

**A2 - TRANSFORMADORES****EFFECTOS DE LA CONDICIÓN DEL NÚCLEO MAGNÉTICO EN LAS RESPUESTAS  
DEL ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA**

**H. MAYORA\***  
**IITREE-LAT**  
**FI-UNLP**  
**Argentina**

**E. CALO**  
**IITREE-LAT**  
**FI-UNLP**  
**Argentina**

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

**L.J.CATALANO**  
**IITREE-LAT**  
**FI-UNLP**  
**Argentina**

**P.MORCELLE DEL VALLE**  
**IITREE-LAT**  
**FI-UNLP**  
**Argentina**

***Resumen** – Los transformadores de potencia conforman el grupo de los activos más significativos en los sistemas eléctricos. La integridad y las adecuadas condiciones operativas de los mismos dependen de una gran cantidad de componentes internos que deben funcionar adecuadamente en su conjunto. Uno de estos componentes, de particular importancia para el buen desempeño de la unidad, es el núcleo magnético. Una manera de evaluar la condición interna del material magnético es utilizando la prueba de Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA), por medio de la cual es posible obtener información relevante sobre su estado mecánico. En este trabajo se compararon curvas de respuesta en frecuencia obtenidas de diferentes máquinas y ante distintas condiciones mecánicas del núcleo magnético.*

***Palabras clave:** SFRA – Diagnóstico – Núcleo – Defectos mecánicos – Fallas – Interpretación*

## **1 INTRODUCCIÓN**

Durante el transporte y la vida útil, los transformadores de potencia pueden verse afectados por una gran variedad de defectos mecánicos. Estos defectos tienden a generar distintas condiciones de estrés en la unidad que, si bien no causan una falla inmediata, van actuando y deteriorando progresivamente la integridad de la máquina hasta producir daños irreparables. Es importante que estos defectos sean detectados a tiempo para planificar mantenimientos correctivos. De esta manera se logra evitar fallas intempestivas y costos asociados a indisponibilidad y sanciones.

El núcleo magnético de un transformador cumple la función de mantener el flujo en su interior y favorecer el acoplamiento entre bobinados. Por la función que cumple, se encuentra constantemente solicitado por campos eléctricos y magnéticos de considerable intensidad, y cualquier condición mecánica irregular es capaz de generar efectos indeseados, principalmente por el efecto de calentamientos localizados.

Algunos defectos que puede presentar son:

- Cambio en la reluctancia del núcleo: Este defecto puede ser causado por el envejecimiento o la corrosión del aislamiento entre las láminas de hierro. El cambio en la distribución del flujo genera un incremento en la energía térmica que puede dañar los devanados e incluso generar gases en el aceite dieléctrico, normalmente detectables en el análisis de gases disueltos.
- Puesta a tierra faltante del circuito magnético: Este defecto puede ser causado por un daño en la conexión interna que vincula el núcleo con la puesta a tierra del transformador. Ante la falta de una referencia de tierra, el núcleo puede tomar potencial y solicitar su aislamiento respecto a tierra y respecto a los bobinados internos, especialmente en condiciones transitorias.
- Aislamiento deteriorado del núcleo a tierra: La masa del núcleo se encuentra soportado sobre aislantes (Fig. 1) los cuales deben garantizar un único punto de conexión a tierra. Un deterioro de dicho

aislamiento a tierra puede ser producido por impactos o movimientos bruscos durante la etapa de transporte y emplazamiento, o ante condiciones extremas tales como movimientos sísmicos. Si se produce una múltiple puesta a tierra del núcleo pueden generarse elevadas corrientes de circulación que se traducen en sobrecalentamientos excesivos.

- Magnetización residual: Este NO es un defecto del transformador. Sin embargo, es un efecto que tiene una influencia importante en las curvas respuesta del FRA, ya que puede conducir a resultados e interpretaciones erróneas.



Fig. 1. Porción de aislamiento del núcleo

Ante los diferentes defectos posibles, resultade especial interés disponer de una única herramienta de aplicación in situ que sea capaz de evaluar eficientemente el núcleo y permita identificar los distintos tipos de anomalías posibles. En tal sentido, ¿resulta el FRA una técnica útil para cumplir este objetivo?

## 2 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de este trabajo es demostrar la influencia que tienen las distintas condiciones anómalas del núcleo sobre el ensayo de Análisis Respuesta en Frecuencia (FRA) para obtener parámetros de interpretación válidos a la hora de realizar diagnósticos.

El alcance del mismo se enmarca en unidades similares a las utilizadas como casos de estudio, por lo que se abarcaron diferentes rangos de potencias y tensiones.

Existen dos variantes posibles para realizar un ensayo de FRA. El Impulse Frequency Response Analysis (IFRA) y el Sweep Frequency Response Analysis (SFRA). Para llevar adelante el trabajo se utilizó la variante de respuesta en frecuencia de barrido (SFRA). En todos los casos bajo estudio se utilizaron las 4 configuraciones de SFRA recomendadas por CIGRE (Fig. 2) [1].

## 3 SFRA

Existen diversas técnicas de medición útiles para evaluar la condición de transformadores, todas ellas de aplicación complementaria, capaces en su conjunto de brindar resultados fiables y confinar la localización de fallas. Las pruebas eléctricas realizables en transformadores son clasificadas en dos categorías: pruebas eléctricas básicas y pruebas eléctricas avanzadas [2]. Entre las pruebas eléctricas avanzadas, una técnica que se destaca a la hora de revelar defectos mecánicos es el “Análisis de Respuesta en Frecuencia” (FRA). Para hacer esta prueba, en su variante de SFRA, se suministra una tensión a un terminal del transformador con respecto a tierra. La tensión medida en este terminal es utilizada como referencia. Una segunda tensión (señal de respuesta) es medida sobre una impedancia conectada entre otro terminal del transformador y tierra. La respuesta en amplitud del SFRA es el cociente entre la señal de respuesta ( $U_r$ ) y la fuente de tensión ( $U_s$ ) en dominio de la frecuencia (usualmente presentado en dB) [1] [3].

La interpretación del ensayo se realiza comparando el resultado obtenido con una referencia, ya sea una respuesta previa del mismo transformador (análisis basado en el tiempo), de otra fase del mismo (análisis basado en el diseño) o de un “transformador hermano” (análisis basado en la simetría constructiva) [4]. Cualquier variación de la respuesta obtenida frente a la referencia, indica cambios mecánicos internos.

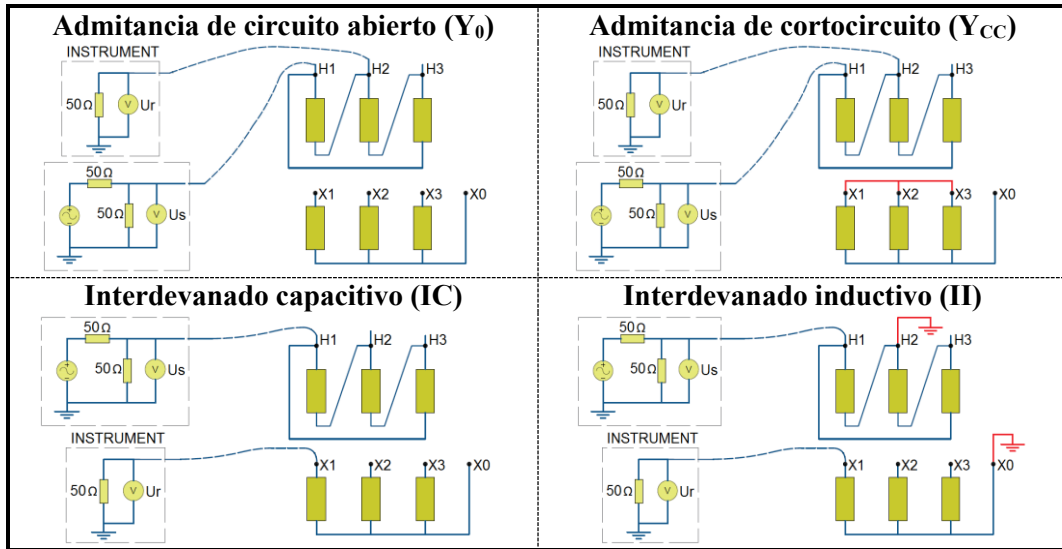


Fig. 2. Configuraciones de SFRA

#### 4 PARÁMETROS DE INTERPRETACIÓN EXISTENTES PARA EVALUACIÓN DEL NÚCLEO

En la norma IEEE C57.149 [4] existe una sección denominada “modos de falla” donde se detallan defectos típicos que se presentan en transformadores de potencia y los rangos de frecuencias donde estos producen cambios en las respuestas de SFRA. La norma [4] sólo hace este desarrollo para las configuraciones  $Y_0$  e  $Y_{CC}$ . Para la magnetización residual tiene un apartado individual (Tabla I). Sin embargo, agrupa los tres tipos de defectos del núcleo mencionados anteriormente en uno solo denominado “defectos del núcleo” (Tabla II).

TABLA I. VARIACIÓN DEL SFRA SEGÚN IEEE C57.149

Rango de frecuencias	Configuración	Magnetización residual
Bajas frecuencias	$Y_0$	La magnetización residual se puede identificar mediante el desplazamiento de la principal resonancia del núcleo hacia la derecha en comparación con los resultados sin magnetización. El núcleo debe desmagnetizarse si existe alguna sospecha acerca de la condición del núcleo.

TABLA II. VARIACIÓN DEL SFRA SEGÚN IEEE C57.149

Rango de frecuencias	Configuración	Defectos en el núcleo
20 Hz – 10 kHz	$Y_0$	Estos tipos de fallas afectan a las regiones de baja frecuencia generalmente por debajo de 10 kHz. Pueden presentarse cambios en la primera resonancia característica de esta configuración. Las variaciones deben ser tomadas con precaución ya que los defectos del núcleo pueden verse enmascarados por la magnetización residual. Si la curva de $Y_0$ parece que tiene carga (es decir, si tiende a parecerse a la de $Y_{CC}$ ), puede ser indicativo de un defecto en el núcleo.
	$Y_{CC}$	Esta región normalmente no se ve afectada ante defectos en el núcleo.
5 kHz – 100 kHz	$Y_0$ e $Y_{CC}$	Pueden presentarse ligeras variaciones o nuevas resonancias.
50 kHz – 1 MHz	$Y_0$ e $Y_{CC}$	En general este intervalo de frecuencias no se ve afectado. Sin embargo, si la falla corresponde a un problema de puesta a tierra del núcleo, pueden aparecer variaciones en las resonancias en la zona de altas frecuencias.
> 1 MHz	$Y_0$ e $Y_{CC}$	Si la falla corresponde a un problema de puesta a tierra del núcleo, pueden aparecer variaciones en las resonancias.

## 5 CASOS DE ESTUDIO

Se analizaron diferentes variantes donde pudieron generarse diferentes condiciones del núcleo. Los tres primeros casos corresponden a transformadores, mientras que el cuarto caso se trata de un reactor de extra alta tensión. En el caso del reactor sólo puede ser ensayado en la configuración de  $Y_0$  ya que se tiene únicamente un devanado. En todas las máquinas restantes se realizaron las cuatro configuraciones de la prueba y en todas las fases correspondientes. A los efectos de la publicación, sólo se presentan las respuestas que resultaron más significativas.

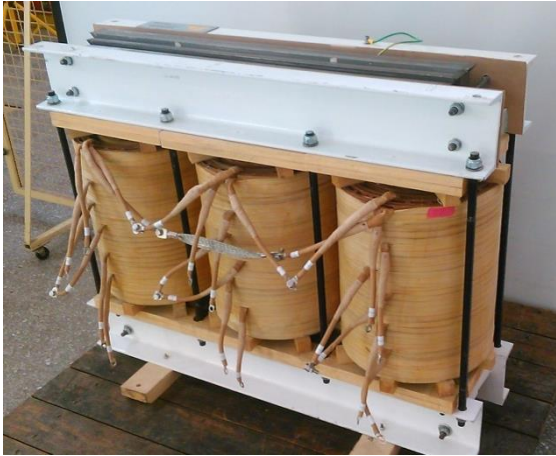


Fig. 3. Caso 1: 13.2/0.4 kV – 160 kVA – Dyn11



Fig. 4. Caso 2: 132/34.5/13.8 kV – 40 MVA – YNyn0d11



Fig. 5. Caso 3: 353/13.8 kV – 140 MVA



Fig. 6. Caso 4: 500 kV – 26.67 MVar (reactor monofásico)

### 5.1 Caso 1

El primer elemento estudiado se trata de un transformador trifásico de 13.2/0.4 kV– 160 kVA – Dyn11. Se trata de una unidad de características típicas de distribución, con un diseño especial que permite reproducir distintos defectos mecánicos. Su aislamiento es de origen celulósico (papel, cartón, madera), pero no se encuentra impregnado de aceite y no tiene cuba. A esta unidad se le realizó un primer ensayo de SFRA considerado como “estado sano”, que se utilizó como referencia. Posteriormente las pruebas de SFRA se realizaron emulando las siguientes condiciones: a) cambio en la reluctancia del núcleo (agregando hierro por encima); b) núcleo sin puesta a tierra; c) núcleo con múltiples puestas a tierra y d) núcleo magnetizado.

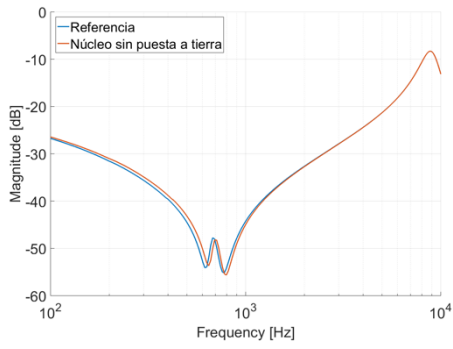
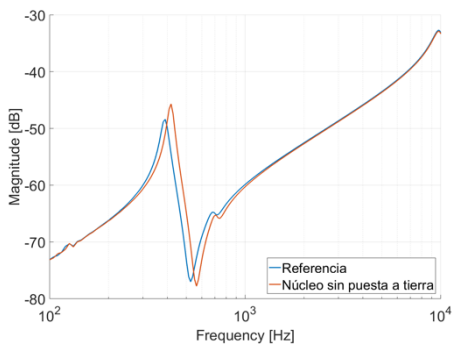
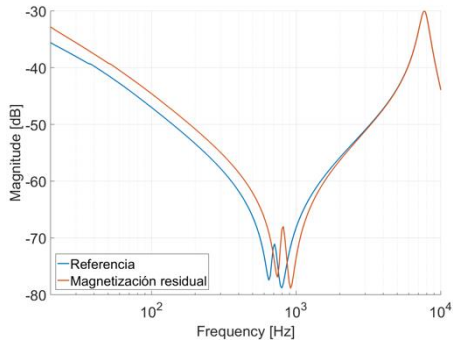
TABLA III. RESULTADOS ESTUDIO DE CASO 1

Defecto	Configuración	Hallazgos	Respuestas significativas
Cambios en la reluctancia del núcleo	$Y_0$	Desviaciones en la región de altas frecuencias (>100 kHz)	
Núcleo sin puesta a tierra	$Y_0$	Desplazamiento de la frecuencia de resonancia principal y desviaciones en la región de altas frecuencias (>100 kHz)	
Múltiple puesta a tierra del núcleo	$Y_0$	Desviaciones en la región de altas frecuencias (>100 kHz)	
Magnetización residual	$Y_0$	Desplazamiento de la resonancia principal hacia la derecha.	
	$Y_{CC}$	Variaciones en magnitud en la región de bajas frecuencias (<1kHz)	

## 5.2 Caso 2

Se trata de un transformador de potencia de 132/34.5/13.8 kV – 40 MVA – YNyn0d11. Esta unidad se ensayó con y sin la puesta a tierra del núcleo. También se compararon las respuestas de SFRA con el núcleo magnetizado y desmagnetizado.

TABLA IV. RESULTADOS ESTUDIO DE CASO 2

Defecto	Config.	Hallazgos	Respuestas significativas
<b>Núcleo sin puesta a tierra</b>	$Y_0$	Variaciones entre 100 Hz y 2 kHz. Desviación de las resonancias principales	
	IC	Cambios entre 100 Hz y 10 kHz. Modificación de las resonancias típicas de esta configuración	
<b>Magnetización residual</b>	$Y_0$	Variaciones significativas entre 20 Hz y 2 kHz junto con desplazamiento en las frecuencias de resonancia	

### 5.3 Caso 3

Este caso se trata de un transformador de 353/13.8 kV – 140 MVA. Esta unidad se ensayó con y sin la puesta a tierra del núcleo.

TABLA V. RESULTADOS ESTUDIO DE CASO 3

Defecto	Config.	Hallazgos	Respuestas significativas
Núcleo sin puesta a tierra	Y <sub>0</sub>	Variaciones entre 20 Hz y 1 kHz. Desviación de las resonancias principales. Cambios significativos por encima de 100 kHz	
	IC	Cambios entre 100 Hz y 1 kHz. Modificación de las resonancias típicas de esta configuración	

### 5.4 Caso 4

Este caso se trata de un reactor de 500 kV – 26.67MVA. Esta unidad se ensayó con y sin la puesta a tierra del núcleo.

TABLA VI. RESULTADOS ESTUDIO DE CASO 4

Defecto	Config.	Hallazgos	Respuestas significativas
Núcleo sin puesta a tierra	Y <sub>0</sub>	Variaciones significativas por encima de 1 kHz junto con desplazamiento en la primera frecuencia de resonancia	

## 6 CONCLUSIONES

El SFRA es una herramienta de diagnóstico útil para evaluar el estado del núcleo magnético del transformador. En base a las experiencias realizadas, la configuración más sensible a este tipo de fallas es la admitancia de circuito abierto  $Y_0$ . Dicha configuración presentó variaciones ante todos los tipos de imperfecciones que se presentaron en el núcleo.

Ante cambios en la reluctancia, es decir, imperfecciones en las vías donde circula el flujo magnético, la configuración de  $Y_0$  presentó ligeras variaciones en la región de altas frecuencias de las respuestas.

El núcleo sin puesta a tierra pudo analizarse en los cuatro casos bajo estudio. En la configuración  $Y_0$  se verificaron desplazamientos en la resonancia principal, ubicada en bajas frecuencias y también se pudieron observar cambios significativos en la región de altas frecuencias, coincidiendo estos resultados con los indicados por la norma IEEE C57.149. Ante este modo de falla también se vieron variaciones significativas en la configuración de IC, en las máquinas de gran potencia.

La múltiple puesta a tierra del núcleo sólo pudo ser generada en el transformador de distribución (caso 1). El comportamiento de la configuración  $Y_0$  para este caso fue muy similar que ante el efecto del cambio en la reluctancia. Solo se evidenciaron pequeños desplazamientos en la región de altas frecuencias (>100 kHz). En principio no sería posible distinguir entre ambos tipos de falla.

Pudo comprobarse que la magnetización residual genera una modificación notoria de la respuesta en la configuración de  $Y_0$ , y en menor medida en la de  $Y_{CC}$ . Este efecto es capaz de enmascarar algunos tipos de fallas e incluso llevar a un diagnóstico incorrecto de la unidad, por lo que desmagnetizar la máquina previo al ensayo de SFRA resulta una medida de extrema importancia. El procedimiento de desmagnetización previo a un ensayo de SFRA está establecido como una recomendación de la norma IEEE C57.149 (Tabla I).

La configuración de II no fue sensible a ninguna de las fallas del núcleo, siendo el punto fuerte de esta configuración la detección de devanados abiertos o en cortocircuito.

Es recomendable apoyarse en ensayos básicos para confirmar los diagnósticos obtenidos con el SFRA. Por ejemplo, realizar el ensayo de corriente de excitación ante sospechas sobre la condición magnética del núcleo, o el ensayo de resistencia de aislamiento del núcleo ante sospechas de más de un vínculo a tierra.

## 7 REFERENCIAS

- [1] Technical Brochure CIGRE 342 WG A2.26, “*Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA)*”, April 2008.
- [2] Technical Brochure CIGRE 445 WG A2.34, “*Guide for Transformer Maintenance*”, February 2011.
- [3] IEC 60076-18-2012: “*Power Transformers - Measurement of Frequency Response*”.
- [4] IEEE C57.149-2012: “*IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers*”.