluación de la condición de los sistemas de aislamiento papel-aceite ante la prueba de factor de potencia a 60Hz, permitiendo determinar a través del comportamiento de los signos de las pendientes en la curva, la tendencia al deterioro de un transformador de corriente. Esta ampliación al método de evaluación agiliza y robustece la toma de decisiones del personal del área de

mantenimiento de equipos, con el fin de evitar riesgos de falla explosiva de los CTs.

- La prueba de VFPP permite evaluar gráficamente la tendencia al deterioro del aislamiento de los equipos, sin tener que estar ligado a factores de corrección por temperatura, puesto que las pérdidas por polarización y conducción se ven cubiertas en el rango de frecuencias de 15 a 400 Hz, razón por la cual, evaluará las pérdidas presentes en el aislamiento producto del incremento en contenido de humedad, sin verse muy afectada por la adsorción del aceite ante variaciones de temperatura, condición que si es de alta relevancia en el método clásico.
 - Este método ha sido evaluado para transformadores de corriente cuyo sistema de aislamiento es papel-aceite mineral, sin embargo, podría ser utilizado para transformadores que utilicen esteres en su medio aislante.
 - El método VFPP permite caracterizar de manera más efectiva el comportamiento de familias de equipos (mismo fabricante y misma referencia) para observar tendencias al deterioro y retroalimentar en la etapa de creación del activo a las especificaciones técnicas para las futuras adquisiciones de CTs.

Bibliografía

- [1] P. Dinesh Chhajer, «Power Factor Insulation Diagnosis Demystifying Standard Practices,» de *50th Annual Minnesota Power Systems Conference*, 2014.
- [2] D. Jill, *Electrical Field Test for the Life Management of Transformers*, OMICRON electronics Corp USA, 2013.
- [3] J. D. M. Öhlén, «Minimizing Dielectric Frequency Response Measurement Time by using Multiple Frequency Signals,» *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, p. 5, 2016.
- [4] P. Sagar bhutada, «NEW APPROACH TO ASSESS THE INSULATION CONDITION OF CONDENSER BUSHINGS,» *International Conference on Recent*

Trends in Engineering, Science & Technology - (ICRTEST 2016), p. 6, 2016.

- [5] M. O. a. P. Werelius, «Using DFR to determine dissipation factor temperature dependence,» *ENERGIZE - TRANSMISSION AND DISTRIBUTION*, p. 5, 2012.
- [6] B. C. y. S. C. A. K. Pradhan, «Estimation of Dielectric Dissipation Factor of Cellulosic Parts in Oil-paper Insulation by Frequency Domain Spectroscopy,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol 23*, p. 10, Octubre 2016.
- [7] R. D., «Individual temperature compensation,» *TRANSFORMERS MAGAZINE*, p. 5.
- [8] IEEE, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Standards, 2010.
- [9] IEEE, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Standards, 2006.
- [10] F. M. F. Z. Y. a. H. E. A. Betie, «Neural Network Approach to Separate Aging and Moisture from the Dielectric Response of Oil Impregnated Paper Insulation,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22*, p. 9, 2015.
- [11] A. S. C. A. F. S. J. V. L., «Aplicación de metodología de analisis de causa raiz a falla en transformador de corriente: Experiencia practica,» de *XVI encuentro regional iberoamericano del CIGRE*, Argentina, 2015.
- [12] T. Z. Z. Z. Xiaolin Zhang, «Impact of Temperature on the Changed Slope of Dissipation Factor of Oil Paper Insulation,» *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, p. 4, 2016.
- [13] I. P. E. Society, IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment C57.106, IEEE, 2006.

William Hernán Santana Achurry:

Ingeniero Electricista, egresado de la Universidad Nacional de Colombia en el año 1995 y Especialista titulado del Tecnológico Superior de Irapuato (México) año 2003 en el área de Sistemas de Trasmisión con énfasis en Línea Energizada. Experiencia en diseño y coordinación de trabajos de manteniendo en vivo (Línea Energizada) en subestaciones y líneas de trasmisión eléctricas. Adicionalmente cuenta con experiencia en sistemas de aislamiento eléctrico para equipos de alta tensión. Habilidad en la gestión del proceso de mantenimiento de sistemas de trasmisión en el marco de gestión de activos. Labora en ISA desde el año 1997. Actualmente coordina el equipo de Gestión de equipos de Subestaciones de INTERCOLOMBIA ESP.

Alejandro Santa Calderón:

Ingeniero Electricista egresado de la Universidad Nacional de Colombia en el año 2012 y Especialista en Gerencia del Mantenimiento de la Universidad de

Antioquia. Experiencia en pruebas eléctricas a equipos de subestaciones (con énfasis en transformadores de medida, descargadores y transformadores de potencia). Termógrafo Nivel 1 certificado por el ITC (Infrared Training Center). Habilidades en las metodologías de Eliminación de Causa de Riesgo para análisis de fallas en equipos de Subestaciones, y metodología MCC. Trabaja en ISA desde el año 2012 y actualmente se desempeña como Analista del equipo Gestión de equipos de subestaciones de la Dirección Mantenimiento de INTERCOLOMBIA ESP.

Samuel Ángel Pérez:

Estudiante de último semestre en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Actualmente se encuentra desarrollando la práctica profesional en INTERCOLOMBIA ESP (filial de ISA) en la Dirección de Mantenimiento en el desarrollo, implementación y puesta a punto de algoritmos en lógica difusa para la evaluación de la condición de equipos de Subestaciones. Bachillerato Técnico en Electricidad y Electrónica, promoción 2012. Diplomado en Gerencia de Proyectos con metodología PMI de la universidad EAFIT. Expositor con la Universidad de Nacional de Colombia en la Feria Internacional del Sector Eléctrico (FISE) con el Laboratorio del Alto voltaje.