

BOLETÍN DE GESTIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL TRANSFORMADOR (TLM): CORRECCIÓN INDIVIDUAL DE TEMPERATURA (ITC)

El factor de potencia de frecuencia de línea¹ ha sido uno de los métodos preferidos para evaluar el estado del aislamiento en equipos eléctricos de subestación durante mucho tiempo. Este método de ensayo depende de la comparación con valores de referencia o resultados previos, mientras que el deterioro y la contaminación se detectan a partir de un cambio en el factor de potencia. El éxito de un análisis comparativo se basa en la garantía de que los resultados que se van a comparar son representativos del estado del aislamiento y no se observan variables de ensayo que puedan cambiar. De lo contrario, un cambio en el factor de potencia se puede atribuir a variables de ensayo y no a un cambio real en el estado del aislamiento.

Una variable de ensayo importante en la comprobación del factor de potencia es la temperatura (del aislamiento). Por lo tanto, para que la comparación sea significativa entre cada ensayo, todos los resultados de factor de potencia deben normalizarse (o corregirse) para que sean equivalentes a valores de factor de potencia de 20 °C que se ajustan para la influencia de la temperatura.

En este punto, se extraen los siguientes fragmentos publicados de la norma IEEE C57.12.90:

"NOTA 3: b) La experiencia ha demostrado que la variación del factor de potencia con la temperatura es considerable y errática, por lo que una única curva de corrección no se ajusta a todos los casos. El factor de potencia se notificará junto con la temperatura de cumbre del aceite medida y la temperatura de piso del aceite, si está disponible. No se debe aplicar ninguna corrección de la temperatura. El comprador puede aplicar una corrección de la temperatura a los resultados de factor de potencia para calcular las tendencias".

La norma IEEE C57.152 sección 7.2.14.5 indica lo siguiente:

"...El factor de pérdida del aislamiento puede ser sensible a las variaciones de la temperatura, en cuyo caso debe aplicarse un factor de corrección a los valores medidos. Esto se lleva a cabo para permitir la comparación de los ensayos realizados a distintas temperaturas. La temperatura de referencia utilizada es de 20 °C. LOS FACTORES DE CORRECCIÓN PUEDEN ESTAR DISPONIBLES A TRAVÉS DE FABRICANTES DE EQUIPOS O DE INSTRUMENTOS DE PRUEBA. (En la norma IEEE C57.12.90-2006, 10.10.5 había disponibles factores de corrección adicionales, que se eliminaron en la norma IEEE C57.12.90-2010.)..."

Las normas indican claramente que las mediciones de pérdidas en el material dieléctrico son sensibles a la variación de temperatura, además de a los cambios en el estado dieléctrico. Los cambios en el factor de potencia debidos a la humedad, la contaminación o la degradación del material aislante son exclusivos del activo y no se pueden duplicar en otro activo, incluso aunque tenga la misma placa de características, ya que el estado del aislamiento es diferente.

Las técnicas de ensayo dieléctrico, en los dominios de tiempo y frecuencia, son cada vez más utilizadas por los fabricantes de transformadores, las empresas de servicios públicos de energía y los investigadores de los sistemas de aislamiento de papel-aceite para transformadores. El ensayo de la respuesta de frecuencia dieléctrica (DFR) implica la realización de aproximadamente 20 mediciones de factor de potencia/disipación entre 1 kHz y 1 mHz, típicamente. El ensayo de DFR ofrece a los usuarios una nueva alternativa para determinar el factor de corrección individual de temperatura (ITC) para el valor del factor de potencia de la frecuencia de línea medido a cualquier temperatura entre 5 y 60 °C, que se normalizará a 20 °C para el análisis de tendencias.

Es posible realizar análisis de las tendencias cuando hay más de dos resultados de ensayos de factor de potencia/disipación disponibles para un activo. El método de evaluación menos fiable implica la comparación del factor de potencia/disipación de acuerdo con los límites establecidos. Como referencia, los límites recomendados para el factor de potencia de aislamiento de los transformadores de potencia viejos en servicio y nuevos a 20 °C se detallan en la Tabla 18 de la norma IEEE C57.152-2013, que se reproduce en la Tabla 1 a continuación:

Líquido aislante	Clasificación de kV	Límite de PF nominal/nuevo	Límite de envejecimiento en servicio
Aceite mineral	< 230 kV	0,5 %	1,0 %
Aceite mineral	≥ 230 kV	0,4 %	1,0 %
Éster natural	Todo	1,0 %	1,0 %

Tabla 1: Límites recomendados para el factor de potencia para transformadores de potencia, de acuerdo con la norma IEEE C57.152-2013

¹ También factor de disipación o tan δ

ITC en transformadores de potencia

El factor de potencia/disipación (PF/DF), como mínimo, es una función de la frecuencia, la temperatura, las propiedades del material aislante y el nivel de contaminación. Para evaluar el estado del aislamiento, el PF/DF obtenido a una temperatura diferente de 20 °C debe normalizarse por medio de una correlación matemática.

Para obtener esta correlación, se utiliza una ecuación basada en la expresión de Arrhenius con el fin de determinar el factor de "desplazamiento de frecuencia", que depende de la diferencia de las temperaturas T_2 y T_1 (expresadas en Kelvin)

$$A_{x,y}(T_1, T_2) = e^{\frac{-E_{x,y}}{k_B} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}$$

La ecuación considera una función exponencial relacionada con la temperatura (T), la constante de Boltzmann (k_B) y el valor de la energía de activación ($E_{x,y}$) del material. Se ha observado que la forma de la respuesta dieléctrica (PF/DF con respecto a la frecuencia) no cambia de manera drástica con la temperatura para un grupo bastante numeroso de materiales dieléctricos sólidos; al contrario, a medida que la temperatura cambia, la respuesta (la forma del espectro) se desplaza en relación con la frecuencia mientras permanece intacta. Esto significa que un valor de PF/DF medido a la frecuencia de línea y la temperatura en el momento del ensayo es exactamente el mismo valor de PF/DF que se mediría a la temperatura de referencia de 20 °C, con la gran excepción de que se produciría a una frecuencia desplazada y diferente de la frecuencia de línea.

No obstante, es recomendable conocer el PF/DF equivalente a la temperatura de referencia de 20 °C y la frecuencia de línea. Por lo tanto, al realizar un ensayo de PF/DF a una temperatura que no es de referencia (distinta de 20 °C), la tarea se convierte realmente en determinar la frecuencia a la que la medida de PF/DF correspondiente representa la medida de PF/DF de frecuencia de línea a 20 °C. Dada una temperatura de ensayo del aislamiento distinta de 20 °C, la ecuación de desplazamiento de la frecuencia anterior se utiliza para determinar cuándo el PF/DF es equivalente al PF/DF de frecuencia de línea a 20 °C.

Este concepto se ilustra en la Figura 1, que muestra una medición de PF/DF a una frecuencia y temperatura determinadas idéntica a la medición de PF/DF tomada a una frecuencia y temperatura diferentes.

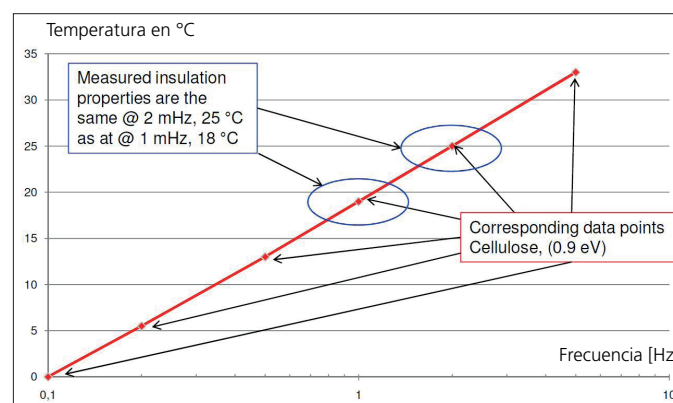


Figura 1: Relación de frecuencia-temperatura para un material aislante con una energía de activación de 0,9 eV

Los transformadores de potencia con sistemas de aislamiento impregnados en aceite se han estudiado sobre el terreno durante los últimos 20 años mediante la aplicación de medidas de respuesta dieléctrica, junto con el modelado matemático del aislamiento a través del denominado modelo XY. Actualmente, la medición de la respuesta dieléctrica con instrumentos como el IDAX 300 es uno de los métodos preferidos para medir tanto el contenido de humedad de la celulosa como la conductividad de aislamiento líquido. Los resultados suelen presentarse como capacitancia o factor de potencia/disipación a lo largo de un amplio espectro de frecuencia que normalmente oscila entre 1 kHz y 1 mHz.

El proceso de envejecimiento normal de la celulosa y la degradación del aislamiento líquido provocan cambios cuantificables en la respuesta dieléctrica. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de sistema de aislamiento interdevanado con aislamiento combinado de aceite mineral y papel. La concentración de humedad de la muestra es del 1 % y las medidas se toman a 5, 20, 35 y 50 °C.

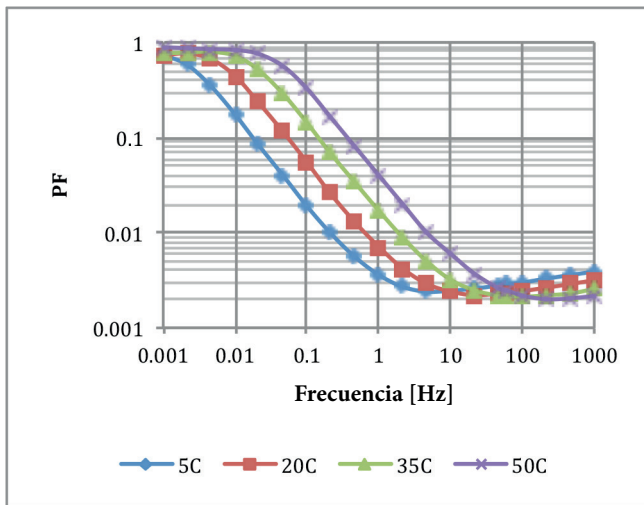


Figura 2: DFR para una muestra con una concentración de humedad del 1 % en la celulosa a 5, 20, 35 y 50 °C

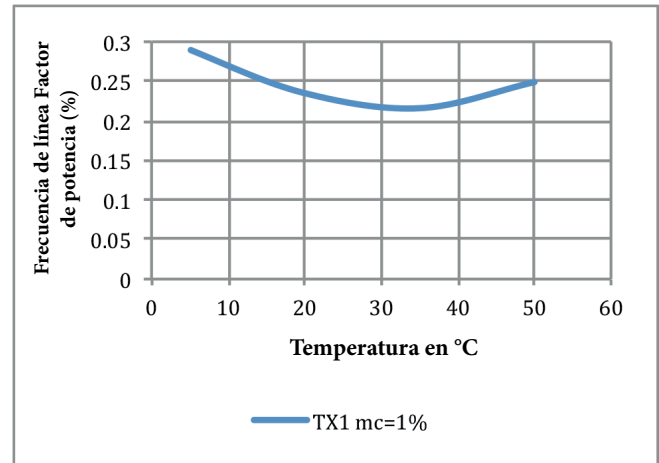


Figura 3: Comportamiento térmico del PF para la muestra con una concentración de humedad del 1 % en la celulosa

Si se consideran únicamente los valores de frecuencia de línea (60 Hz) obtenidos a diferentes temperaturas, el comportamiento térmico del %PF puede observarse claramente en la Figura 3.

La misma muestra probada con una alta concentración de humedad (3,5 %) en el mismo espectro térmico ofrece una respuesta dieléctrica diferente, como se presenta en la Figura 4.

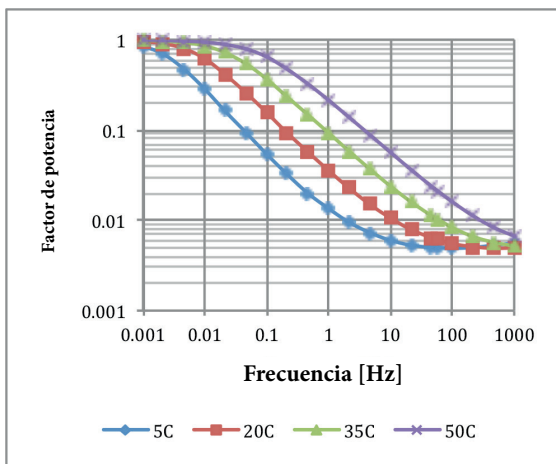


Figura 4: DFR para una muestra con una concentración de humedad del 3,5 % en la celulosa a 5, 20, 35 y 50 °C

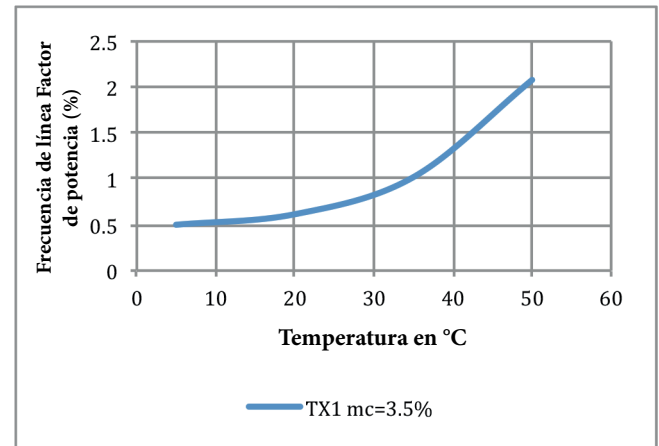


Figura 5: Comportamiento térmico del %PF para la muestra con una concentración de humedad del 3,5 %

Los cambios en la respuesta térmica dieléctrica en función del estado del material aislante pueden observarse mediante una comparación de la Figura 3 y la Figura 5.

Por lo tanto, se puede afirmar que para los transformadores de potencia, que se componen de dos materiales con propiedades dieléctricas muy diferentes y distintas energías de activación, el modelo XY es más conveniente si se utiliza junto con una base de datos para implementar una corrección de la temperatura precisa del PF/DF de frecuencia de línea (50/60 Hz). En aplicaciones avanzadas de ITC, se puede graficar la respuesta dieléctrica del PF o DF como función de la temperatura o función de la frecuencia a diferentes temperaturas.

ITC para pasatapas (bushings)

Se ha investigado la corrección individual de temperatura (ITC) en los pasatapas impregnados en aceite (OIP) en campo y en fábrica. Los resultados indican una muy buena correlación en el intervalo de temperaturas que va de los 5 a los 60 °C. Como se ha mencionado anteriormente, las diferentes unidades presentarán distintos estados de aislamiento, incluso cuando la placa de características sea exactamente la misma. La Figura 6 proporciona la DFR de varios OIP de diferentes tipos de tensión.

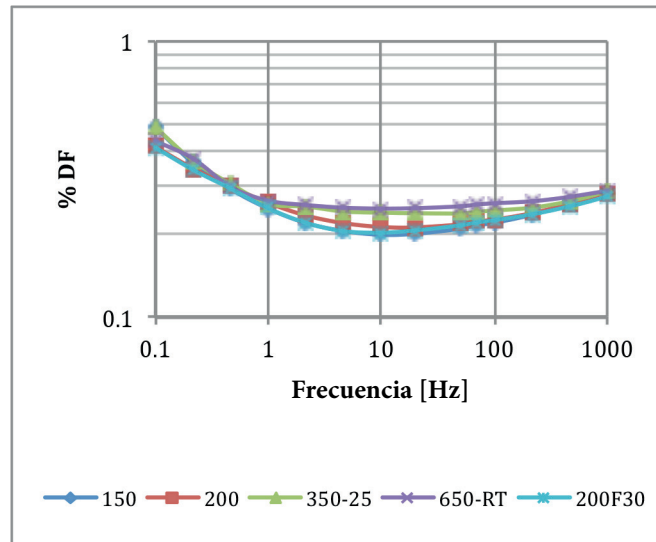


Figura 6: Respuesta dieléctrica de diferentes muestras de OIP

Es fundamental comprender que para los pasatapas y los transformadores de corriente, la relación papel-aceite es completamente diferente a la relación papel-aceite de los transformadores de potencia. En este caso, un material (el aislamiento sólido) predomina en la respuesta dieléctrica y la ITC puede aplicarse utilizando únicamente la forma de curva de la respuesta dieléctrica real.

Debido a la influencia predominante del aislamiento sólido en la respuesta dieléctrica, se ha observado que las medidas no necesitan alcanzar frecuencias muy bajas para aplicar el método de ITC con el fin de obtener la respuesta térmica dieléctrica correcta. En el ejemplo siguiente, los ensayos de factor de potencia/disipación se llevaron a cabo en un pasatapas OIP a diferentes temperaturas, se obtuvo la respuesta de frecuencia dieléctrica del pasatapas y se calculó y aplicó ITC para cada ensayo (Figura 7).

El resultado es una respuesta térmica dieléctrica precisa basada en la respuesta de frecuencia dieléctrica obtenida. Por lo tanto, ITC en pasatapas OIP es posible y fiable. Sin embargo, y más importante, la técnica requiere la obtención de una respuesta dieléctrica estable, lo cual puede resultar especialmente difícil en entornos con elevadas interferencias electromagnéticas. Para poder llevarla a cabo, debe aplicarse una tensión de ensayo de una magnitud superior a la tensión de ensayo de DFR habitual de 200 Vp. Se recomienda sobremedida el uso de un amplificador de alta tensión, como el VAX020 (que ofrece una tensión de ensayo de DFR de 2 kVp).

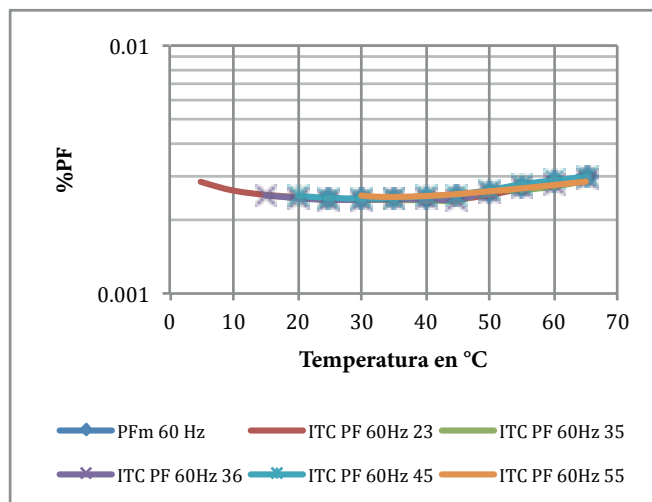


Figura 7: Muestra 350 probada para DFR a diferentes temperaturas y con ITC aplicada

ITC para transformadores de corriente

Los transformadores de corriente (TC) inmersos en aceite se utilizan ampliamente en la infraestructura eléctrica. Las unidades de media, alta y extra alta tensión pueden fallar debido a la contaminación, el envejecimiento y la degradación del aislamiento. Para los TC de papel impregnado en aceite de alta tensión, se ha utilizado el ensayo de factor de potencia/disipación a la frecuencia de línea para evaluar el estado del sistema de aislamiento y, también en este caso, se ha observado que DFR y la ITC ofrecen una buena correlación entre la respuesta en el dominio de frecuencia dieléctrica y el comportamiento térmico real del factor de potencia de frecuencia de línea. La Figura 8 y la Figura 9 muestran estas observaciones.

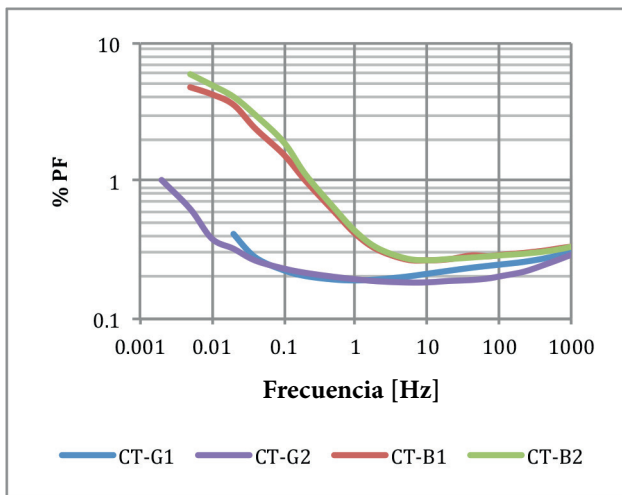


Figura 8: DFR para TC OIP con diferentes condiciones de aislamiento

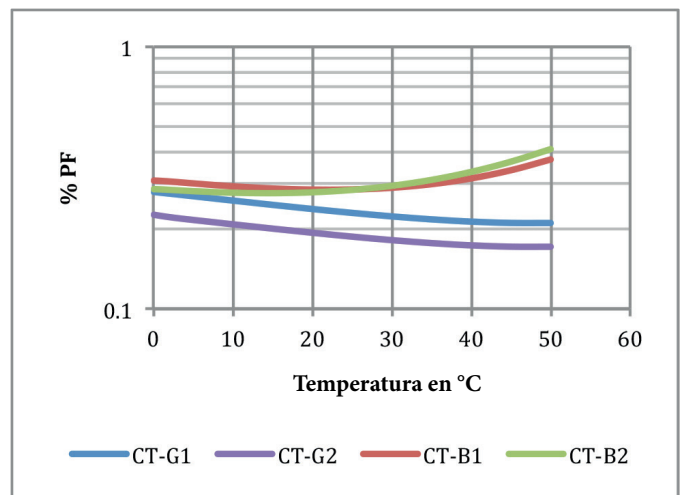


Figura 9: Respuesta térmica dieléctrica de diferentes TC OIP con diferentes condiciones de aislamiento

Conclusión

El modelo de temperatura-frecuencia es esencial porque hace posible la normalización de los parámetros dieléctricos, como el factor de potencia/disipación a la temperatura de referencia seleccionada (20 °C) y a la frecuencia seleccionada (es decir, 60 o 50 Hz). Una aplicación ampliada del enfoque matemático permite la normalización de los valores de factor de potencia a cualquier temperatura entre 5 y 60 °C a cualquier valor de la frecuencia dentro del intervalo de medición de frecuencia.

En transformadores de potencia, pasatapas y transformadores de corriente, la respuesta térmica dieléctrica no es una única curva para todas las condiciones. El envejecimiento, la humedad y la contaminación afectarán a la respuesta dieléctrica, y una forma de obtener una normalización precisa de los valores de factor de potencia/disipación consiste en aplicar el algoritmo de DFR para corrección individual de temperatura. La respuesta dieléctrica de un transformador lleno de líquido es única, y también lo es su comportamiento térmico dieléctrico. Una corrección incorrecta de los valores de factor de potencia/disipación puede tener como consecuencia que se tomen decisiones de gestión de los activos poco sólidas debido a la sobrestimación del valor de factor de potencia/disipación a 20 °C o la subestimación del riesgo de fallo.

Bibliografía recomendada

- [1] Robalino D.; "Individual Temperature Compensation"
Transformer Magazine Vol. 2 Issue 3, July 2015
- [2] Werelius P.; Cheng J.; Ohlen M.; Robalino D. "Dielectric Frequency Response measurements and dissipation factor temperature dependence", Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), 2012
- [3] Robalino D.; "Accurate Temperature Correction of Dissipation Factor data for Oil-impregnated paper insulation bushings: Field Experience", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012
- [4] Ohlen M.; Werelius P.; "Experiences of Using Dielectric Frequency Response Techniques for Insulation Assessment of Bushings and Instrument Transformers". MAT POST 2015.