

A2 - TRANSFORMADORES

MONITOREO DEL PROCESO DE SECADO DE TRANSFORMADORES EN FÁBRICA MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DIELECTRICA

DIEGO M. ROBALINO*
MEGGER
Estados Unidos de América

R. E. ALVAREZ*
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Resumen – Una vez que la parte activa del transformador es ensamblada en fábrica, es preciso secar adecuadamente el aislamiento sólido antes de iniciar el proceso de impregnación con el aceite. En la mayoría de los transformadores; el material aislante principal sólido es celulosa; cuya estructura está compuesta por una cadena de anillos de glucosa. Si bien la celulosa posee excelentes características dieléctricas, éste material se caracteriza por ser altamente higroscópico.

Si el proceso de secado en fábrica no resulta eficiente, el transformador puede mantener concentraciones de humedad inadmisibles lo cual acorta drásticamente la vida útil del aislamiento, incrementa el riesgo de falla y con ello, se condiciona las posibilidades de sobrecarga planificada o emergente del transformador.

Para la etapa de secado, los fabricantes utilizan diferentes metodologías tradicionales: secado por circulación de aire caliente, secado en fase de vapor, secado térmico y alto vacío, secado por rociado de aceite caliente, secado por corriente de baja frecuencia, entre los más comunes.

Dependiendo del método que se utilice, el proceso de secado podría resultar en un alto costo económico y una alta demanda de energía. En este sentido, la calidad del proceso de secado, la duración del proceso y el consumo total de energía son, por consiguiente, factores críticos para seleccionar el procedimiento de secado más conveniente y eficiente.

Por lo expuesto, el proceso de secado resulta de particular interés en fábrica. En ese sentido, mediante ensayos de espectroscopia dieléctrica; donde se evalúa las características dieléctricas de un sistema de aislamiento, es posible estimar el contenido de humedad en la celulosa. Con los ajustes adecuados, estas mediciones se pueden realizar de manera simultánea durante el proceso de secado por aire caliente y vacío.

Este trabajo es un compendio de la aplicación de la espectroscopia dieléctrica durante el proceso de secado en fábrica e incluye la revisión de casos de estudio donde la eficiencia del proceso es de suma importancia en la optimización de procesos de fabricación y en la implementación de más altos niveles de control de calidad.

Palabras clave: Secado – Fábrica – Papel – Humedad – Monitoreo – Espectroscopia Dieléctrica – Aislamiento – Vacío – Impregnación.

1 INTRODUCCIÓN

La espectroscopia dieléctrica es un término que se viene discutiendo desde mediados del siglo XX y hoy en día representa una de las técnicas avanzadas para el análisis de humedad en el aislamiento sólido de transformadores de potencia y distribución. Efectivamente, la literatura muestra un sinnúmero de estudios del espectro dieléctrico de diferentes materiales tanto sólidos como líquidos utilizados en la construcción de diferentes aparatos eléctricos, pero la aplicación específica de la respuesta dieléctrica tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia en transformadores de potencia para la evaluación de la condición del sistema de aislamiento es documentada a nivel internacional por CIGRE en [1]. La continua investigación científica y el interés generado en la comunidad científica internacional generó la publicación en 2010 de otro folleto técnico de CIGRE específicamente dedicado a la respuesta dieléctrica en devanados de transformadores

* diego.robolino@megger.com

[2]. Con este preámbulo, el Comité de Transformadores de IEEE incluye en la nueva guía de diagnóstico y pruebas para transformadores inmersos en aceite C57.152 el Anexo G de tipo informativo y dedicado a la Respuesta Dieléctrica en Frecuencia (DFR) [3]. En consecuencia, IEEE inició en 2013 un grupo de trabajo para generar el documento PC57.161 guía para la aplicación en campo de la Respuesta Dieléctrica en el Dominio de Frecuencia para determinar la concentración de humedad en el aislamiento sólido de transformadores de potencia. A la presente fecha que se escribe este artículo, el documento de IEEE está aún en proceso. La importancia y relevancia de la metodología en conjunto con la investigación científica por parte de varios grupos, hace que DFR se presente como una solución al control de calidad durante el proceso de secado en fábrica y campo.

2 GENERALIDADES

2.1 Fundamentos de Espectroscopía Dieléctrica

El fenómeno de polarización en los materiales dieléctricos es una función de tiempo y por ende de frecuencia que puede ser causado por una variedad de mecanismos y ser de tipo electrónico, iónico, dipolar e interfacial. La medición de corrientes en el dominio del tiempo al aplicarse un campo eléctrico constante permite cuantificar la densidad de corriente conductiva DC, σ_{dc} .

El puente que une y correlaciona la medición de propiedades dieléctricas en el dominio del tiempo con el dominio de la frecuencia se establece mediante la Transformada de Fourier. En definitiva, en el dominio de la frecuencia, la densidad de corriente total en un material dieléctrico cuando se aplica un campo eléctrico alterno, se define en la expresión (1).

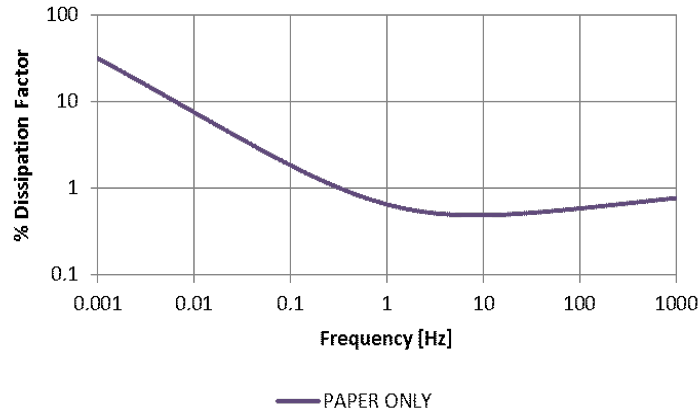
$$\hat{j}(\omega) = i\omega\epsilon_0 \left[\underbrace{\epsilon_\infty + \chi'(\omega)}_{\text{capacitivo}} - i \underbrace{\left(\frac{\sigma_{dc}}{\epsilon_0\omega} + \chi''(\omega) \right)}_{\text{resistivo}} \right] \hat{E}(\omega) \quad (1)$$

De (1) se puede observar que el componente resistivo, que se encuentra en fase con el campo eléctrico aplicado representa las pérdidas energéticas en el material generadas por movimiento de cargas libres o por la reorientación de cargas dipolares. El componente capacitivo desfasado 90° con respecto al campo eléctrico aplicado representa la capacitancia propiamente dicha del material dieléctrico.

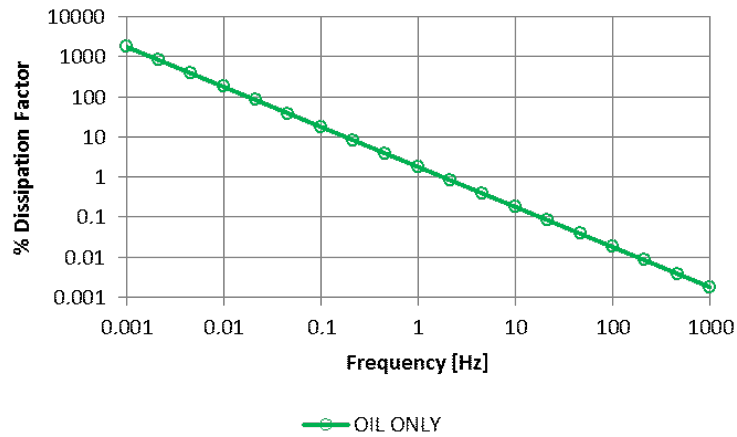
Las mediciones en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia se consideran iguales bajo el supuesto caso de que el material dieléctrico es lineal, homogéneo e isotrópico. En la complejidad de las aplicaciones encontradas en campo esta suposición no es absoluta, en sistemas de aislamiento combinado como es el caso de aceite-papel, un líquido aislante con conducción iónica se mezcla con un sólido de menor conductividad forman una acumulación de carga al ponerse en contacto. Por lo tanto, se da preferencia a la medición directa de la respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia.

El espectro de la respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia se forma básicamente de la medición de capacitancia y factor de disipación en un amplio rango de frecuencias que típicamente va desde 1 kHz hasta 1 mHz. En casos donde la temperatura del sistema de aislamiento se encuentra muy cercana a cero grados centígrados, la medición se lleva hasta niveles de muy bajas frecuencias (0.1 mHz).

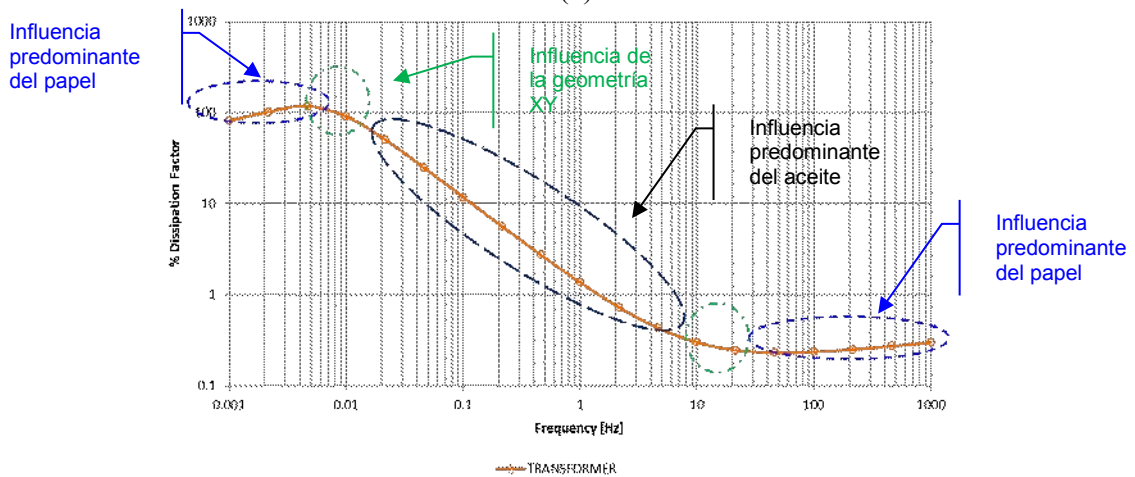
La respuesta dieléctrica del papel, aceite y de un sistema aceite-papel se presenta en las figuras 1a, 1b y 1c, respectivamente.



1 – (a)



1 – (b)



1 – (c)

Fig. 1. Respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia: (a) solo de papel celulosa; (b) solo de aceite mineral; y, (c) del sistema aceite-papel de un transformador

2.2 Aplicación de DFR en la estimación del contenido de humedad

La medición de capacitancia y de pérdidas dieléctricas a frecuencia de línea (50 o 60 Hz) aplicando una señal sinusoidal al objeto de prueba, se ha convertido en uno de los ensayos de rutina de mayor aplicación para determinar la condición del sistema de aislamiento. Un bajo valor en la medición del factor de disipación se ha asumido como un indicador de buena condición, mientras que un valor elevado ha sido la primera llamada de advertencia de que existe alguna deficiencia en la condición del sistema de aislamiento. Por lo tanto, la

medición de pérdidas dieléctricas a frecuencia de línea no permite definir la deficiencia, esta puede ser por presencia de contaminantes, humedad o degradación del sistema de aislamiento.

La medición del factor de disipación a diferentes frecuencias puede directamente correlacionarse con la medición de la permitividad relativa compleja en (3).

$$\operatorname{tg} \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (2)$$

Donde:

$\operatorname{tg} \delta(\omega)$ - es el factor de disipación a la frecuencia específica

$\varepsilon''(\omega)$ - representa el componente imaginario de la permitividad relativa compleja $\hat{\varepsilon}(\omega)$, compuesto por las pérdidas resistivas y las pérdidas de polarización.

$\varepsilon'(\omega)$ - representa el componente real de la permitividad relativa compleja

Como se puede observar en la Figura 1- (c), el espectro de la respuesta dieléctrica se puede dividir en regiones donde el papel, el aceite dieléctrico o la geometría del sistema son predominantes. Esta característica geométrica definida a través del modelo XY es una representación de las fracciones volumétricas de los componentes del sistema dieléctrico en un transformador. La figura 2 muestra los componentes del modelo XY [4].

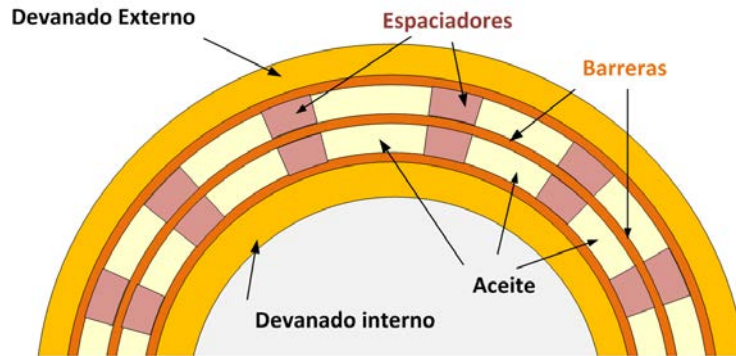


Fig. 2. Componentes del modelo geométrico XY

El modelo XY describe la estructura básica del ducto de aislamiento principal y se descompone como se muestra en las expresiones (3) y (4).

$$X = \frac{\text{Espesor total de las barreras}}{\text{ancho del ducto}} \quad (3)$$

$$Y = \frac{\text{Ancho total de los espaciadores}}{\text{periferia del ducto}} \quad (4)$$

En términos de permitividad, considerando que cada uno de estos materiales tiene un valor específico, el modelo XY conlleva a la siguiente expresión en términos de permitividad total del sistema (5).

$$\varepsilon(\omega) = \left[\frac{Y}{\left(\frac{1-X}{\varepsilon_{\text{espaciadores}}} \right) + \left(\frac{X}{\varepsilon_{\text{barreras}}} \right)} \right] + \left[\frac{1-Y}{\left(\frac{1-X}{\varepsilon_{\text{aceite}}} \right) + \left(\frac{X}{\varepsilon_{\text{barreras}}} \right)} \right] \quad (5)$$

Cabe indicar que los valores X y Y fluctúan en rangos predeterminados. Para el caso de transformadores con núcleo tipo columna, X varía de 0.2 a 0.5; Y varía de 0.15 a 0.25. Con esta información y la referencia de una

base de datos es posible determinar de manera acertada el contenido de humedad en el aislamiento sólido y la conductividad o factor de disipación del aislamiento líquido.

2.3 Dependencia de Temperatura

En la mayoría de los materiales dieléctricos sólidos, la forma de la respuesta dieléctrica no sufre un cambio drástico bajo el efecto de la temperatura en rangos en que el material no sufra cambios en su estructura interna. Esto permite que se pueda representar el efecto de la temperatura en la respuesta dieléctrica por desplazamiento tanto en magnitud como en frecuencia aplicando un factor obtenido mediante la expresión de Arrhenius.

$$A_{x,y}(T_1, T_2) = e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right]} \quad (2)$$

Donde:

- T₁ – temperatura inicial
- T₂ – temperatura final
- E_a – energía de activación
- k_B – constante de Boltzman

Actualmente, se ha demostrado que la corrección del factor de disipación a frecuencia de línea mediante tablas de corrección es un método genérico que no considera la condición del sistema dieléctrico. Bajo esta deficiencia, y con la ayuda de DFR, se ha logrado la corrección individual de temperatura a través de un barrido dieléctrico en las frecuencias desde 500 Hz hasta 1 Hz. Esta aplicación especial ha dado espacio a la verificación del factor de disipación real del equipo, corregido a 20°C en base a su respuesta dieléctrica única e individual [5].

3 PROCESO DE SECADO EN FÁBRICA

El proceso de secado en fábrica debe tomarse muy en cuenta dentro del proceso del control de calidad. Los transformadores de alta y extra alta tensión deben pasar por un proceso riguroso donde sus niveles de humedad residual en el aislamiento sólido sean inferiores al 0.5%. El proceso debe considerar parámetros físicos tales como el tamaño y la configuración geométrica del sistema de devanados, los diferentes diseños y la distribución interna de componentes, el uso de diferentes tipos de materiales en la configuración y ensamblaje del sistema de aislamiento y los tiempos necesarios para no dejar componentes húmedos y no acelerar el proceso de envejecimiento del material sólido lo cual entregaría al usuario final una estructura de aislamiento con un bajo grado de polimerización. Es decir, en definitiva, la fórmula perfecta debe considerar el nivel de humedad residual deseado al final del proceso, la eficiencia del proceso de secado y el grado de polimerización del producto final antes de ser encubado e impregnado en aceite dieléctrico.

La primera ley de difusión de Fick establece que la humedad se difunde de una región de alta concentración a una región de baja concentración debido al movimiento molecular [6]. Esto implica que la extracción de humedad desde el aislamiento hacia el espacio del horno se debe a un esfuerzo aplicado sea por calor o presión y al no haber sido impregnado en aceite la parte activa del transformador, la superficie del sistema de aislamiento será la primera en verse beneficiada por la acción de este esfuerzo que puede ser mejorado gracias a sistemas de vapor de kerosene.

Los procesos de secado en fábrica son varios y no se describen como parte de este artículo. Una descripción general de estos métodos se puede encontrar en [7]. Lo importante aquí es definir el método más acertado para poder controlar y supervisar el proceso de secado de tal manera de no exceder los tiempos de uso de hornos, no sobrecalentar el material sólido, no disminuir el grado de polimerización del material aislante y hacer más eficiente el proceso en general.

3.1 Método de evaluación de la humedad luego del proceso de secado

Independientemente del tiempo que tome el proceso de secado, el fabricante de transformadores busca un mecanismo con el cual se pueda demostrar la óptima aplicación del proceso en la parte activa del transformador. Algunos de los métodos que se utilizan en fábrica son: Medición de punto de Rocío, Presión

de vacío y Medición del Factor de Disipación. Todos estos métodos tienen ventajas y desventajas. De entre ellos el más comúnmente utilizado en fábrica es el método de medición del punto de rocío.

Para la medición del punto de rocío, al final del proceso de secado, estimada su finalización por valores empíricos, la parte activa se encuba y se aplica aire seco a presión. El sistema debe mantenerse en reposo entre 24 a 48 horas para poder obtener valores referenciales. En caso de que los valores obtenidos no cumplan con las expectativas del cliente o del fabricante, la unidad debe ingresar a un proceso de secado nuevamente.

Otra alternativa es usar bloques de material aislante que se conocen como “testigos”. Estos bloques deben pasar por todas las etapas de manufactura y ser diseñados lo mejor posible para que asemejen la construcción del sistema de aislamiento. Una vez terminado el proceso, estos bloques se analizan mediante la técnica de valoración de Karl Fischer.

La solución es realizar mediciones de espectroscopía dieléctrica de baja energía. Cuando el equipo se encuentra en el proceso de secado térmico y de alto vacío, típicamente se utiliza niveles de tensión entre 20 y 30VAC. Al ser un proceso de medición continua, el equipo de medición se configura en función a la temperatura del material aislante. Considerando los principios descritos de espectroscopía dieléctrica, no es necesario realizar mediciones a muy bajas frecuencias puesto que el sistema va a tratarse en un promedio de 100 °C. Idealmente el barrido que se realiza durante el proceso de secado se fija en un rango de frecuencia entre 1000 Hz y 10 mHz, por lo tanto el tiempo de duración de cada barrido se minimiza entre 3 a 5 minutos. Los intervalos de repetición del barrido al inicio de la operación pueden ser de hasta una hora y mientras más cercano el punto de finalización del proceso, más corto el intervalo de medición.

En definitiva, con un proceso continuo de monitoreo, se puede determinar rangos de aceptabilidad de factor de disipación y/o humedad gracias al modelo matemático descrito anteriormente y la corrección individual del factor de disipación. De esta manera, una alerta se envía al operador para dar por terminado el proceso de secado.

3.2 Casos de estudio

Se ha logrado determinar deficiencias en los equipos de secado. Un seguimiento riguroso permite determinar la efectividad del proceso y dar al operador pautas de mejora y optimización. En las figuras 3 y 4 se puede ver un proceso ineficiente aplicado a un transformador con alto nivel de humedad inicial. Luego de 24 horas no se dan cambios significativos en el proceso.

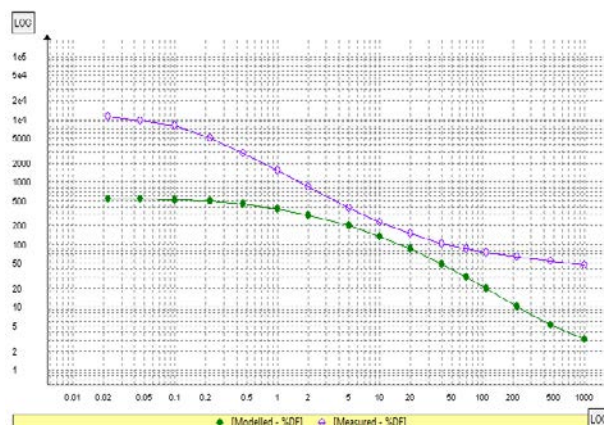


Fig. 3. Un transformador con un nivel inicial por encima del 5% de humedad se somete a un proceso de secado térmico

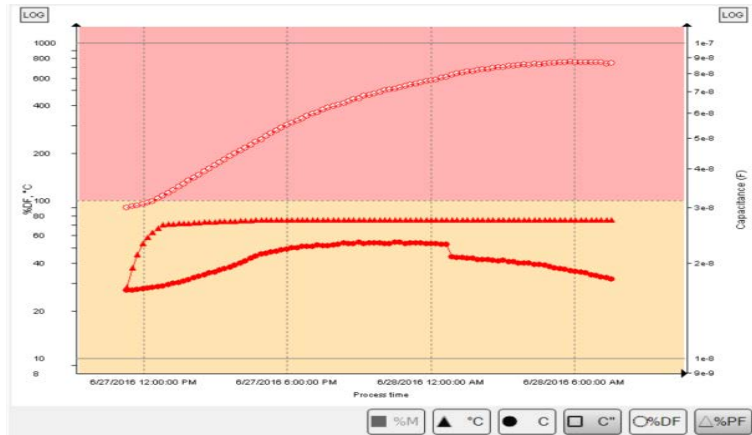


Fig. 4. El proceso térmico no muestra variaciones significativas en la respuesta dieléctrica

Un proceso efectivo se muestra en las figuras 5, 6, y 7. La parte activa del transformador se somete inicialmente a un proceso de secado térmico, luego este pasa a una etapa de secado en alto vacío y para finalizar el proceso, se lo impregna en aceite y se vuelve a evaluar la humedad mediante el método de espectroscopía dieléctrica.

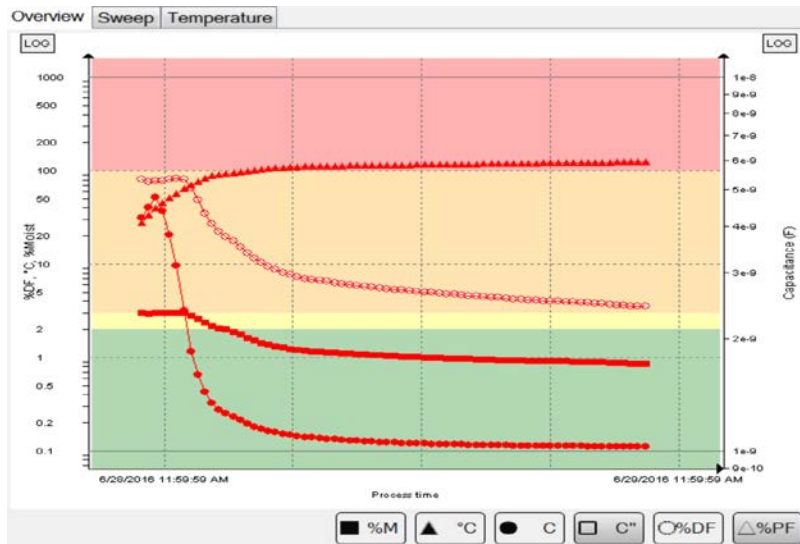


Fig. 5. Proceso de secado efectivo – variación continua del factor de disipación

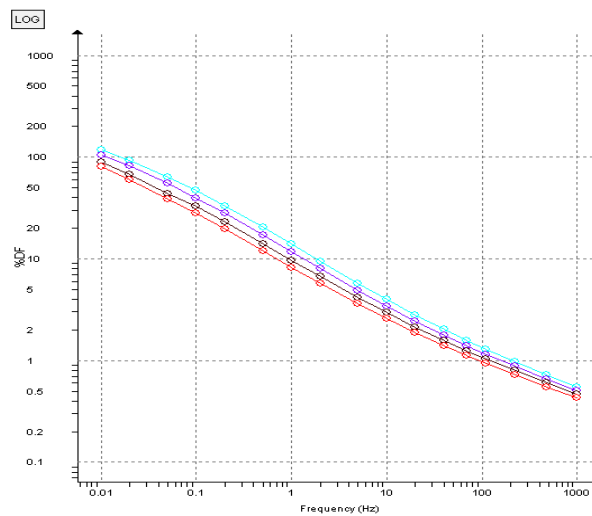


Fig. 6. Variación de la respuesta dieléctrica por efecto del secado en alto vacío

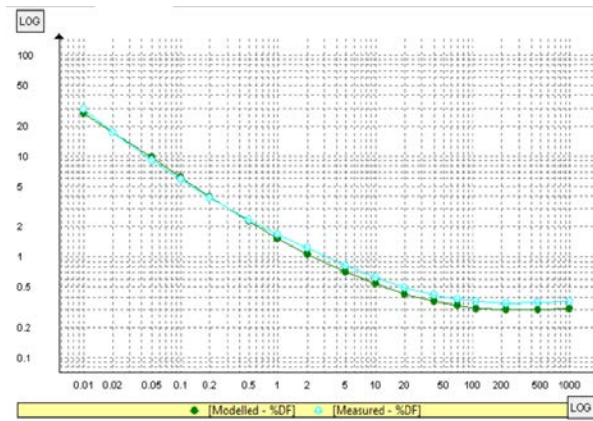


Fig. 8. Medición final de la respuesta dieléctrica una vez impregnado en aceite.

4 CONCLUSIONES

La presencia de humedad es el factor más importante en el envejecimiento de la celulosa, conjuntamente con el exceso de calor, aceleran el proceso de envejecimiento de la celulosa durante la vida útil del transformador.

Se presentaron diferentes casos de estudio, de los cuales se pueden obtener las lecciones aprendidas de cada uno de ellos. De mayor importancia es poder resaltar que la tecnología DFR puede ser utilizada para la optimización de procesos de secado en sistemas térmicos y de alto vacío.

El proceso de monitoreo con DFR elimina la necesidad de largos periodos de espera y reposo para tomar muestras y evaluar el punto de rocío. La diferencia es realizar una medición DFR por aproximadamente 30 minutos al final del proceso o esperar entre 24 y 48 horas para determinar el grado de humedad del aislamiento mediante punto de rocío.

La efectividad del proceso puede ser evaluada cuando se genera una referencia del proceso de secado en fábrica.

El éxito de la aplicación DFR se basa también en la factibilidad de tener una medición de temperatura del aislamiento lo más exacta posible y la posibilidad de utilizar la aplicación avanzada de Corrección Individual de Temperatura durante el proceso.

5 REFERENCIAS

- [1] CIGRE 254, "Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers," Paris, Task Force Report D1.01.09 TB 254, 2002.
- [2] CIGRE 414, "Dielectric Response Diagnoses for Transformer Windings," Paris, Task Force report D01.01 TB 414, 2010.
- [3] IEEE, "C57.152 - Guide for Diagnostic Field testing of Fluid-filled Power Transformers, Regulators, and Reactors," 2013.
- [4] Jialu Cheng, Diego Robalino, Peter Werelius, and Matz Ohlen, "Improvements of the transformer insulation XY model including effect of contamination," in *International Symposium on Electrical insulation (ISEI)*, 2012, pp. 169-174.
- [5] Diego M. Robalino, "Individual Temperature Compensation," *Transformers Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 42 - 47, 2016.
- [6] S. D. Foss and L. Savio, "Mathematical and Experimental analysis of the field drying of power transformer insulation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 4, pp. 1820 - 1828, Oct. 1993.
- [7] Diego M. Robalino and Peter Werelius, "Continuous Monitoring of Power transformer Solid Insulation Dry-out Process - Application of Dielectric Frequency response," in *IEEE Electrical Insulation Conference*, Ottawa, Ontario, Canada, 2013, pp. 230 - 234.