

**ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA REPETITIVIDAD DE LA
PRUEBA DE RESPUESTA EN FRECUENCIA ESTANDO EL
TRANSFORMADOR EN SERVICIO**

CATALINA ISABEL CARDOZO CABAL

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Santiago de Cali

2012

**ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA REPETITIVIDAD DE LA
PRUEBA DE RESPUESTA EN FRECUENCIA ESTANDO EL
TRANSFORMADOR EN SERVICIO**

CATALINA ISABEL CARDOZO CABAL

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Dirigido por:

EDUARDO GÓMEZ LUNA, Ingeniero Electricista

GUILLERMO APONTE, Doctor en Ingeniería Eléctrica

Asesorado por:

CARLOS GONZÁLES, Doctor en Ingeniería Eléctrica

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Santiago de Cali

2012

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Santiago de Cali, diciembre de 2012

AGRADECIMIENTOS

Durante toda mi carrera universitaria y la realización de mi trabajo de grado, hubo personas a las que estoy infinitamente agradecida, porque gracias a su apoyo pude hacer realidad este sueño que hoy se cristaliza.

A Dios por haberme dado la vida, la salud y la fuerza para seguir adelante en los momentos difíciles.

A mis padres por su apoyo, su guía y su confianza en la realización de nuestros sueños, sin ellos nada de esto podría ser posible.

A Eduardo Gómez, mi director, por su apoyo incondicional, enseñanza, colaboración y principalmente por sus valiosas orientaciones, paciencia y respeto durante este tiempo.

A Guillermo Aponte Mayor y Carlos González, por creer en mis capacidades y por la colaboración recibida durante el desarrollo del proyecto.

A todos mis profesores por haberme guiado en el proceso de aprendizaje durante la carrera.

A todos mis amigos, compañeros y personas que de alguna u otra manera me brindaron su apoyo y ayuda lo largo de toda mi carrera.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. BASES DE LA TÉCNICA DE LA REPUESTA EN FRECUENCIA CON EL TRANSFORMADOR DESENERGIZADO (OFF-LINE) Y ENERGIZADO (ON-LINE).....	13
1.1. INTRODUCCIÓN	13
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA	14
1.3. SISTEMA DE MEDIDA DE LA TÉCNICA DE ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA (FRA OFF-LINE)	16
1.3.1. <i>Etapas 1: Inyección y medida de la señal</i>	17
1.3.2. <i>Etapas 2: Registro de las señales y procesamiento matemático</i>	20
1.3.3. <i>Etapas 3: Análisis de la información para la técnica IFRA y SFRA</i>	21
1.4. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA TÉCNICA FRA CON EL TRANSFORMADOR ENERGIZADO (FRA ON-LINE)	21
<i>Sistema de medida de la técnica de análisis de respuesta en frecuencia on-line (FRA on-line)</i>	23
<i>Etapas 1: Inyección de la señal de excitación y su medida junto con la señal reflejada o de salida</i>	23
<i>Etapas 2: Registro de las señales, filtrado y procesamiento matemático</i>	28
<i>Etapas 3: Cálculo de la Función de Transferencia (FdT) y análisis de la información para la técnica FRA on-line</i>	30
RESUMEN DEL CAPÍTULO I	32
2. FACTORES CON POSIBLE INFLUENCIA EN LA REPETITIVIDAD DE LA PRUEBA FRA ON-LINE	33
2.1. INTRODUCCIÓN	33

2.2. DESCRIPCIÓN DE FACTORES CON POSIBLE INFLUENCIA EN LA REPETITIVIDAD DE LA PRUEBA FRA ON-LINE	34
2.2.1. Punto de operación del transformador	34
2.2.2. Influencia de la red	39
2.2.3. Señal de entrada	42
2.2.4. Procesamiento de señal	43
RESUMEN DEL CAPÍTULO II	45
3. ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA REPETITIVIDAD DE LA PRUEBA IFRA ON-LINE	46
3.1. INTRODUCCIÓN	46
3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ANÁLISIS.....	46
3.2.1. Descripción de los transformadores usados.....	47
3.2.2. Equipo de medición e inyección mediante un impulso para el caso IFRA on-line	50
3.2.3. Software de análisis de señales transitorias para obtener la respuesta en Frecuencia	53
3.2.4. Pruebas off-line para el ajuste experimental de los parametros	54
3.3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA PRUEBA IFRA ON-LINE	63
RESUMEN DEL CAPÍTULO III	71
4. ANÁLISIS DE LA REPETITIVIDAD DEL MÉTODO IFRA ON-LINE HACIENDO USO DE ÍNDICES ESTADÍSTICOS	72
4.1. INTRODUCCIÓN	72
4.2. COEFICIENTES UTILIZADOS PARA LA COMPARACIÓN ENTRE CURVAS IFRA	73
4.2.1. Coeficiente de correlación	73
4.2.2. Suma algebraica del error logarítmico.....	74

4.3. ANÁLISIS CUANTITATIVO ENTRE LAS CURVAS PRESENTADAS EN EL CAPÍTULO III PARA EL ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA REPETITIVIDAD DEL MÉTODO IFRA ON-LINE	75
RESUMEN DEL CAPÍTULO IV.....	82
5. CONCLUSIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXO.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema para la medida del FRA	16
Figura 2. Esquema de inyección y medida para el método IFRA	18
Figura 3. Equipo comercial IFRA FRAMIT Startlogic	18
Figura 4. Esquema de inyección y medida para el método SFRA	19
Figura 5. Equipo M5300, de la serie M5000 de Doble para realizar SFRA	20
Figura 6. Esquema de una bobina Rogowski	25
Figura 7. Esquema de filtrado	30
Figura 8. Vista de planta de una subestación.....	40
Figura 9. Transformador piloto Suntec	48
Figura 10. Transformador piloto Explorer	48
Figura 11. Transformador piloto ABB	49
Figura 12. Transformador piloto Rymel	49
Figura 13. Sistema de inyección de pulsos controlados	50
Figura 14. Punta de tensión	51
Figura 15. Bobina Rogowski	51
Figura 16. Bloque conector NI BNC 2110	52
Figura 17. Tarjeta de adquisición de datos NI PCI 6115	52
Figura 18. Interfaz gráfica en Matlab IFRA on-line	53
Figura 19. Configuraciones de la medida IFRA on-line en un transformador	66
Figura 20. Configuraciones de la medida IFRA on-line en un transformador	68

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. FT con dos posiciones diferentes en el cambiador de Tap.....	35
Gráfica 2. FT medida con diferentes temperaturas.....	36
Gráfica 3. Curva de magnetización y permeabilidad relativa del hierro comercial recocido.....	37
Gráfica 4. Prueba 140 realizada con el prototipo experimental IFRA on-line.....	55
Gráfica 5. Comparación de la prueba 140 realizada con el prototipo experimental IFRA On-line y la prueba realizada con el equipo Megger 101.....	55
Gráfica 6. Comparación de la prueba 143 (configuración baja con alta abierto) y la prueba realizada con el equipo Megger 101.....	56
Gráfica 7. Pruebas IFRA Off-line P140, P141 y P142	57
Gráfica 8. Prueba P136 con IFRA Off-line y ancho de pulso de 1us.....	58
Gráfica 9. Prueba P139 con IFRA Off-line y ancho de pulso de 5us.....	58
Gráfica 10. Prueba P140 IFRA Offline y ancho de pulso de 20us.....	59
Gráfica 11. Prueba P91 con IFRA Off-line y punta de tensión 1x P2220 Tektronix	60
Gráfica 12. Prueba 160 con IFRA Off-line y punta de tensión P6015A1000X Tektronix	60
Gráfica 13. Pruebas IFRA Off-line P140, P141 y P142 con el método matemático transformada Wavelets	61
Gráfica 14. Prueba P177, transformador Rymel con factor de carga $k=0$ (configuración B_AA) y prueba de referencia IFRA off-line P152.....	64
Gráfica 15. Prueba P169 fase R, transformador Explorer con factor de carga $k=0$ (configuración X1Xn_AC) y prueba de referencia IFRA off-line P160.....	64
Gráfica 16. Prueba P170 fase S, transformador Explorer con factor de carga $k=0$ (configuración X2Xn_AC) y prueba de referencia IFRA off-line P161.....	65

Gráfica 17. Prueba P171 fase T, transformador Explorer con factor de carga $k=0$ (configuración X3Xn_AC) y prueba de referencia IFRA off-line P162.....	65
Gráfica 18. Prueba P178 y p179, transformador Rymel con factor de carga $k=0.1$ y $k=0,2$ respectivamente	67
Gráfica 19. Prueba P167 y P175, transformador Explorer fase R con factor de carga $k=0.41$ y $k=0,45$ respectivamente	67
Gráfica 20. Gráfica de posición de pulsos sobre la onda de 60Hz.....	69
Gráfica 21. Prueba P168 sin carga, fase R, transformador Explorer posición 5 sobre la onda de 60 Hz	69
Gráfica 22. Prueba P169 con carga, fase R, transformador Explorer posición 1 sobre la onda de 60 Hz.....	70
Gráfica 23. Prueba P176 con carga, fase R, transformador Explorer posición 4 sobre la onda de 60 Hz.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores que influyen la repetitividad de la prueba FRA.....	44
Tabla 2. Resultados de los parámetros ajustados que hacen que la prueba FRA on-line logre una mejor repetitividad	62
Tabla 3. Interpretación de resultados obtenidos usando el coeficiente de correlación	74
Tabla 4. Interpretación de resultados obtenidos con el coeficiente ASLE	75
Tabla 5. Interpretación de los indicadores estadísticos	76
Tabla 6. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 14, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz.....	76
Tabla 7. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 15, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz.....	77
Tabla 8. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 16, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz.....	78
Tabla 9. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 17, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz.....	78
Tabla 10. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 19, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz	79
Tabla 11. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 20, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz	79
Tabla 12. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 21, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz	80
Tabla 13. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 22 en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz	81
Tabla 14. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 23, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz	82

INTRODUCCIÓN

El transformador es uno de los elementos más importantes en el sistema de potencia, lo cual exige garantizar su continuo funcionamiento y durabilidad. El transformador se encuentra sometido a eventos externos, como las sobretensiones por descargas atmosféricas, suicheos tipo maniobra o entrada y salida de cargas, por ello es menester tener un monitoreo continuo y un diagnóstico adecuado con el fin de evitar salidas inoportunas o fallas inesperadas, logrando un costo menor de mantenimiento posible y maximización del uso del equipo.

El análisis de la respuesta en frecuencia es una técnica de reciente uso por las compañías eléctricas para el monitoreo de los transformadores; sin embargo, se requiere que el transformador se desconecte y aisle del sistema, lo que constituye una desventaja a la hora de su implementación. La aplicación de la prueba con el transformador energizado (FRA on-line) se podría realizar más frecuentemente, puesto que está conectado al sistema, lo cual permitiría conocer la evolución de la condición del transformador en tiempo real y detectar problemas futuros, evitando fallos intempestivos.

Es importante que la medida FRA on-line presente una repetitividad adecuada, para que cualquier cambio producido en la respuesta se pueda asumir inequívocamente a una falla y no a un efecto externo que modifique la medida. En este trabajo de grado se presenta una descripción de las bases de la técnica FRA y se analizan teórica y experimentalmente los factores que afectan la repetitividad del método IFRA on-line.

1. BASES DE LA TÉCNICA DE LA REPUESTA EN FRECUENCIA CON EL TRANSFORMADOR DESENERGIZADO (OFF-LINE) Y ENERGIZADO (ON-LINE)

1.1. INTRODUCCIÓN

El transformador es uno de los elementos más importantes y costosos en el suministro de energía eléctrica, lo cual hace necesario garantizar su vida útil y funcionamiento correcto. Además, hay técnicas diversas de monitoreo que proporcionan información detallada del transformador y permiten diagnosticar el estado del mismo; entre ellas, se encuentra el Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA, en inglés *Frequency Response Analysis*), usada especialmente para la detección de fallos mecánicos en el transformador.

Actualmente, la técnica FRA requiere que el transformador se desconecte y aislado del sistema lo que constituye una desventaja a la hora de su aplicación. La aplicación de la prueba con el transformador energizado (on-line) se podría realizar más frecuentemente debido a que no se desconecta del sistema, lo cual permitiría conocer la evolución de la condición del transformador en tiempo real y detectar problemas futuros evitando fallos intempestivos. Diagnosticar el transformador on-line por medio de esta técnica, implica afrontar y resolver una serie de dificultades, que se analizarán a lo largo de este trabajo.

1.2. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA

El Análisis de la Respuesta en Frecuencia (FRA) es una técnica para la evaluación del estado de los transformadores utilizada a nivel mundial como complemento y apoyo de otras técnicas de diagnóstico; especialmente para la detección de problemas mecánicos posibles, como desplazamientos o deformaciones en los arrollamientos o chapas del núcleo, las cuales pueden resultar más difíciles de localizar mediante el uso de otras técnicas. Esta técnica tiene las bases siguientes de desarrollo:

- Consiste en la obtención del comportamiento del transformador en un amplio ancho de banda en frecuencia, cuando es medido entre cualquiera de dos de sus terminales accesibles.
- Para la obtención de la respuesta en frecuencia es necesario la inyección de una señal de excitación o entrada por uno de los terminales y la medida de la señal reflejada o salida por otro.
- La Función de Transferencia (FdT) que contiene la información del comportamiento del transformador se define como el cociente entre las señales de salida y entrada¹.

La técnica FRA se usó inicialmente como una aplicación derivada del ensayo tipo *impulso de bajo voltaje* (LVI, en inglés *Low Voltage Impulse*), que estaban estudiando W. Lech y L. Tyminski² en 1960 y sus primeras pruebas experimentales se realizaron en . A.G. Richenbacher³ en 1976 continuó esta línea de trabajo, pero los primeros trabajos de investigación con suficiente profundidad sobre la técnica

¹ E. Gómez-Luna, G. Aponte, C. Gonzalez-Garcia, J. Pleite "Current Status and Future Trends in the Frequency Response Analysis (FRA) with the Transformer in Service" IEEE Transactions on Power Delivery, December 2012 (paper accepted).

² Low Voltage Impulse Method (LVI). First proposed by W. Lech & L. Tyminski in Poland for detecting transformer winding deformation.1960.

³ RICHENBACHER, A.G. Frequency Domain Analysis of Responses From L.V.I. Testing of Power Transformers. 43rd Doble. Int'l Client Conference. 1976.

FRA fueron realizados por Dick y Erven⁴ entre 1975 y 1977 en Balneario de Ontario en Canadá, haciendo su primera publicación en 1978. Estas investigaciones no fueron muy llamativas hasta después de 10 años, cuando la Central Electricity Generating Board en el Reino Unido aplicó esta técnica en transformadores de potencia, lo cual permitió que se pudieran continuar las investigaciones en FRA en esta empresa. Estas investigaciones iniciaron describiendo cómo obtener la respuesta en frecuencia del transformador aplicando una señal sinusoidal en un amplio rango de frecuencia (SFRA), incrementando la sensibilidad en la detección de deformaciones de los devanados y abriendo dos ramas de la investigación: el SFRA (, en inglés *Sweep Frequency Response Analysis*) y el IFRA (en *inglés Impulse Frequency Response Analysis*). Actualmente se han realizado muchos avances en la realización de la prueba FRA con el transformador desenergizado (FRA off-line) y se están llevando a cabo investigaciones para realizarla con el transformador energizado (FRA on-line).

Se experimentaron con dos métodos para la ejecución de la técnica FRA, diferenciados principalmente por la señal de entrada usada para excitar el transformador, IFRA (Análisis de la Respuesta en Frecuencia ante un Impulso) y SFRA (Análisis de la Respuesta en Frecuencia ante un Barrido Frecuencial):

- **Método IFRA.** La señal inyectada por cualquiera de los terminales accesibles del transformador que actúa como señal de excitación o de entrada es una tensión no periódica con valor máximo del orden de cientos de voltios y un contenido frecuencial suficiente para obtener una respuesta en frecuencia en un amplio ancho de banda⁵.

⁴ DICK, E. P., y ERVEN, C. C. Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis. En: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Diciembre, 1978. Vol. 97, No. 6. pp. 2144-2153 C.G.A.

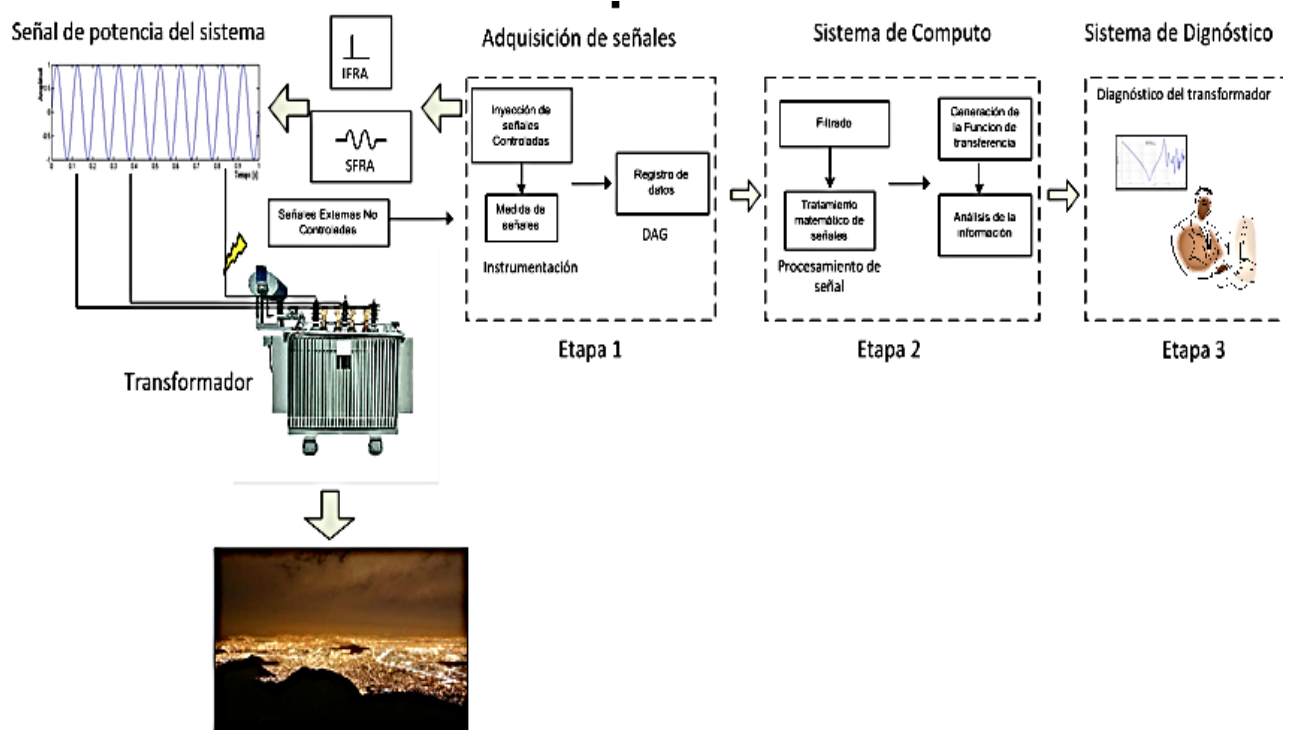
⁵ GOMEZ et al. Op. Cit.

- **Método SFRA.** La señal de excitación o de entrada es en este caso una señal periódica sinusoidal de amplitud del orden de unidades de voltio cuya frecuencia varía en un ancho de banda entre Hz y MHz.

1.3. SISTEMA DE MEDIDA DE LA TÉCNICA DE ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA (FRA OFF-LINE)

La aplicación de la técnica FRA sigue tres etapas, a saber: 1) Inyección y medida de la señal, 2) Registro de las señales y procesamiento matemático, y 3) Análisis de la información para la técnica IFRA y SFRA. En la Figura 1 se muestran tales etapas, durante las cuales el transformador se encuentra desconectado de la red (off-line).

Figura 1. Esquema para la medida del FRA⁶.



⁶ GÓMEZ et al. Op. cit.

1.3.1. Etapa 1: Inyección y medida de la señal

Para la etapa de inyección en el método IFRA se aplica una tensión de tipo impulso en la estructura del devanado, cuyo valor máximo varía usualmente desde los 200V hasta 2kV. La obtención de una respuesta en ancho de banda amplio requiere que la señal de excitación presente un contenido frecuencial amplio. Los parámetros típicos del impulso son: tiempos de frente de 200ns a 1 μ s y tiempo medio de 40 μ a 200 μ s⁷.

La medición puede realizarse de forma manual o automática. La medición manual se hace por medio de un generador de señal, obteniendo independientemente los datos de corrientes o tensión necesarios, por medio de equipos como voltímetros o amperímetros. La medición automática, que se muestra en la Figura 2, en cambio, consiste en usar equipos como el PHENIX FRA 100 o el FRAMIT Startlogic (Figura 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), los cuales contienen canales de entrada que toman los datos, los digitalizan y almacenan⁸. Estos equipos deben contar con un ancho de banda amplio y resolución alta, de modo que puedan medir señales de valores en torno a los milivoltios.

⁷ CASTAÑO, C. Evaluación del estado eléctrico y mecánico del transformador mediante el análisis de la variación en frecuencia de sus parámetros eléctricos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Eléctrico. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. 2008.

⁸ Ibíd.

Figura 2. Esquema de inyección y medida para el método IFRA⁹.

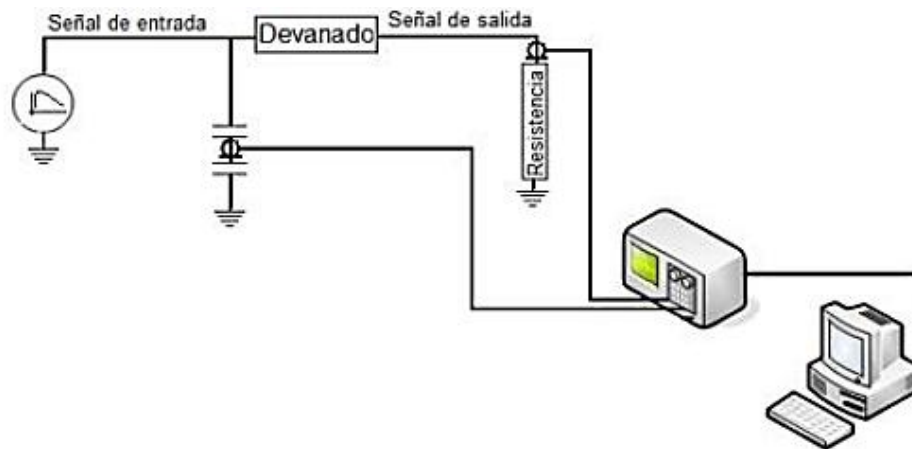


Figura 3. Equipo comercial IFRA FRAMIT Startlogic¹⁰.



En la etapa de inyección del método SFRA las señales de excitación deben ser exclusivamente de tipo sinusoidal periódicas de frecuencia variable, en un ancho de banda que va desde Hz hasta MHz. La señal puede generarse por una fuente de excitación externa o por el mismo equipo de medición (un analizador de red) y aplicarse al devanado del transformador por medio de un cable de medición¹¹.

La medición, representada en el esquema de la Figura 4 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, puede realizarse de forma manual o automática. La medición manual se hace por medio de una fuente de frecuencia variable aplicada

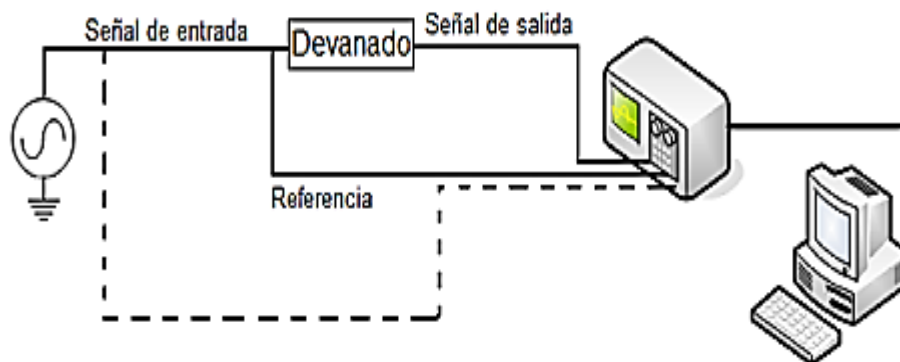
⁹ Ibíd.

¹⁰ <http://www.framit.com>.

¹¹ CASTAÑO. 2008. Op. Cit.

al transformador, obteniendo independientemente los datos de corrientes o tensión necesarios. La medición automática consiste en usar un instrumento el cual contiene una fuente de frecuencia variable junto con canales de entrada que toman los datos, los digitalizan y almacenan, haciendo el barrido en las diferentes frecuencias automáticamente¹². Estos equipos deben contar con un ancho de banda amplio, resolución alta y ser capaces de medir señales del orden de milivoltios.

Figura 4. Esquema de inyección y medida para el método SFRA¹³.



En la actualidad existen instrumentos comerciales diferentes que pueden hacer este proceso, tales como: OMICRON FRAnalyzer, FRAX 101, TETTECH FRA 5310, B&C Diagnostics TRAFTEK, DOBLE serie M5000. Este último se presenta en la Figura 5:

¹² Ibid.

¹³ Ibid.

Figura 5. Equipo M5300, de la serie M5000 de Doble para realizar SFRA¹⁴.



M5300 SFRA	
Canales	2
Rango de frecuencia	10Hz-25MHz
Muestreo	Simultaneo
Frecuencia de muestreo	100 MS/s
Número de puntos	1000 puntos (por defecto) Por encima de 1800 puntos (rango extendido)
Impedancia de la fuente	50Ω
Rango dinámico	>90dB
Repetibilidad	±1 dB a -80 dB
Voltaje de salida	20 V pico a pico a 50Ω

Tenbohlen y Ryder¹⁵, entre otros autores, aseguran que el método SFRA es más robusto y confiable que el método IFRA, debido a que los niveles de energía aplicados para todo el rango de frecuencia se pueden considerar como constantes, obteniendo así datos influenciados en menor medida por el ruido del sistema.

1.3.2. Etapa 2: Registro de las señales y procesamiento matemático

Para el caso de la etapa 2, en el método IFRA, la señal de excitación y las señales de tensión o corriente que se generan en el interior del transformador se registran por medio de un osciloscopio digital o un registrador de transitorios. La obtención del espectro frecuencial de la señal temporal inyectada (entrada) y medida (salida) se realiza mediante tratamientos matemáticos, como el de la transformada rápida de Fourier (FFT), para calcular la Función de Transferencia (FdT) del sistema, definida como el cociente salida/entrada para todos los componentes frecuenciales¹⁶. En la técnica SFRA el registro se realiza por medio de equipos como el doble M5300, el cual debe tener un ancho de banda y una resolución grande.

¹⁴ <http://www.doble.com/products>

¹⁵ TENBOHLEN, S. y RYDER, S. A. Making Frequency Response Analysis Measurements: A Comparison of the Swept Frequency and Low Voltage Impulse Methods. XIII ISH Netherlands. 2003.

¹⁶ GOMEZ et al. Op. Cit.

El procesamiento matemático más utilizado es la función de transferencia, el cual se realiza con la relación de señales de salida y entrada en el punto determinado; dichas señales se digitalizan y envían a un ordenador para el cálculo de la FdT, y la admitancia (magnitud y ángulo de fase) del devanado se traza como una función de la frecuencia¹⁷.

1.3.3. Etapa 3: Análisis de la información para la técnica IFRA y SFRA

El análisis de la información para los métodos IFRA y SFRA consiste en la interpretación de las curvas que arrojan estos métodos, tomando como referencia la huella del transformador y comparándola con la obtenida mediante la prueba FRA, para lograr detectar las fallas.

1.4. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA TÉCNICA FRA CON EL TRANSFORMADOR ENERGIZADO (FRA ON-LINE)

Para llevar a cabo la técnica FRA es necesaria la desconexión del transformador, generando costos altos y disminución de la confiabilidad del suministro. Estos inconvenientes exigen que la prueba se programe exclusivamente cuando haya una sospecha de falla y no tan frecuentemente como sería deseable. La medida continua del estado del transformador mediante la técnica de la respuesta en frecuencia (FRA on-line) presenta ventajas numerosas en un programa de diagnóstico con base en su condición de operación, lo que genera un interés notable entre el sector productivo y la comunidad científica¹⁸.

¹⁷ Ibid.

¹⁸ Ibid.

La técnica FRA con el transformador energizado (on-line) consiste en aplicar las mismas etapas analizadas en el apartado anterior para cualquiera de los métodos IFRA o SFRA, pero con el transformador conectado al resto del sistema y aplicando la tensión nominal de operación¹⁹. Las ventajas que se tienen al realizar la medida en estas condiciones (on-line) son:

- No se suspende el suministro eléctrico para hacer la prueba.
- Se dispondría de un registro del estado del transformador en todo momento, pudiéndose anticipar a fallos que podrían ser catastróficos en el sistema de potencia.
- Se evitan los costos asociados a la desconexión y posterior puesta en funcionamiento²⁰.

Tales ventajas derivan en una mejor explotación del sistema de potencia, tal como lo plantea Bengtsson²¹, quien manifiesta la importancia del desarrollo de las pruebas de diagnóstico en los transformadores de potencia en servicio, debido a los cambios en los mercados de electricidad, con el propósito de garantizar una confiabilidad alta y un costo bajo en el mantenimiento. Malewski, Douville y Lavallée²² igualmente exponen que el crecimiento de las redes eléctricas requiere la implementación de herramientas de monitoreo on-line, que permitan tener características dinámicas del sistema, logrando tomar decisiones oportunas para evitar cualquier tipo de falla²³.

¹⁹ *Ibíd.*

²⁰ *Ibíd.*

²¹ BENGTTSSON, C. Status and trends in transformer monitoring. *En:* IEEE Transactions on power delivery, Julio, 1995. Vol. 11, No. 3.

²² MALEWSKI, R. et al. Measurement of Switching Transients in 735 kV Substations and Assessment of their Severity for Transformer Insulation. *En:* IEEE Transactions on Power Delivery. Octubre, 1988. Vol. 3, No. 4.

²³ GÓMEZ et al. Op. Cit.

Sistema de medida de la técnica de análisis de respuesta en frecuencia on-line (FRA on-line)

La aplicación de la metodología FRA on-line sigue las etapas de la Figura 1. A continuación se presenta una descripción de las tres etapas para los métodos IFRA on-line y SFRA on-line.

Etapas 1: Inyección de la señal de excitación y su medida junto con la señal reflejada o de salida

Según Gómez et al., para la etapa de inyección en el método IFRA on-line se propone clasificar las señales de entrada en dos tipos:

- **Controladas:** son aquellas que se inyectan en la línea del sistema de potencia desde la instrumentación de medida (Figura 1) para la excitación del transformador. Presentan la ventaja de que se puede determinar exactamente el momento de la inyección y todos sus parámetros para asegurar un contenido frecuencial adecuado. Sin embargo, es necesario disponer de una instrumentación compleja para conectar el sistema de inyección a la red de potencia. Hasta el momento no existen avances sobre la inyección de este tipo de señales.
- **No controladas:** son aquellas perturbaciones que siempre están presentes en la operación de la red. Existen dos tipos: por un lado, las señales en cuyo contenido frecuencial predominan las componentes de baja frecuencia, como la onda tipo impulso de maniobra (apertura/cierre de interruptores o entrada/salida de carga); por otro lado, las señales compuestas por impulsos provenientes de las descargas atmosféricas, donde predominan las componentes de frecuencia

alta. Ambos tipos presentan la ventaja de que no requieren un sistema externo de inyección²⁴.

En el proceso de medida de las señales no controladas, la mayoría de los autores proponen o utilizan las siguientes alternativas:

La medida de la tensión en bornes se realiza a través del *Bushing Tap Coupler* (BTC), ya que permite una disminución de la tensión a través de un divisor capacitivo cuya relación de transformación se mantiene constante en un amplio ancho de banda²⁵. Los profesores de la Universidad British Columbia, A. Setayeshmehr, A. Akbari, H. Borsi y E. Gockenbach implementaron la medida on-line a través del BTC.

En el año 2009, Wimmer y Feser²⁶ muestran una alternativa en el caso de que el transformador no disponga de esta toma consistente en la instalación de sensores capacitivos no invasivos (NICS) sobre la superficie de los bujes. La medida de la corriente a través del arrollamiento se realiza mediante transformadores de corriente²⁷ de ancho de banda amplio destacando las Bobinas Rogowski, lo que limita la problemática de la conexión en alta tensión y presenta un buen comportamiento en un ancho de banda amplio²⁸.

²⁴ *Ibíd.*

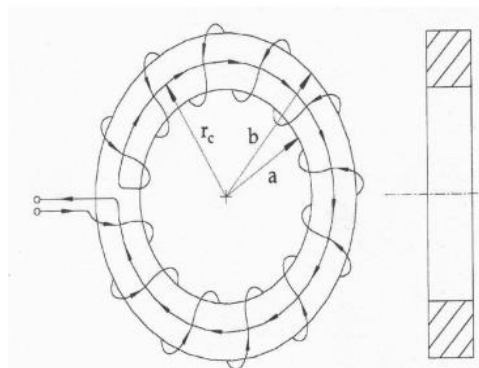
²⁵ Ampliar en SETAYESHMEHR, A. et al. On-line Monitoring of Transformer via Transfer Function. *En:* IEEE Electrical Insulation Conference, Canadá. June, 2009. pp. 278-282; y en MELO, M. y ALVES, M. Experience with on-line monitoring of capacitance and tangent delta of condensive bushings. *En:* IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition. Latinoamérica. 2008. pp. 1-6.

²⁶ WIMMER, R. y FESER, K. Calculation of the transfer function of a power transformer with online measuring data. *En:* Technology. 2004. No. 3, p. 5.

²⁷ Ampliar en LEIBFRIED, T. y FESER, K. Monitoring off power transformers using the transfer function method. *En:* Power Delivery, IEEE Transactions on. Octubre, 1999. Vol. 14, No. 4. pp. 1333-1341; y en COFFEN, L. System and Method for On-Line Impulse Frequency Response Analysis. Estados Unidos, Patent 6549017B2. Abril 15, 2003.

²⁸ GÓMEZ et al. Op. Cit.

Figura 6. Esquema de una bobina Rogowski²⁹.



La medida de los transitorios no controlados es un procedimiento utilizado desde la década de 1990 aproximadamente. En el año 1988, Malewski et al.³⁰ estudiaron la medición de los transitorios producidos por operaciones de maniobra (*switching operations*) y descargas atmosféricas, utilizando registradores digitales automáticos con el fin de determinar deformaciones de los devanados posibles³¹. Para el año 1992, Malewski et al.³² publicaron los resultados de experiencias en este campo, durante 5 años en el diagnóstico de transformadores en servicio, usando el sistema de medida FRA on-line a través de la función de transferencia y el registro digital³³.

Leibfried y Feser³⁴ presentaron aportes en 1994 y 1998, utilizando señales no controladas y el mismo sistema de medición. De nuevo se presenta el uso de la función de transferencia con el transformador en y fuera de servicio, mostrando las ventajas y limitaciones de estos dos métodos.

²⁹ <http://electronica.uc3m.es/groble/publicaciones>

³⁰ Ampliar en ARGÜESO, M. Estudio de una bobina de Rogowski como sonda detectora de pulsos de alta frecuencia. Tesis de doctorado. Universidad Carlos III de Madrid. 2005; y en MALEWSKI. 1988. Op. Cit.

³¹ GÓMEZ et al. Op. Cit.

³² MALEWSKI, R. et al. Five Years of monitoring the impulse test of power transformers with digital recorders and the transfer function method. CIGRE paper. París, 1992. No. 12-201.

³³ GÓMEZ et al. Op. Cit.

³⁴ Ampliar en LEIBFRIED, T. y FESER, K. On-line Monitoring of Transformers by Means of the Transfer Function Method. Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA Estados Unidos, June 5-8, 1994; y en LEIBFRIED, T y FESER, K. 1999. Op. Cit.

Vandermaar³⁵ publica un documento en el 2001, en el cual muestra la técnica utilizada para obtener FRA on-line mediante pulsos o suitcheos con el transformador energizado, y las experiencias obtenidas en 5 transformadores de campo. En los estudios y aportes presentados por Vandermaar, Wang³⁶, Wimmer³⁷ y Setayeshmehr³⁸, se usaron de nuevo las señales no controladas y el mismo sistema de medida.

Finalmente Coffeen³⁹ presenta la patente N°. 6549017, en la base de datos de los Estados Unidos, donde se describe y presenta la manera en que se puede obtener la respuesta en frecuencia del transformador estando en servicio en el dominio temporal, mediante operaciones de suitcheo y maniobra. Sin embargo, manifiesta la necesidad de una investigación mayor, por lo cual publica resultados de sus investigaciones en los años 2003, 2007 y 2009⁴⁰.

Para la Etapa 1 en el método SFRA las señales de excitación inyectadas deben ser exclusivamente controladas y de tipo sinusoidal periódicas de frecuencia variable⁴¹. En este caso es necesario aplicar un filtrado que separe la señal de la red 50/60 Hz de la señal de medida cuya frecuencia varía en un ancho de banda desde Hz a MHz⁴².

³⁵ VANDERMAAR, A. On-line Frequency Response Analysis System. Development of Specifications. EPRI Project Manager, Technical Progress. Canadá, Diciembre, 2001.

³⁶ Ampliar en WANG, M. et al. Condition monitoring of transformers in service by the low voltage impulse method. En: IEEE High Voltage Engineering Symposium, Vancouver, Canadá. Agosto, 1999; y en WANG, M. Winding movement and condition monitoring of power transformers in service. Tesis de Doctorado. University of British Columbia. 2003.

³⁷ WIMMER y K. Feser. Calculation of the transfer function of a power transformer with online measuring data Technology, no. 3, p. 5, 2004.

³⁸ SETAYESHMEHR. Op. Cit.

³⁹ COFFEN. System and Method for On-Line Impulse Frequency Response Analysis. 2003. Op. Cit.

⁴⁰ Ampliar en COFFEN, L. On-line Frequency Response Analysis System. Development of Specifications. EPRI Project Manager, Technical Progress. Estados Unidos. Marzo, 2003; en COFFEEN, L. et al. On-Line Monitor Tracks Transformer Health. NEETRAC, Technical Report, Florida Power & Light. Octubre, 2007; en COFFEEN, L. et al. A Summary of NEETRAC On-line Frequency Response Analysis (FRA) and a New EPRI Commercial Prototype FRA Installation at First Energy. En: NEETRAC and EPRI Substation Equipment Maintenance Optimization & Diagnostics Conference, San Antonio, TX, Marzo, 2009; y en COFFEEN, L. et al. An on-line frequency response analysis (FRA) update. *TechCon*, 2009. pp. 129-151.

⁴¹ GÓMEZ et al. Op. Cit.

⁴² DE RYBEL, T. et al. Online Signal Injection Through a Bus-Referenced Current Transformer. *Power Delivery*, IEEE Transactions on. Enero, 2010. Vol. 25, No. 1. pp. 27-34.

Hasta el momento se vienen realizando diferentes propuestas principalmente en cuanto a la inyección de señal; se plantea la aplicación de la señal sinusoidal de frecuencia variable junto con la tensión de red de 50/60 Hz según las soluciones propuestas por diferentes autores⁴³. Dichas propuestas consisten en la inyección de las señales de excitación a través del BTC pero añadiendo el uso de filtros de bloqueo que impiden que las señales de frecuencia variable y distinta a los 50/60 Hz de red se propaguen por las líneas de potencia, evitando interferencias. La aplicación de este tipo de filtros es habitual en telemando y telecontrol del sistema donde se mide señales para transmisión de datos de frecuencias variables y que viajan en las mismas líneas que la tensión de la red⁴⁴.

Existe bibliografía diversas sobre el tema, como el trabajo presentado en 2006 por Ramseier y Spiess⁴⁵, donde se describen las últimas tecnologías y tendencias acerca de los sistemas de onda portadora sobre líneas de energía, más conocido como *Power Line Communication* (PLC); este tiene gran utilidad para los sistemas de telemando y control en las redes eléctricas. Asimismo, en el 2011 Galli, Scaglione y Wang⁴⁶ presentan la función que cumplen los PLC en las redes inteligentes (*Smart Grid*), mostrando las grandes ventajas y las tendencias futuras en los sistemas de comunicación y control en las redes eléctricas, ya que el sistema implementado podría supervisarse desde una red inteligente, posibilitando la toma de decisiones oportunas del estado real de operación del transformador⁴⁷.

⁴³ Ampliar en SETAYESHMEHR. 2009. Op. Cit.; en MELO. Op. Cit.; y en WIMMER. Op. Cit.; y en SETAYESHMEHR, A. et al. On-line Monitoring and Diagnoses of Power Transformer Bushings. En: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, June, 2006. Vol. 13, No. 3.

⁴⁴ GÓMEZ et al. Op. Cit.

⁴⁵ RAMSEIER, S. y SPIESS, H. El canto de las líneas eléctricas. En: Revista ABB. Switzerland. Febrero, 2006.

⁴⁶ GALLI, S. et al. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. En: Proceedings of the IEEE. Junio, 2011. Vol. 99, No. 6.

⁴⁷ GÓMEZ et al. Op. Cit.

Etapa 2: Registro de las señales, filtrado y procesamiento matemático

Algunos autores⁴⁸, exponen que para el método IFRA el registro de las medidas se desarrolla comúnmente mediante registradores digitales, donde una elevada resolución, rapidez de muestreo y longitud de memoria son fundamentales para el registro satisfactorio del ancho de banda que constituyen las señales para calcular la respuesta en frecuencia.

Adicionalmente, Wang⁴⁹ presenta un análisis detallado de la incidencia en la medida del uso de diferentes configuraciones del registrador, mostrando la importancia de escoger una adecuada frecuencia de muestreo para obtener resultados apropiados en la respuesta en frecuencia on-line⁵⁰.

Para el método IFRA on-line, en relación con la filtración de las señales eléctricas que provienen del sistema de potencia los aportes son escasos y en algunas publicaciones no se presentan en detalle. En particular, Coffeen⁵¹ presenta un filtrado mediante técnicas matemáticas usando la función de coherencia; otros autores⁵² solo mencionan la eliminación de los problemas de *antialiasing*.

El procesamiento matemático de la señal se realiza para obtener su contenido frecuencial⁵³. En el caso del IFRA on-line la herramienta más utilizada tradicionalmente ha sido la transformada rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform)⁵⁴. No obstante, Robertson et al.⁵⁶ plantean que la idoneidad de su uso puede ser cuestionable para el análisis de las señales

⁴⁸ Véase en WANG. 1999. Op. Cit.; y en LEIBFRIED, T. y FESER, K. Off line and on-line monitoring of power transformers using the Transfer Function method. En: Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Canadá. Junio 16-19, 1996. pp. 34-37.

⁴⁹ WANG. 2003. Op. Cit.

⁵⁰ GÓMEZ et al. Op. Cit.

⁵¹ COFFEN. System and Method for On-Line Impulse Frequency Response Analysis. 2003. Op. Cit.

⁵² Véase en LEIBFRIED y FESER. 1999. Op. Cit.; y en WANG. 2003. Op. Cit.

⁵³ GÓMEZ et al. Op. Cit.

⁵⁴ GÓMEZ et al. Op. Cit.

⁵⁶ ROBERTSON, D. C. et al. Wavelets and electromagnetic power system transients. En: IEEE Transactions on Power Delivery. Abril, 1996. Vol, 11.

transitorias de la medida debido a su duración corta, mientras que la FFT está principalmente definida para señales de duración teóricamente infinitas.

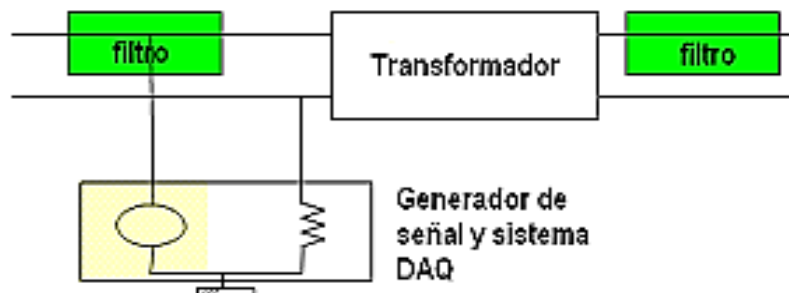
Por otro lado, existen avances grandes en tecnología en torno al registro de las señales del método SFRA. Hay pruebas realizadas hasta el momento que no han hecho uso de estos avances; además los aportes son escasos y en algunas publicaciones no se presentan específicamente. En particular, Dick y Erven⁵⁷ presentan un registrador digital con base en una tarjeta DAQ multifuncional *National Instruments*. Los cuatro convertidores A/D de 12bits de esta tarjeta trabajan de manera simultánea a una velocidad de muestreo de 10MHz y el almacenamiento de datos se realiza en una memoria de 64M.

Hasta el momento el filtrado de las señales eléctricas que provienen del sistema de potencia para el método SFRA on-line, tienen pocos avances. En la Figura 7 se presenta un esquema de filtrado propuesto por González et al.⁵⁸, mediante filtros selectivos de la señal de alimentación de HV y filtros activos con el fin de aislar el transformador del resto de elementos de la red eléctrica. Estos filtros se localizan antes y después del transformador.

⁵⁷ DICK y ERVEN. Op. Cit.

⁵⁸ GONZALEZ. An overview of the On Line Application of Frequency Response Analysis (FRA). 2007. Op. Cit.

Figura 7. Esquema de filtrado⁵⁹.



En el método SFRA on-line, al disponer de la respuesta por separado para cada una de las frecuencias de medida, se evita la necesidad de aplicar el tratamiento matemático (Figura 1) para la obtención de las componentes frecuenciales de las señales no sinusoidales medidas en el método IFRA⁶⁰.

Etapas 3: Cálculo de la Función de Transferencia (FdT) y análisis de la información para la técnica FRA on-line

En la etapa 3, el cálculo y diagnóstico de la FdT debe ser independiente de la metodología IFRA o SFRA utilizada, ya que el transformador medido no cambia⁶¹. Como se muestra en la Figura 1, esta etapa consiste: 1) en calcular la FdT a partir de las componentes frecuenciales de las señales obtenidas en las etapas anteriores, ámbito en el que se realizan investigaciones que buscan principalmente la repetitividad de los resultados; y 2) mediante herramientas diversas de análisis, tratar la información contenida en la FdT calculada para la interpretación de los resultados –por parte del personal cualificado– y posterior obtención de un diagnóstico que permita finalmente identificar el estado de la máquina.

En el proceso de la etapa 3, autores diversos han hecho importantes aportes. El diagnóstico del transformador mediante el análisis de la FdT medida con el método

⁵⁹ Ibid.

⁶⁰ GÓMEZ et al. Op. Cit.

⁶¹ Ibid.

IFRA on-line fue defendido por Leibfried y Feser⁶², quienes describieron el método y los componentes del sistema de medida. Leibfried, específicamente, explicó las razones de idoneidad de este sistema en su texto *On-line Monitors keep transformers in service*⁶³. Y en *On-line monitoring of power Transformers – System Technology and data evaluation*⁶⁴ presentó un sistema de adquisición de datos y evaluación de los mismos para mediciones de la FdT on-line; tema que continuó Feser⁶⁵.

Pinhas, Islam y Hullett⁶⁶ siguieron esta línea de investigación, presentando el uso de la función de transferencia para identificar desplazamientos en los devanados con el transformador en servicio. Wang⁶⁷, en la Universidad British Columbia, Canadá, estudió de manera detallada la incidencia en la interpretación que tienen los cables de medida para altas frecuencias.

También se han comparado las mediciones realizadas de manera off-line y on-line mostrando la sensibilidad de cada método. El *National Electric Energy Testing Research and Applications Center* (NEETRAC) conjuntamente con el Electric Power Research Institute (EPRI)⁶⁸ realizan investigaciones para el avance en la medida on-line; en las publicaciones de tales investigaciones presentan las experiencias realizadas con el prototipo de FRA on-line mediante operaciones de suitcheo en un autotransformador de 345/140 kV, 448 MVA, demostrando la viabilidad de la técnica

⁶² LEIBFRIED y FESER. 1994. Op. Cit.

⁶³ LEIBFRIED, T. On-line Monitors keep transformers in service. En: IEEE Computer Applications in Power. 1998. pp. 1-7.

⁶⁴ LEIBFRIED, T. Online monitoring of power Transformers – System Technology and data evaluation. Siemens Germany. High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication. August, 1999. pp.22-27.

⁶⁵ FESER. Op. Cit.

⁶⁶ Citados por GÓMEZ et al. Op. Cit.

⁶⁷ WANG. 2003. Op. Cit.

⁶⁸ COFFEEN. A Summary of NEETRAC On-line Frequency Response Analysis (FRA) and a New EPRI Commercial Prototype FRA Installation at First Energy. 2009. Op. Cit.

implementada. Adicionalmente, EPRI⁶⁹ presenta un prototipo para el sistema de medida, alertando sin embargo de la necesidad de un avance en su desarrollo.

RESUMEN DEL CAPÍTULO I

En este capítulo se explicaron los conceptos de la técnica del análisis de la respuesta en frecuencia (FRA) y se detallaron las dos maneras para llevar a cabo: IFRA y SFRA. También se realizó una descripción de las 3 etapas que se deben seguir para tales métodos de FRA off-line. Además, se describió la importancia de usar el análisis de la respuesta en frecuencia con el transformador energizado (FRA on-line), por otro lado se hizo un análisis de las 3 etapas que debe cumplir para los métodos IFRA Y SFRA con el transformador en servicio, mostrando aportes de diferentes autores.

En el capítulo siguiente presentará una descripción de los factores que pueden afectar la repetitividad de la prueba FRA on-line.

⁶⁹ <http://my.epri.com/portal/server.pt?space=CommunityPage&cached=true&parentname=ObjMgr&parentid=2&control=SetCommunity&CommunityID=221&PageIDqueryComId=0>. Página web visitada el 01 de Agosto de 2010.

2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA REPETITIVIDAD DE LA PRUEBA FRA ON-LINE

2.1. INTRODUCCIÓN

La técnica FRA on-line mide la respuesta en frecuencia del transformador ante señales de excitación aleatoria mediante el método IFRA. Cualquier modificación en la señal de excitación o en la condición del transformador puede tergiversar la obtención de la respuesta en frecuencia.

Es importante que la medida FRA on-line presente una repetitividad adecuada para que cualquier cambio producido en la respuesta, se pueda asumir inequívocamente a una falla y no a un efecto externo que modifique la medida. El diagnóstico a partir del análisis de las respuestas medidas se fundamenta en los pasos siguientes: 1) Obtención de respuesta en estado de referencia, cuando el transformador se supone en estado sano; y 2) Obtención de respuesta en estado de evaluación, cuando el transformador se supone en estado de falla y comparación de las respuestas en ambos estados. Si existe diferencia, puede implicar la existencia de un cambio en la condición del transformador provocado por una falla.

En la aplicación on-line de la técnica FRA existen diversos factores que pueden modificar la respuesta medida, a pesar de que el transformador no presente fallo. Las causas de estos efectos se pueden clasificar en 3 tipos: 1) punto de operación del transformador, 2) influencia de la red, y 3) señal de entrada; los cuales pueden ocasionar que la prueba FRA on-line no tenga una buena repetitividad.

2.2. DESCRIPCIÓN DE FACTORES CON INFLUENCIA POSIBLE EN LA REPETITIVIDAD DE LA PRUEBA FRA ON-LINE

2.2.1. Punto de operación del transformador

El punto de operación del transformador hace referencia al valor de distintos parámetros o factores que dependen del funcionamiento en un instante concreto del transformador y pueden tener influencia sobre la medición FRA on-line. A continuación se mencionan algunos factores:

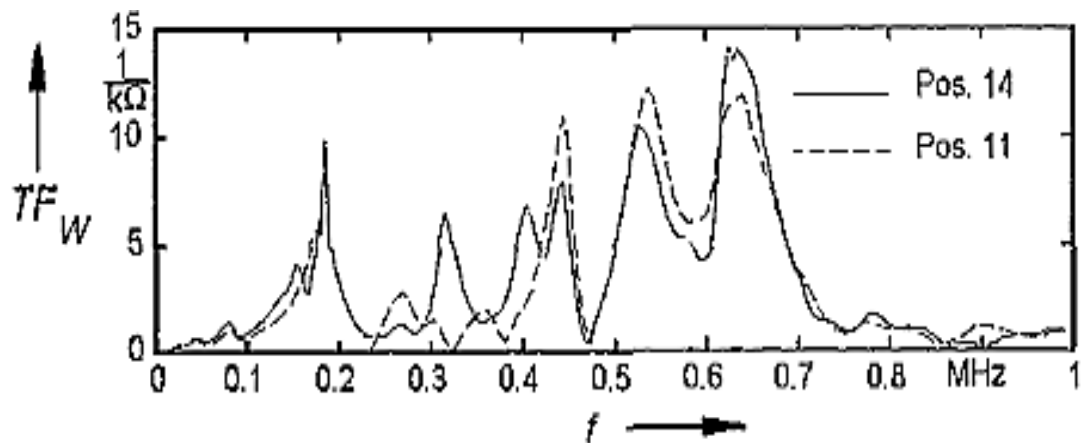
- **Posición del cambiador de tap.** La posición del cambiador de tap (sea de operación bajo carga o des-energizado) modifica la estructura del devanado aumentando o reduciendo el número de espiras y en consecuencia su respuesta en todo el rango de frecuencias medidas (Gráfica 1).

La posición del cambiador de tap es un parámetro totalmente medible a través de la inspección de la posición del cambiador de tap; su efecto puede controlarse y conocerse ya que la modificación introducida al cambiar las distintas posiciones es continuamente la misma, siempre y cuando trabaje en condiciones normales.

Como conclusión, las dos respuestas de referencia y evaluación deben obtenerse en la misma posición del cambiador de tap, para que puedan compararse con el objetivo de obtener un diagnóstico⁷⁰.

⁷⁰ LEIBFRIED y FESER. 1999. Op. Cit.

Gráfica 1. FT con dos posiciones diferentes en el cambiador de Tap⁷¹.



- **Temperatura.** De acuerdo con la investigación resumida⁷², una variación en la temperatura del transformador provocará cambios en la forma de la función de transferencia, afectando principalmente a las frecuencias de resonancia expresadas en la Ecuación 1.

Ecuación 1.
$$F_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Los cambios de temperatura afectan a los valores de la inductancia L y capacitancia C características del transformador. Estos cambios se pueden cuantificar mediante los coeficientes α_L y α_C para la inductancia y la capacidad, respectivamente. El coeficiente de temperatura de la frecuencia de resonancia fue calculado por Leibfried y Feser⁷³, en función de estos dos coeficientes, según la Ecuación 2:

Ecuación 2.
$$\alpha_{fres} = -\frac{1}{2}(\alpha_L + \alpha_C)$$

⁷¹ Ibid.

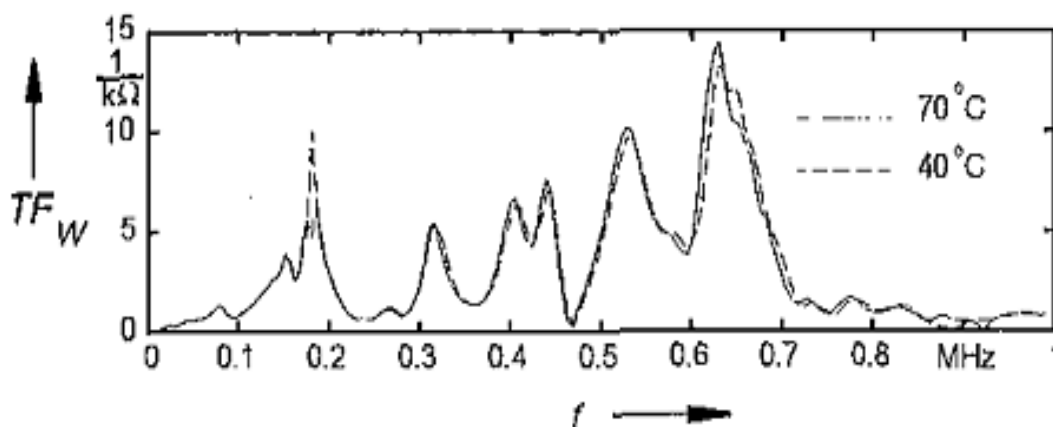
⁷² Ibid. Ampliar en IEC. IEC 60076-18 International Standard: Power transformers. Part 18: Measurement of Frequency Response International Electrotechnical Commission. Edición 1. Julio, 2012.

⁷³ Ibid.

Las capacidades que aparecen en el transformador dependen de las distancias geométricas entre los distintos elementos y el medio dieléctrico, que comúnmente es el aceite aislante. Por tanto, el coeficiente de temperatura para el parámetro capacitivo α_C depende principalmente de la constante dieléctrica del aceite del transformador el cual se estima según Leibfried y Feser⁷⁴ en el rango de $-4 \times 10^{-4} (1/\text{Hz})$ y con un valor negativo. El coeficiente de la expansión lineal que afecta a α_L , en cambio, es positivo pero mucho más pequeño que α_C ; por tanto, despreciable frente a este en la Ecuación 2.

Siguiendo a Leibfried y Feser⁷⁵, el valor resultante para α_C es de $3 \times 10^{-3} (1/\text{Hz})$, lo que de acuerdo a la Ecuación 1, da lugar a un valor para α_{fres} de $-1.5 \times 10^{-3} (1/\text{Hz})$. Esto se traduce en una reducción de las frecuencias de resonancia con el crecimiento de la temperatura, como se muestra en la Gráfica 2.

Gráfica 2. FT medida con diferentes temperaturas⁷⁶.



La temperatura es un parámetro fácilmente medible con los instrumentos del transformador, y su efecto puede controlarse por las ecuaciones anteriormente establecidas.

⁷⁴ Ibid.

⁷⁵ Ibid.

⁷⁶ Ibid.

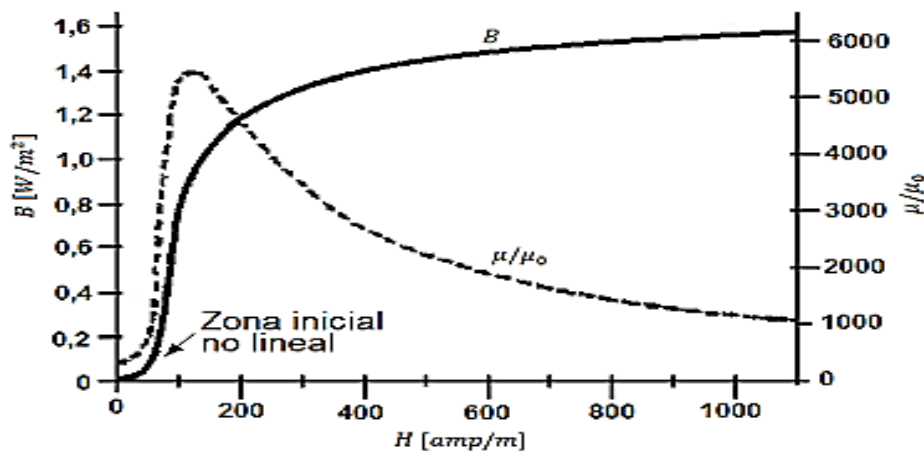
Durante el funcionamiento en carga del transformador, la variación de temperatura puede venir provocada principalmente por dos razones:

- Grado diferente de carga y por tanto distinta potencia transferida.
- Condiciones atmosféricas diferentes.

En consecuencia, estos factores deben considerarse para obtener el valor de temperatura y posteriormente ejercer el control y corrección pertinente en las curvas de FRA on-line obtenidas.

- **Punto de Magnetización.** La relación entre B y H en el núcleo del transformador, cuando está en carga, la determina el ciclo de histéresis del material ferromagnético, la cual es una curva no lineal⁷⁷. Por tanto, cuando se somete al material a un ciclo de operación en AC, el comportamiento de este se puede aproximar mediante la curva de la Gráfica 3.

Gráfica 3. Curva de magnetización y permeabilidad relativa del hierro comercial recocido⁷⁸.



⁷⁷ FIROOZIAND, H. y MAHMOODI, N. Frequency Response Analysis - Low Frequency Characteristics and Fault Diagnosis on Power Transformers. Alemania. 2010.

⁷⁸ CASTAÑO, C. Definición y análisis de los factores que influyen en la respuesta en frecuencia de los transformadores eléctricos. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Eléctrica. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. 2010.

Cada punto del ciclo recorrido da lugar a un valor de la permeabilidad relativa μ_r ; por tal razón, la inductancia del núcleo magnético, la cual se define por la Ecuación 3, puede sufrir variaciones también.

Ecuación 3.
$$L_{core} = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}$$

En este sentido, la respuesta FRA medida en bajas frecuencias que depende principalmente de L_{core} puede sufrir variaciones significativas, en concordancia con el punto del ciclo de histéresis en el que se encuentre el material en el momento en que se tome la medida⁷⁹.

El punto del ciclo de histéresis donde se encuentra el material, puede cambiar: 1) por el funcionamiento en carga y por tanto en AC del transformador; y 2) si existe una magnetización remanente. Por esto a la hora de obtener la medida FRA on-line es necesario considerar estas dos situaciones, ya que pueden modificar sustancialmente la curva obtenida.

En el primer caso, el campo de intensidad magnética H determina uno u otro punto del ciclo de histéresis en su variación AC; además, el material puede quedar magnetizado por efecto de una corriente DC. El efecto de la magnetización en el transformador afecta únicamente a bajas frecuencias, pero puede ser controlable en el modo que este efecto se determine. La determinación de la remanencia en un transformador puede ser difícil de establecer, por lo cual en ocasiones para el caso FRA on-line se desprecia la baja frecuencia, mientras que en medias y altas frecuencias se puede aprovechar para el diagnóstico, porque en estos niveles de frecuencias tal efecto no tiene influencia.

⁷⁹ FIROOZIAND. Op. Cit.

- **Nivel de aceite.** La incidencia de este factor se puede ver a lo largo de toda la curva FRA on-line y/o off-line, desplazando hacia la derecha en todo el rango de frecuencias, esto sucede debido a que todas las capacitancias se ven afectadas por un factor que depende de la cantidad y calidad del aceite⁸⁰. Es importante tener claro y dejar registrado bajo qué condiciones de aceite se realizaron las pruebas, para no incurrir en un mal diagnóstico del transformador ni en la repetitividad de los resultados. El aceite es un parámetro fácilmente medible con los instrumentos del transformador y su efecto puede controlarse realizando las pruebas con la misma cantidad y tipo de aceite dieléctrico⁸¹.

Así, mientras el transformador está funcionando, no es común que el nivel de aceite cambie, por que es un parámetro que tendrá poca influencia, empero debe considerarse para ejercer el control y la corrección pertinentes en las curvas de FRA on-line obtenidas.

2.2.2. Influencia de la red

Para efectos de este trabajo de grado, el término Influencia de la Red se utiliza para hacer referencia a los parámetros o factores que pueden influir en la repetitividad de la prueba FRA on-line y que son externos al transformador dependientes exclusivamente de la red a la que está conectado.

En general, los factores a analizarse pueden ser medibles pero difícilmente controlables, ya que están impuestos por el funcionamiento del sistema de potencia.

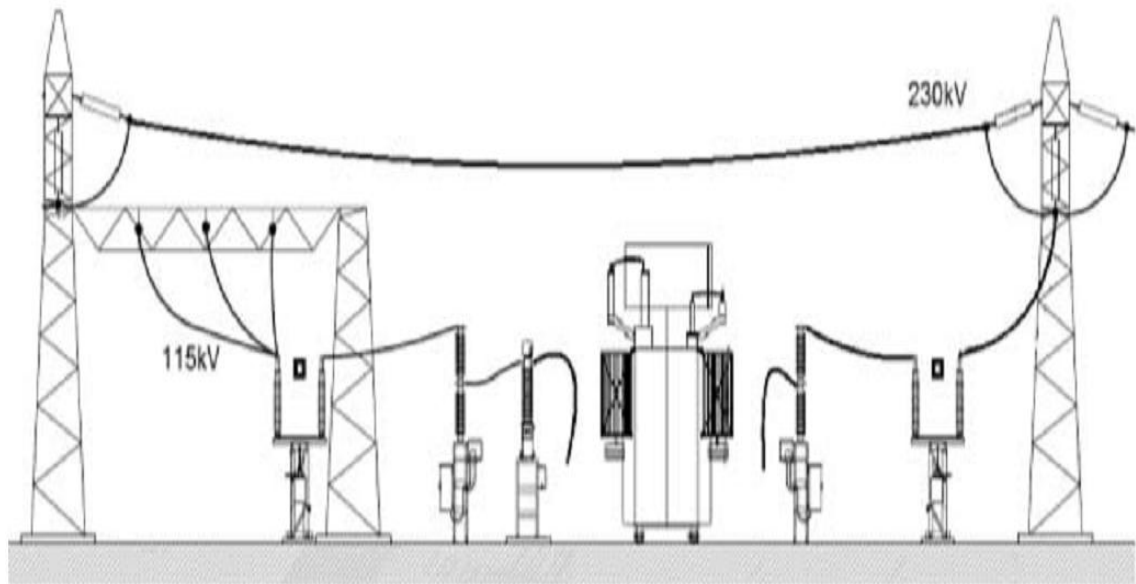
⁸⁰ IEC. Op. Cit.

⁸¹ Véase en CASTAÑO. 2010. Op. Cit.; y en IEC. Op. Cit.

- **Ruido electromagnético.** Por ruido se entiende cualquier fluctuación de magnitud eléctrica (corriente, tensión, etc.) que tiende a distorsionar la señal de interés (inyectada o medida) y cuyo origen puede ser eléctrico y/o magnético.
- **Ruido eléctrico:** Se produce principalmente por las líneas equipotenciales de campo eléctrico, inducidas por las líneas de transmisión de alta tensión.

Como ejemplo del ruido eléctrico, en la Figura 8 se ilustra la vista de una bahía de una subestación con una línea de 230kV cercana. Esta puede inducir tensión en los tramos que se encuentran sin aterrizar (seccionador, interruptor, transformador de potencial) e incluso en los devanados del transformador por medio de los bujes⁸².

Figura 8. Vista de planta de una subestación⁸³.



⁸² Ibid.

⁸³ Ibid.

De igual forma, los campos eléctricos pueden influir en la instrumentación de medida utilizada para la obtención de la curva FRA on-line, reproduciendo variaciones con respecto a la medida sin la presencia de dichos campos.

- **Ruido magnético:** Puede producirse por elementos eléctricos atravesados por un flujo magnético de alta intensidad como transformadores o generadores de gran potencia. El campo magnético se distribuye principalmente en el núcleo magnético de la máquina (flujo principal), aunque también existen flujos de dispersión que se cierran por caminos alternativos (entre hierros, cuba y demás elementos conductores cercanos). La presencia de un campo magnético durante la medida FRA on-line puede inducir corrientes parásitas que influyan en los resultados, modificándolos con respecto a las medidas obtenidas sin la presencia magnética.

Independientemente de la fuente, la presencia de ruido electromagnético modifica la relación señal-ruido, que mide la potencia de la señal de entrada con respecto a la potencia de la señal de distorsión. En la situación más deseable, la relación señal-ruido debe asegurar una buena repetitividad, cualesquiera que sean de las condiciones exteriores⁸⁴.

- **Carga conectada.** La carga modifica la potencia que fluye por el transformador al igual que los niveles de corriente, por tanto, el ciclo de histéresis se ve influenciado en el rango de baja frecuencia; en consecuencia la impedancia medida puede alterarse en este rango de frecuencias y lo mismo que la repetitividad, alterada por las características dinámicas del sistema de potencia.

⁸⁴ TENBOHLEN y RYDER. Op. Cit.

2.2.3. Señal de entrada

Por señal de entrada, en este trabajo de grado, se entienden los distintos parámetros dependientes de la señal a utilizarse para excitar en frecuencia al transformador, que pueden tener influencia en la curva final obtenida.

- **Nivel de tensión:** El nivel de tensión es uno de los factores que aparentemente no tendría por qué influir en la respuesta obtenida, siempre y cuando el sistema excitado tuviera un comportamiento lineal, ya que se tiene simplemente la relación de la tensión de salida y entrada. Sin embargo, debido a que la impedancia equivalente del transformador (en especial el núcleo) no tiene un comportamiento lineal a diferentes tensiones, la amplitud de la señal de excitación presenta una influencia en la curva obtenida de FRA on-line⁸⁵.

Si las tensiones de prueba inyectadas son del orden de milis a decenas de voltios⁸⁶, la excitación del núcleo magnético se produce en la zona de no linealidad inicial de la curva de magnetización (Gráfica 3), haciendo que la relación entre la entrada y la salida no sea lineal para las diferentes tensiones de prueba.

Como consecuencia se tiene que para distintas tensiones de prueba (del orden de los 20 Vpp) se tendrá un campo y una inducción diferentes para cada caso, lo que resulta en una relación de entrada y salida no lineal, dando una respuesta en el rango de frecuencia diferente para cada tensión de prueba⁸⁷. Este fenómeno no se encuentra muy documentado, puesto que los transformadores de potencia no están diseñados o estudiados para trabajar a estos niveles de tensión.

⁸⁵ CASTAÑO. 2010. Op. Cit.

⁸⁶ PLEITE, Jorge y GONZÁLEZ, Carlos. Seminario. FRA "Diagnóstico de Transformadores Basado en el Análisis de la Respuesta en Frecuencia". Universidad Carlos III De Madrid. 2008.

⁸⁷ Ibíd.

- **Contenido frecuencial.** Después de la amplitud de la señal de entrada, el contenido frecuencial de la misma es el segundo parámetro que puede modificar sustancialmente la respuesta en frecuencia obtenida. Una señal con un contenido frecuencial insuficiente provoca una medida defectuosa en el rango de frecuencias, deteriorando la señal de entrada. Este problema aparece principalmente en la medida IFRA on-line donde la señal introducida es un impulso con una duración determinada. En todo momento es necesario asegurar que el contenido frecuencial de dicha señal sea suficiente para obtener una medida de calidad en todo el rango en frecuencia.

Tanto la amplitud como el contenido de la señal de excitación pueden controlarse, si esta señal es introducida externamente desde una instrumentación de medida. No obstante, si la señal inyectada proviene de transitorios de la red (FRA on-line), tanto la amplitud como su duración son desconocidas y sin posibilidad determinarse ni controlarse.

2.2.4. Procesamiento de señal

Con el concepto de procesamiento de señal, este trabajo de grado hace referencia al filtrado para la eliminación del ruido y a la obtención del contenido frecuencial por medio de tratamientos matemáticos. Estos parámetros pueden influenciar en la curva final obtenida y por ende en la repetitividad de la prueba FRA on-line.

En referencia al filtrado y a la obtención del contenido frecuencial, las medidas transitorias de tensión para la obtención de la curva FRA on-line suelen ser dañadas por la distorsión armónica y el ruido de fondo. Por lo general estos tipos de ruido se eliminan mediante filtros de supresión y programas con base en la transformada Wavelet. Este tipo de filtro y el programa matemático utilizado,

deben de ser siempre el mismo para obtener un contenido frecuencial con las mismas propiedades y así una buena repetitividad para con la prueba FRA on-line.

A continuación se muestra la tabla 2 con los factores que influyen la repetitividad de la prueba FRA.

Tabla 1. Factores que influyen la repetitividad de la prueba FRA.

FACTORES QUE INFLUYEN LA REPETITIVIDAD DE LA PRUEBA FRA	FACTORES	
	PUNTO DE OPERACIÓN	• CAMBIADOR DE TAP'S • TEMPERATURA • PUNTO DE MAGNETIZACIÓN • NIVEL DE ACEITE
	INFLUENCIA DE LA RED	• RUIDO ELECTROMAGNETICO • RUIDO ELECTRICO • RUIDO MAGNETICO • CARGA CONECTADA
	SEÑAL DE ENTRADA	• NIVEL DE TENSIÓN • CONTENIDO FRECUENCIAL
	PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL	• FILTRADO • PROCESAMIENTO MATEMATICO

RESUMEN DEL CAPÍTULO II

En este capítulo se explicaron los factores con influencia posible en la repetitividad de la prueba FRA on-line: punto de operación del transformador, influencia de la red y señal de entrada. Asimismo, se explicó si el factor con influencia en la repetitividad de la prueba FRA on-line era medible o su efecto era controlado o conocido.

En el siguiente capítulo se ajustarán los parámetros óptimos para realizar la prueba FRA on-line con éxito y se realizará un análisis experimental de algunos factores que afectan la repetitividad de la prueba FRA on-line, como el punto de operación (punto de magnetización) y la influencia de la red (alimentación externa y carga conectada).

3. ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA REPETITIVIDAD DE LA PRUEBA IFRA ON-LINE

3.1. INTRODUCCIÓN

La filosofía de la prueba de respuesta en frecuencia, más conocida como FRA, en transformadores, consiste en obtener una misma curva (huella digital), para luego determinar con el tiempo si el transformador ha presentado una falla o no. Hasta el momento, la prueba FRA con el transformador en servicio ha presentado grandes avances a nivel mundial con el método IFRA (Respuesta en Frecuencia Mediante un Impulso); empero, es necesario determinar el grado de repetitividad de las curvas obtenidas on-line, debido a que es la esencia para realizar un diagnóstico adecuado; además, el problema de la repetitividad ha sido referenciado por investigadores, quienes mencionan que se debe trabajar un poco en relación con obtener siempre la misma curva on-line.

En el capítulo presente se determinan y analizan de manera experimental los parámetros del método IFRA on-line que afectan la repetitividad de las curvas. Estos factores fueron analizados debido a que se podían modificar con un prototipo experimental de IFRA on-line desarrollado en trabajos de pregrado⁸⁸ anteriores en el Grupo de Investigación en Alta Tensión (GRALTA) de la Universidad del Valle.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ANÁLISIS

Los parámetros de estudio que hacen que la prueba IFRA on-line logre una repetitividad adecuada, corresponden a: ancho y amplitud del pulso, herramienta

⁸⁸ GÓMEZ, Eduardo y OBANDO, Diego. Desarrollo de una prueba piloto para obtener la respuesta en frecuencia de un transformador en servicio. Technical Report. Universidad del Valle. Grupo de Investigación GRALTA. Agosto, 2012.

matemática, ganancia de los sensores de medida (voltaje-corriente). Inicialmente, se realizaron pruebas experimentales con el método IFRA off-line, ya que éste tiene menos parámetros a analizar, que afectan también la prueba IFRA on-line. Los parámetros se variaron en los transformadores a probar, para diferentes configuraciones, tales como:

- **Configuración Alta abierto-Baja abierta:** La medida de la respuesta en frecuencia se realiza entre terminales de un devanado; los demás que no están bajo prueba, se encuentran en circuito abierto, dependiendo de si la medición se hace por el lado de baja tensión o de alta tensión.
- **Configuración Alta en Corto-Baja Abierto:** La medida de la respuesta en frecuencia se realiza entre terminales de un devanado mientras todos los demás que no están bajo prueba se encuentran corto-circuitados, dependiendo de si la medición es por el lado de baja tensión o de alta tensión.
- **Configuración Alta abierto-Baja en corto:** La medida de la respuesta en frecuencia se realiza en terminales de un devanado, mientras todos los demás que no están bajo prueba se encuentran corto-circuitados, dependiendo de si la medición se hace por el lado de baja tensión o de alta tensión.

3.2.1. Descripción de los transformadores de prueba

A continuación se realiza una breve descripción de las características de los transformadores piloto, utilizados para el análisis de los parámetros que hacen que la prueba FRA on-line logre una adecuada repetitividad.

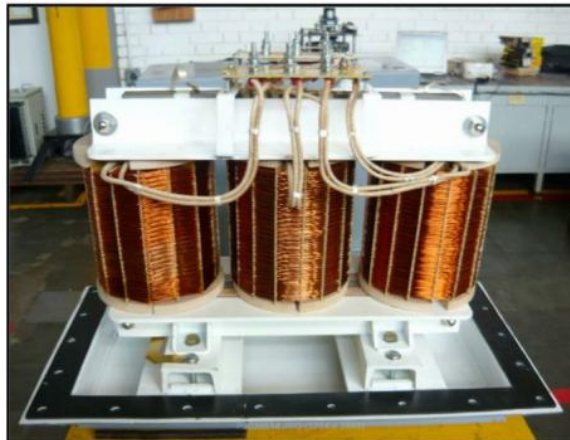
- **Transformador Suntec (Transformador 1).** Este es un transformador de 75 KVA trifásico tipo seco (Ver Figura 9), con una tensión de entrada de 13.200 Volts, una tensión de salida de 460/266 Volts con grupo conexión delta-estrella, el cual tiene la posibilidad de realizar conexiones en delta-delta o estrella-estrella.

Figura 9. Transformador piloto Suntec⁸⁹.



- **Transformador Explorer (Transformador 2).** Este es un transformador trifásico tipo seco de 5 KvA, con una tensión de entrada de 1150 Volts y una tensión de salida de 345 Volts (Ver Figura 10), con grupo de conexión estrella-estrella, pero con posibilidad de realizar conexiones en delta-estrella o delta-delta.

Figura 10. Transformador piloto Explorer⁹⁰.



⁸⁹ Elaboración propia.

⁹⁰ Elaboración propia.

- **Transformador ABB (Transformador 3).** Este es un transformador de 15 KVA monofásico en aceite (Figura 11), con una tensión de entrada de 13200 Volts y una tensión de salida de 240 Volts, en el cual se desarrollaron gran parte de las pruebas.

Figura 11. Transformador piloto ABB⁹¹.



- **Transformador Rymel (Transformador 4).** Este es un transformador de 3 KVA monofásico en aceite (Figura 12), con una tensión de entrada de 7620 Volts y una tensión de salida de 240 Volts, en el cual se desarrollaron gran parte de las pruebas.

Figura 12. Transformador piloto Rymel⁹².



⁹¹ Elaboración propia.

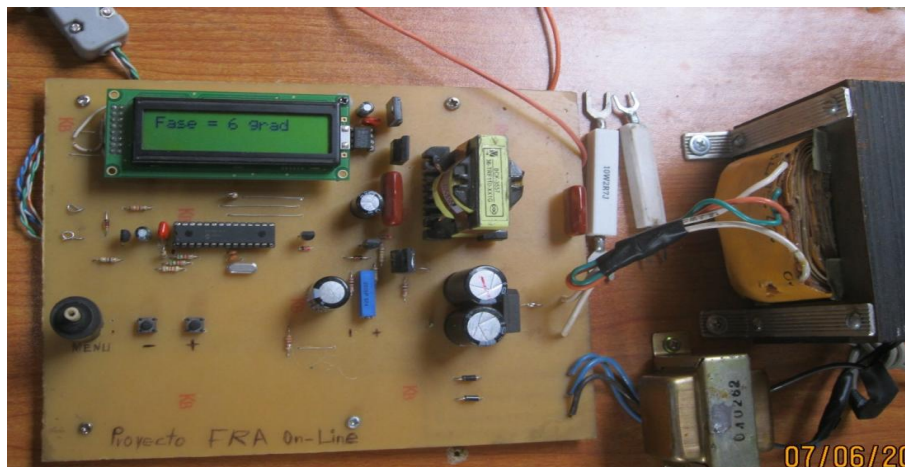
⁹² Elaboración propia.

3.2.2. Equipo de medición e inyección mediante un impulso para el caso IFRA on-line

En el capítulo anterior se definió el esquema para la obtención de la respuesta en frecuencia del transformador de potencia, el cual sigue 3 etapas importantes. Para el desarrollo de la primera etapa (inyección, medición y registro, según el esquema de la Figura 1) se utilizó el prototipo experimental de IFRA on-line en tesis de pregrado y posgrado desarrolladas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad del Valle⁹³. Este prototipo se describe a continuación:

- **Inyección:** Se realiza por medio de un circuito electrónico (ver Figura 13) dedicado específicamente a inyectar pulsos controlados sobre la onda de 60Hz. Este permite cambiar la amplitud, el ancho y la fase del pulso generado sobre la onda de 60Hz, teniendo un control total del pulso con alto contenido espectral.

Figura 13. Sistema de inyección de pulsos controlados⁹⁴.



- **Medición:** Se utilizaron puntas de alta tensión (Figura 14) y bobinas Rogowski (Figura 15) para la medición de corriente para la medición de voltaje. Las

⁹³ Publicadas mediante el artículo escrito por GÓMEZ y OBANDO. Op. Cit.

⁹⁴ Ibíd.

características de estos elementos hacen que impacten lo menos posible en el comportamiento del sistema, garantizando la medición requerida para la aplicación FRA on-line.

Figura 14. Punta de tensión⁹⁵.

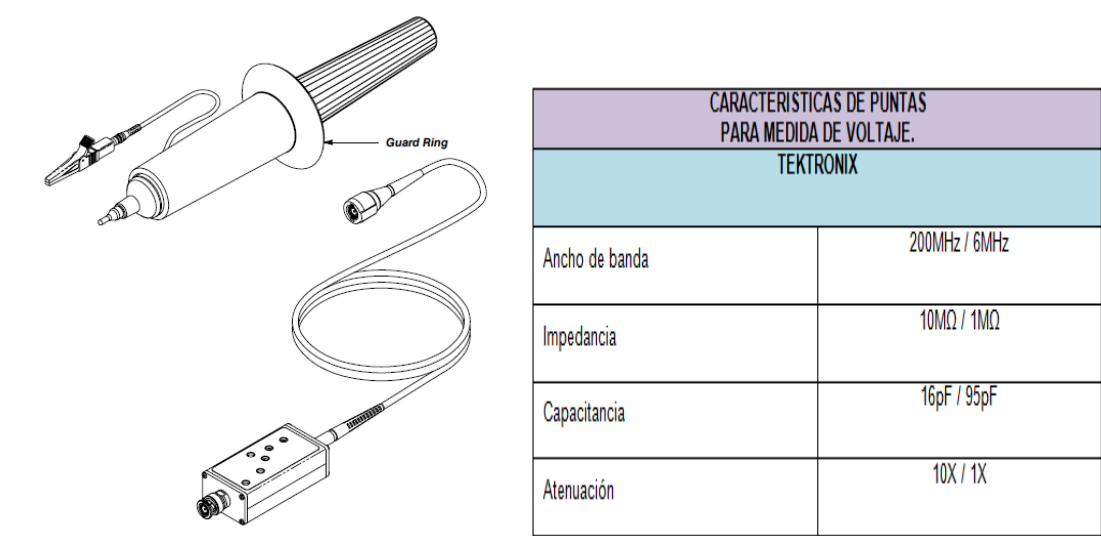
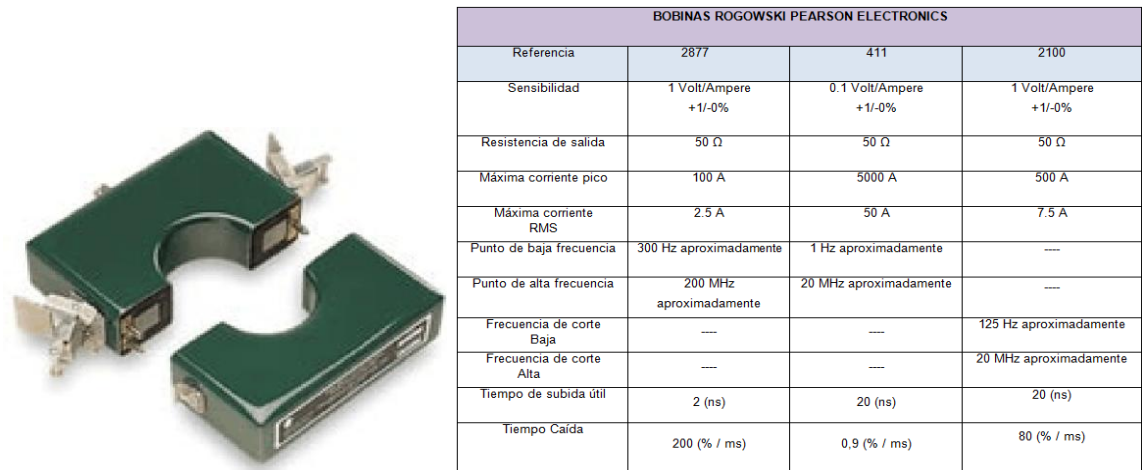


Figura 15. Bobina Rogowski⁹⁶.



⁹⁵ Ibid.
⁹⁶ Ibid.

- **Registro:** Para el registro y almacenamiento de la información se usaron equipos como: 1) El Bloque Conector NI BNC 2110 de *National Instruments*, el cual sirve como canal de entrada para el registro de señales e inyección de señales (salidas) a través de algunas de las conexiones; 2) La Tarjeta de Adquisición de Datos NI PCI 6115, la cual registra simultáneamente las señales medidas, digitalizando la información que llega desde el equipo BNC 2110.

Figura 16. Bloque conector NI BNC 2110⁹⁷.



Figura 17. Tarjeta de adquisición de datos NI PCI 6115⁹⁸.



TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI PCI-6115	
National Instruments	
Referencia	PCI-6115
Resolución	12 bits
Entradas analógicas	4 de alta velocidad, 10 MS/s por canal
Salidas analógicas	2 de 12 bits, 4 MS/s en un solo canal, doble canal de 2.5 MS/s
Rango de Voltaje de entrada Máximo	-42 V , +42 V
Entradas y Salidas Digitales	8 líneas de E/S digitales; dos contadores de 24 bits; disparo analógico y digital
Filtros internos anti-aliasing	Seleccionable por software
Memoria	Interna de mayor capacidad (32 ó 64 MS) y
Adicionales	Contiene el software de NI-DAQmx y software interactivo LabVIEW SignalExpress para registro de datos

⁹⁷ Ibid.

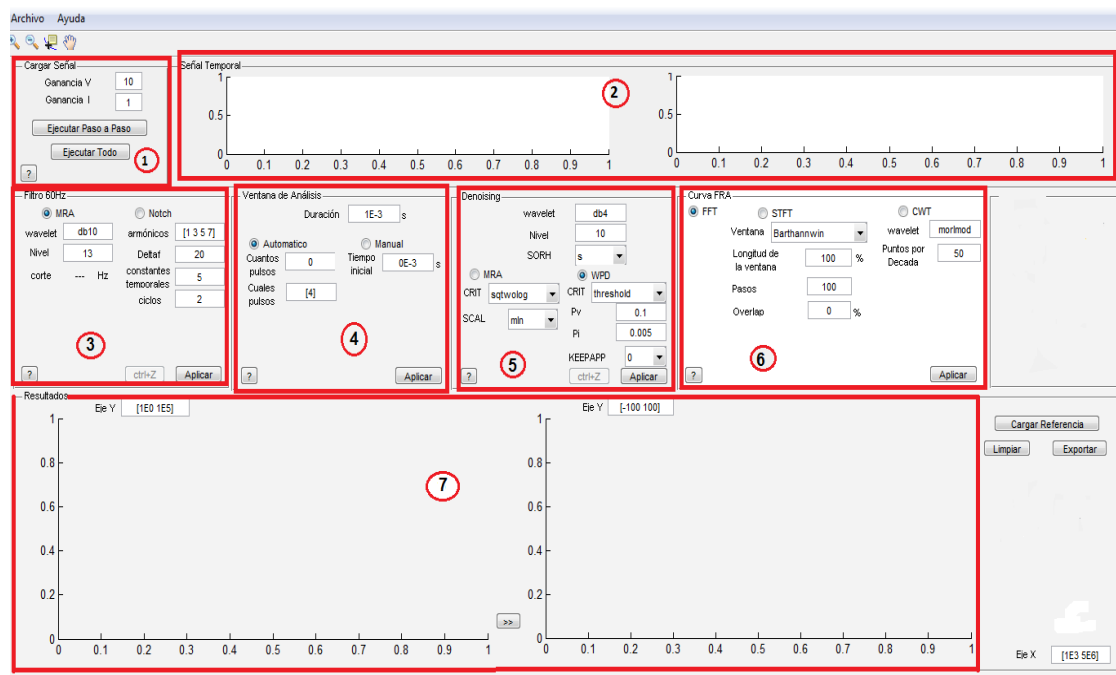
⁹⁸ Ibid.

3.2.3. Software de análisis de señales transitorias para obtener la respuesta en Frecuencia

Para el análisis de las pruebas se utilizó el software de interfaz gráfica desarrollado en Matlab en el proyecto de investigación titulado “Desarrollo de una prueba piloto para obtener la respuesta en frecuencia de un transformador en servicio”⁹⁹ realizado con el grupo de Investigación GRALTA de la Universidad del Valle. Este programa permite la interpretación gráfica y matemática de las pruebas realizadas en el prototipo experimental de IFRA. A continuación se hace una breve descripción del uso del software:

- **Interfaz gráfica en Matlab IFRA on-line.** La interfaz es útil para cargar señales transitorias y analizar la respuesta en frecuencia, está compuesta por 7 partes, observables en la Figura 18.

Figura 18. Interfaz gráfica en Matlab IFRA on-line¹⁰⁰.



⁹⁹ Ibíd.

¹⁰⁰ Elaboración propia.

A continuación se presentan brevemente sus funciones:

- **Parte 1.** Cargar señales temporales: Se cargan los archivos .MAT de Matlab de voltaje y corriente, donde se pueden ajustar las ganancias de las señales repetitivas.
- **Parte 2.** Visualizar las señales temporales.
- **Parte 3.** Filtrar la señal de 60 Hz: Elimina la señal de potencia (60 Hz), utilizando la transformada wavelet.
- **Parte 4.** Ventana de análisis: Permite seleccionar los pulsos de voltaje y corriente IFRA en ventanas de 1 ms, los cuales son necesarios para obtener FRA.
- **Parte 5.** Denosing: Esta parte permite eliminar el ruido de fondo del sistema eléctrico cuando se analizaban señales on-line. En esta parte se utiliza de igual manera la transformada Wavelet como herramienta matemática.
- **Parte 6.** Tratamiento matemático de FRA: Se realiza por medio de las transformadas FFT, STFT y Wavelet.
- **Parte 7.** Visualización de las curvas de la respuesta en frecuencia.

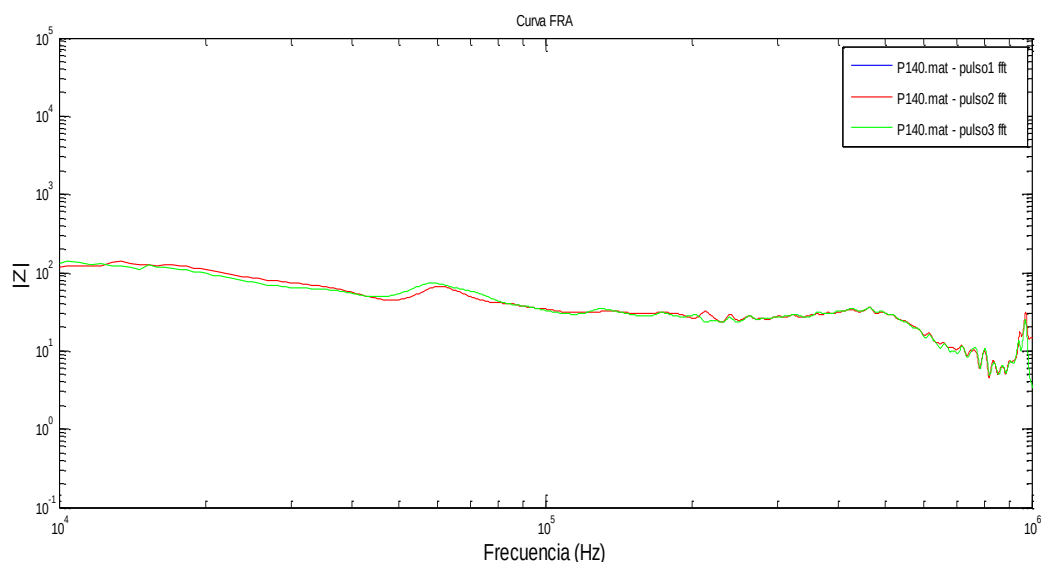
3.2.4. Pruebas FRA off-line para ajuste experimental de parámetros

Para validar los resultados obtenidos del sistema experimental IFRA on-line desarrollado, fue necesario hacer una comparación con la prueba SFRA off-line usando el equipo Megger 101.

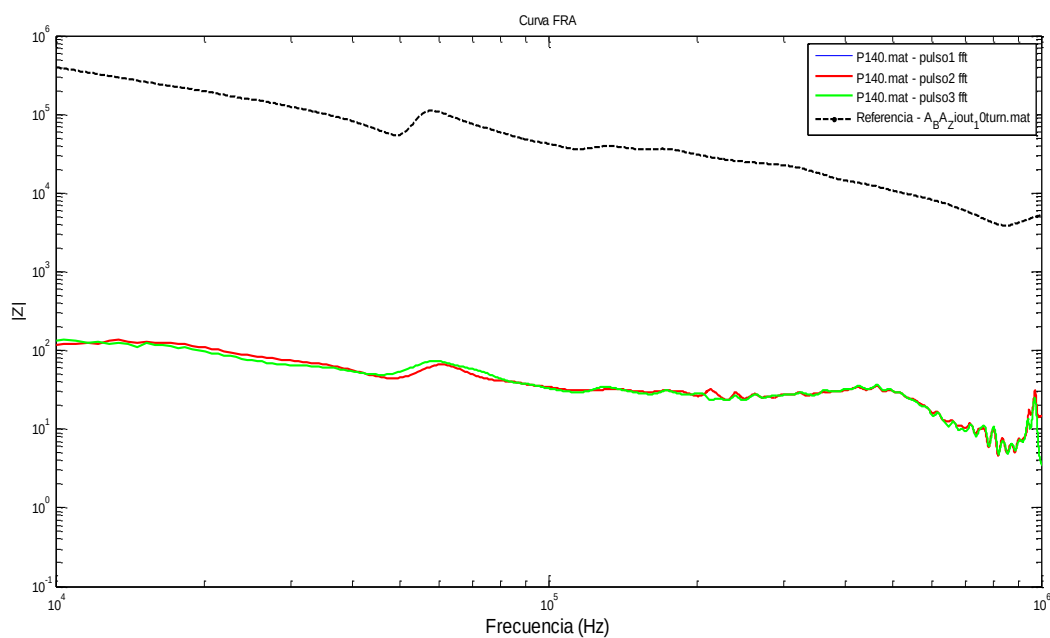
A continuación se ilustran los resultados de las curvas obtenidas en las pruebas realizadas de IFRA off-line en el transformador monofásico Rymel, al variar las características del prototipo experimental de medida para obtener los parámetros que hagan que la prueba FRA on-line logre una adecuada repetitividad.

Para el registro de la pruebas fue necesario realizar una hoja de cálculo, en la cual se denota cada prueba como P# y su respectiva descripción (ver Anexo).

Gráfica 4. Prueba 140 configuración A_BA, realizada con el prototipo experimental IFRA (off-line) ¹⁰¹.



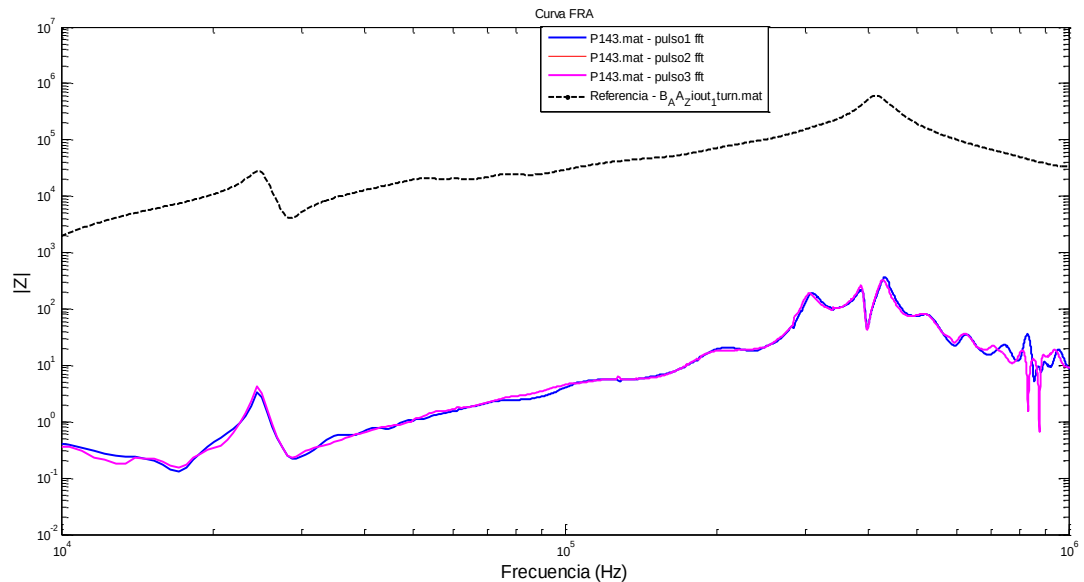
Gráfica 5. Comparación de la prueba 140 configuración A_BA, realizada con el prototipo experimental IFRA (Off-line) y la prueba realizada con el equipo Megger ¹⁰².



¹⁰¹ Elaboración propia.

¹⁰² Elaboración propia.

Gráfica 6. Comparación de la prueba 143 (configuración baja con alta abierto) y la prueba realizada con el equipo Megger 101¹⁰³.

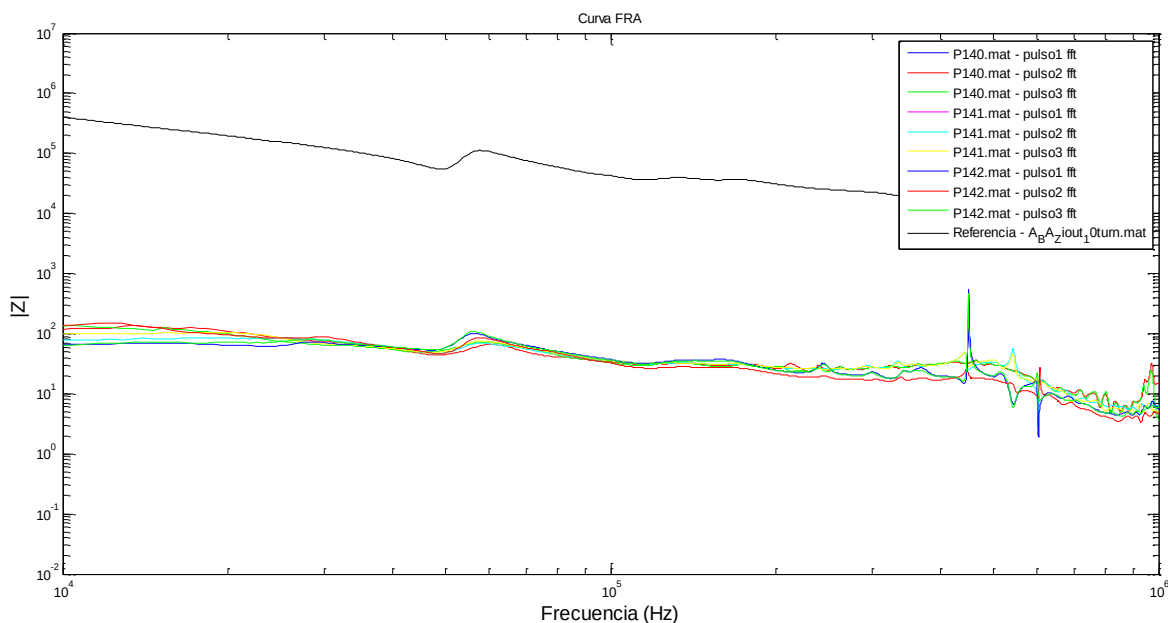


Tal como se muestra en las figuras 4,5 y 6, los métodos de medición IFRA off-line con el prototipo experimental (curvas en colores) y SFRA con el equipo Megger (curva negra), arrojaron resultados similares; sin embargo, existe un factor de amplitud que se debe a la configuración de medida impuesta por el prototipo experimental IFRA, el cual utiliza bobinas Rogowski y el circuito de inyección.

- **Amplitud del pulso.** Para analizar la influencia de este parámetro en la repetitividad de la curva IFRA, se realizaron pruebas en el transformador Rymel con el prototipo experimental desarrollado. En el análisis de las pruebas se utilizó el software de interfaz gráfico de Matlab, el cual permitió visualizar las curvas. A continuación se muestran los resultados para las pruebas 140 con 600 Volts, 141 con 1400 Volts y 142 con 1500 Volts (curva negra prueba equipo Megger como referencia); la configuración de los devanados es Alta abierto-Baja abierto y método matemático transformada de Fourier.

¹⁰³ Elaboración propia.

Gráfica 7. Pruebas IFRA Off-line P140, P141 y P142¹⁰⁴ configuración A_BA .

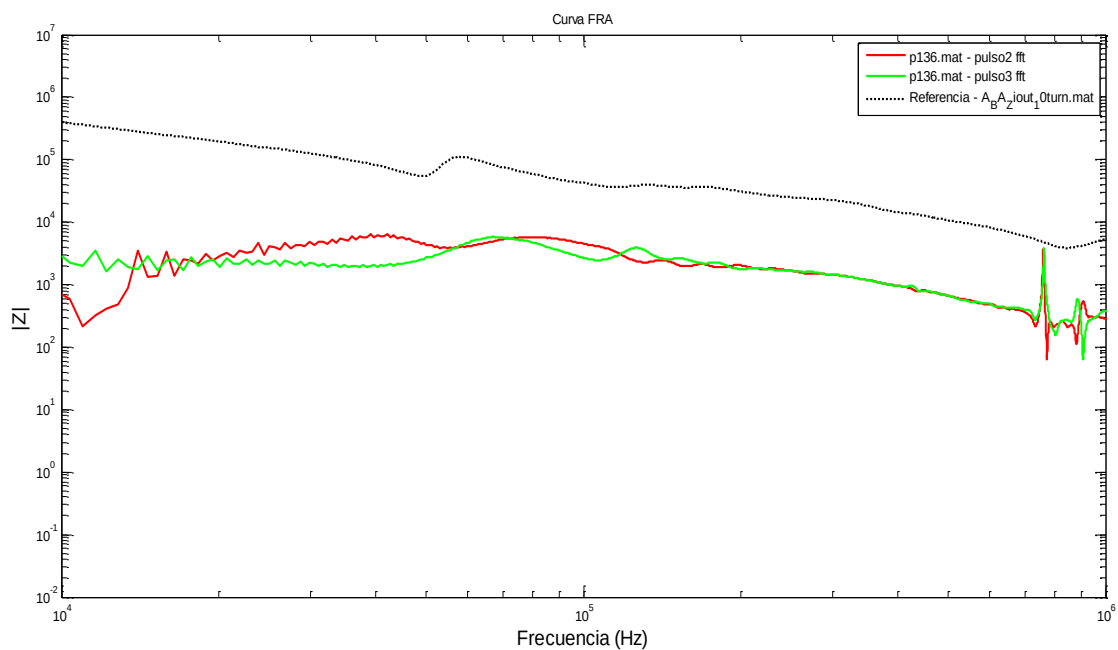


Al analizar las respuestas en frecuencia obtenidas cuando se varía la tensión del pulso, se observa que la respuesta no depende de la tensión aplicada para un rango de 10 KHz a 1MHz; sin embargo, al inyectar el pulso se debe garantizar que la relación señal-ruido sea alta. Como se observa en la Gráfica 7, para frecuencias altas la repetitividad se altera, por lo cual se decidió trabajar con un pulso de amplitud a partir de 160 volt.

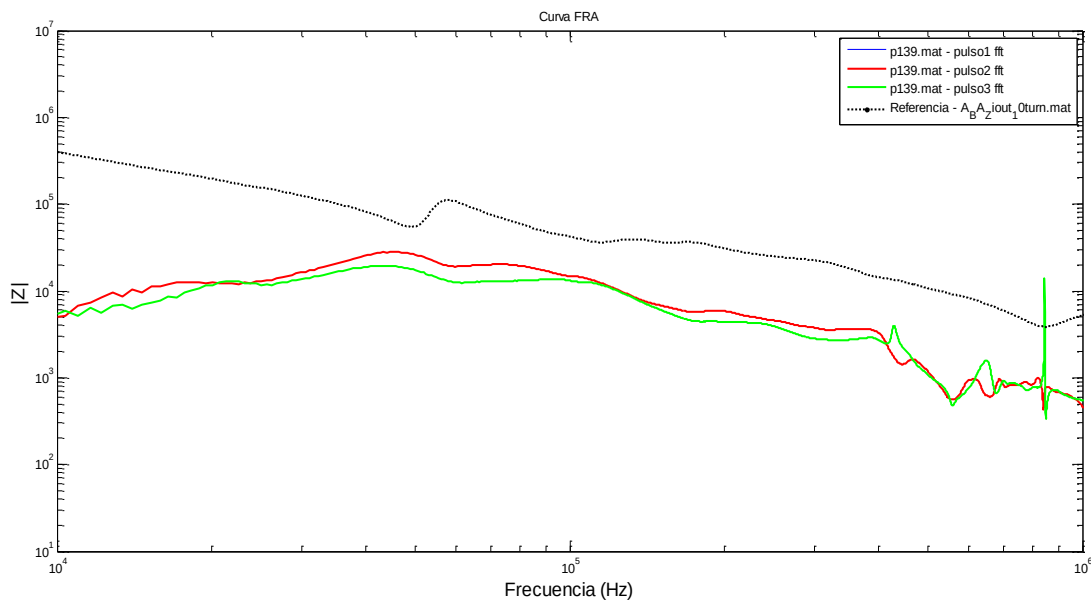
- **Ancho de pulso.** Para analizar la influencia de este factor, se hace una variación del pulso en 1 μ s, 5 μ s y 20 μ s . Para el análisis de las pruebas se utilizó el software de interfaz gráfico en Matlab FRA on-line, el cual permitió visualizar las curvas, estas pruebas fueron realizadas en el transformador Rymel.

¹⁰⁴ Elaboración propia.

Gráfica 8. Prueba P136 configuración A_BA con IFRA Off-line y ancho de pulso de $1\mu s^{105}$.



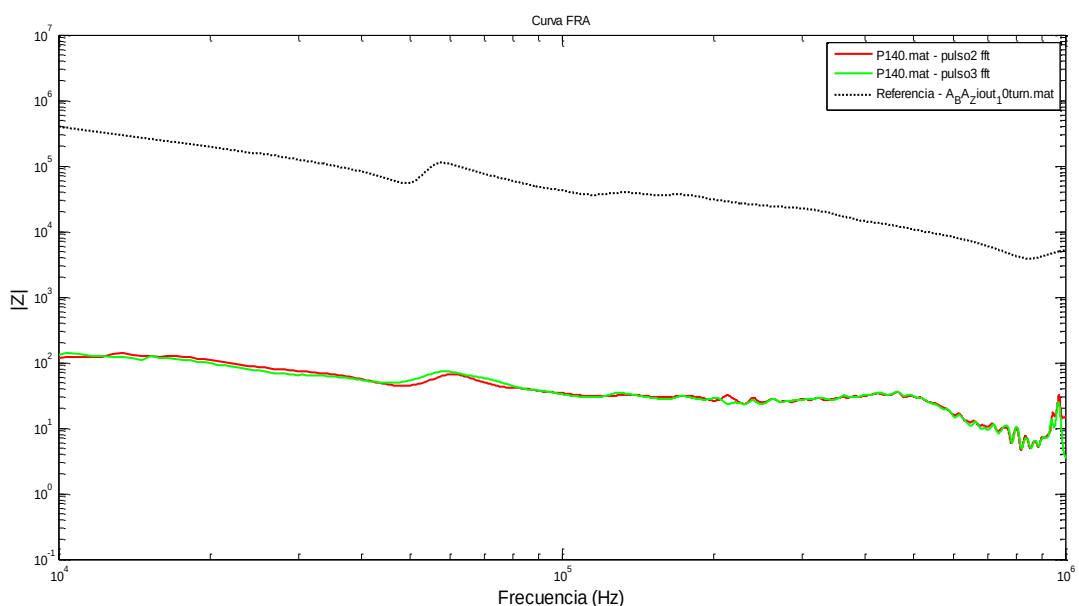
Gráfica 9. Prueba P139 Configuración A_BA con IFRA Off-line y ancho de pulso de $5\mu s^{106}$.



¹⁰⁵ Elaboración propia.

¹⁰⁶ Elaboración propia.

Gráfica 10. Prueba P140 Configuración A_BA IFRA Offline y ancho de pulso de $20\mu s^{107}$.

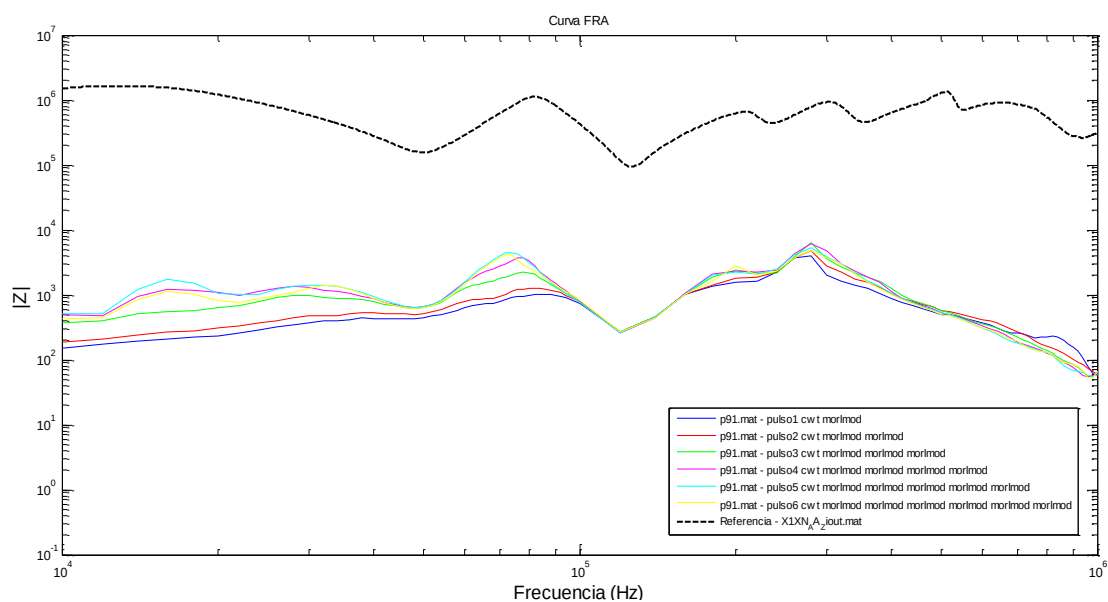


Se observa en la anterior gráfica (Gráfica 10), que utilizando el ancho de pulso de $20\mu s$ la repetitividad mejora, por lo cual el ancho del pulso para el método propuesto mejora los resultados obtenidos. El pulso ideal para obtener el espectro en frecuencia es aquel que use el menor tiempo posible tanto de subida como de bajada; no obstante, para el estudio experimental esto se cumple solo para el pulso de 20 microsegundos.

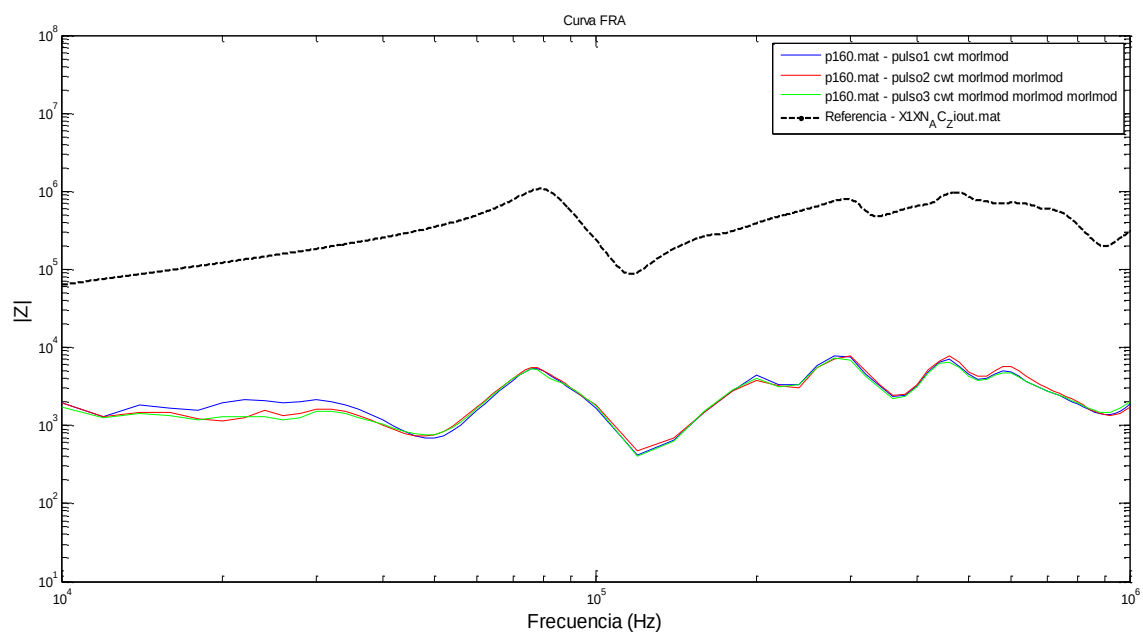
- **Punta de tensión (Ganancia de los sensores).** Para analizar la influencia de la punta de tensión, se realizaron pruebas en el transformador Explorer con el prototipo desarrollado, utilizando la punta de tensión P6015A, 1000X High Voltage Probe marca Tektronix y la punta de tensión 1x, referencia P2220, marca Tektronix. Se utilizó el software de interfaz gráfico en Matlab, el cual permitió visualizar las curvas.

¹⁰⁷ Elaboración propia.

Gráfica 11. Prueba P91 configuración X3Xn_AC con IFRA Off-line y punta de tensión 1x P2220 Tektronix¹⁰⁸.



Gráfica 12. Prueba 160 configuración X1Xn_AA con IFRA Off-line y punta de tensión P6015A1000X Tektronix¹⁰⁹.



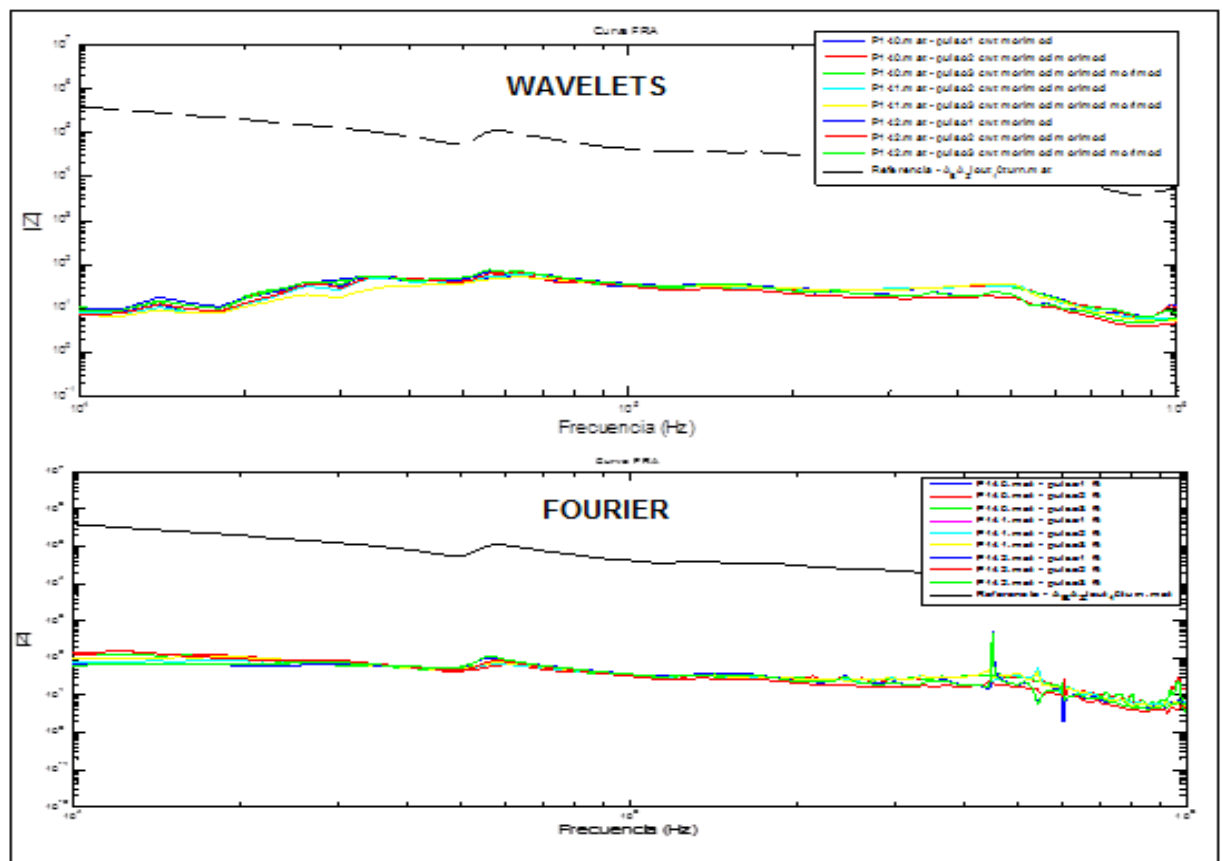
¹⁰⁸ Elaboración propia.

¹⁰⁹ Elaboración propia.

Como se observa en las gráficas anteriores (Gráficas 11 y 12), la influencia en la punta de tensión en la medición de la respuesta en frecuencia se debe a que la punta de relación 1000:1 (P6015A1000X Tektronix) tiene más sensibilidad para medir el pulso de 20 microsegundos sin perder los detalles de alta frecuencia, tal como se indica en la Gráfica 12.

- **Procesado matemático.** Para analizar la influencia del tratamiento matemático en la repetitividad de la curva IFRA se compararon las pruebas P140, P141 y P142 con el método matemático de la transformada rápida de Fourier y la transformada Wavelets (grafica 13), los resultados se muestran a continuación:

Gráfica 13. Pruebas IFRA Off-line P140, P141 y P142 con el método matemático transformada Wavelets y Fourier ¹¹⁰.



¹¹⁰ Elaboración propia.

Como el resultado de dicha comparación muestra que el procesamiento matemático de la transformada wavelet en relación de los métodos clásicos (transformada de Fourier) mejora la repetitividad para frecuencias medias y altas.

A continuación se muestra la tabla con los resultados de los parámetros que hacen que la prueba IFRA on-line logre una mejor repetitividad experimentalmente, los cuales salen de un análisis previo de las pruebas con IFRA off-line presentadas anteriormente (ver Anexo).

Tabla 2. Resultados de los parámetros ajustados que hacen que la prueba FRA on-line logre una mejor repetitividad¹¹¹.

FACTOR	RESULTADO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES	CONFIGURACIÓN ADECUADA	Método Exper.
Amplitud del pulso	La respuesta no depende de la tensión aplicada para un rango de 10 KHz a 1 MHz; sin embargo, al inyectar el pulso se debe garantizar que la relación señal-ruido sea alta.	Partiendo de resultados experimentales se toma como voltaje suficiente 160 V para realizar la prueba IFRA.	IFRA Off-line
Ancho de pulso	La repetitividad de la respuesta en frecuencia mejora al utilizar 20us como ancho del pulso, por lo cual este pulso para el método propuesto mejora los resultados obtenidos.	Partiendo de resultados experimentales se toma 20us como ancho del pulso adecuado para realizar la prueba IFRA.	IFRA Off-line
Punta de tensión	La repetitividad de la respuesta en frecuencia mejora con la punta de relación 1000:1 P6015A1000X Tektronix, ya que tiene más sensibilidad para medir el pulso sin perder los detalles de alta frecuencia.	Partiendo de resultados experimentales se toma la punta de tensión relación 1000:1 como la adecuada para realizar la prueba IFRA.	IFRA Off-line
Tratamiento matemático	La repetitividad de las curvas de IFRA al utilizar el tratamiento matemático de la transformada wavelets, mejora mucho más las curvas en altas frecuencias que la transformada de Fourier.	Partiendo del análisis de las pruebas se toma el método matemático de transformada Wavelets como el adecuado para realizar la prueba IFRA.	IFRA Off-line

¹¹¹ Elaboración propia.

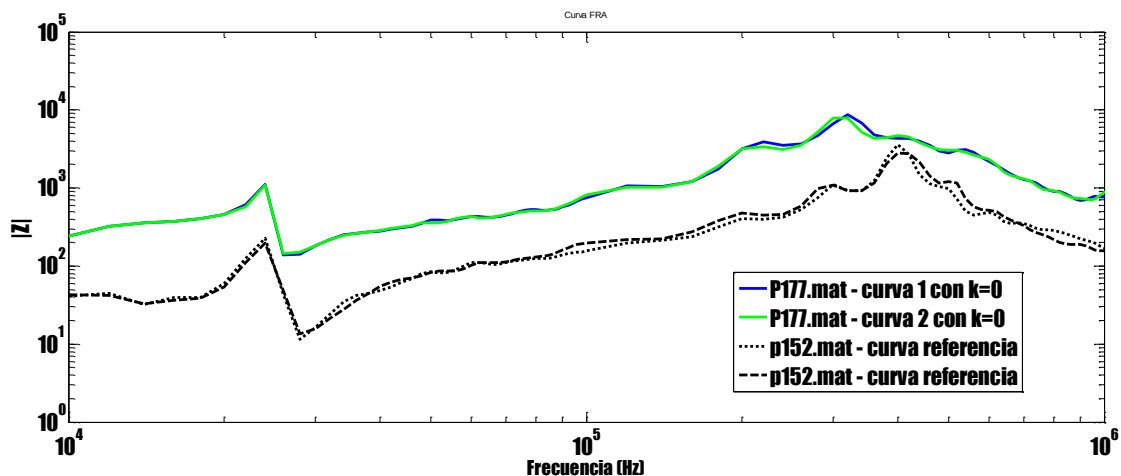
Una vez ajustados los parámetros que hacen que la prueba IFRA on-line logre una mejor repetitividad, se procede al análisis de las pruebas on-line (con el prototipo desarrollado) en los transformadores Explorer y Rymel. A continuación se toman como constantes los parámetros anteriormente definidos para determinar y analizar de manera experimental algunos de los factores que afectan la repetitividad de las curvas IFRA on-line, tales como: alimentación externa, carga conectada, posición sobre la onda de 60 Hz.

3.3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA PRUEBA IFRA ON-LINE

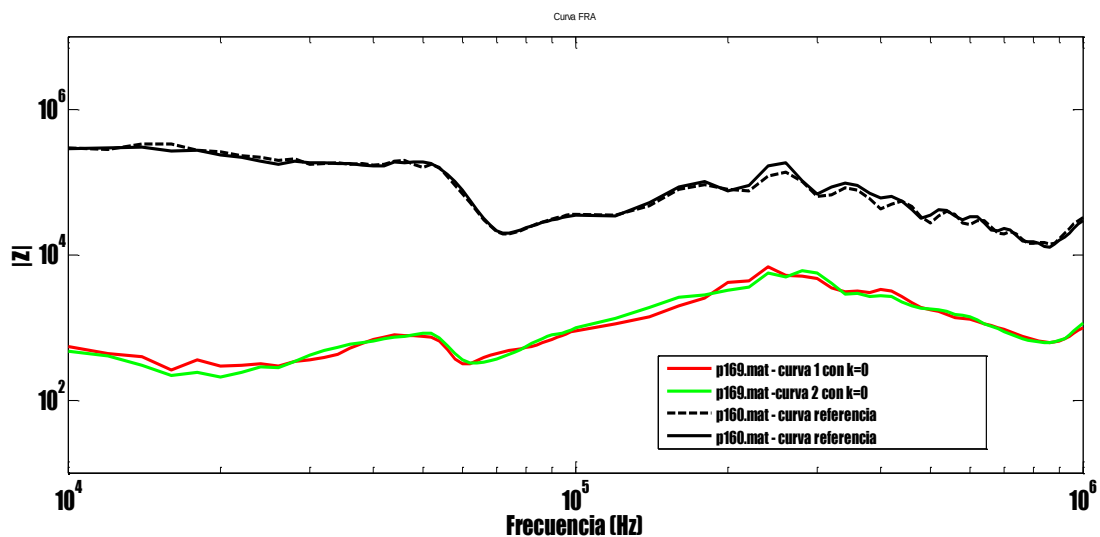
A partir del análisis anterior, en el cual se ajustaron los parámetros, se realiza el análisis experimental de las pruebas IFRA on-line.

- **Alimentación externa:** Sucede cuando uno de los devanados está energizado y el otro abierto. Para determinar la influencia de la alimentación externa (factor de carga $k=0$) se compararon las pruebas P177, P169, P170 Y P171 en los transformadores Rymel y Explorer (fase R) con $K=0$ y comparadas con su referencia IFRA off-line (ver graficas 14, 15, 16 y 17). Estas pruebas se llevaron a cabo con el prototipo experimental IFRA on-line. Los resultados se muestran a continuación:

Gráfica 14. Prueba P177, transformador Rymel con factor de carga $k=0$ (configuración B_AA) y prueba de referencia IFRA off-line P152¹¹².



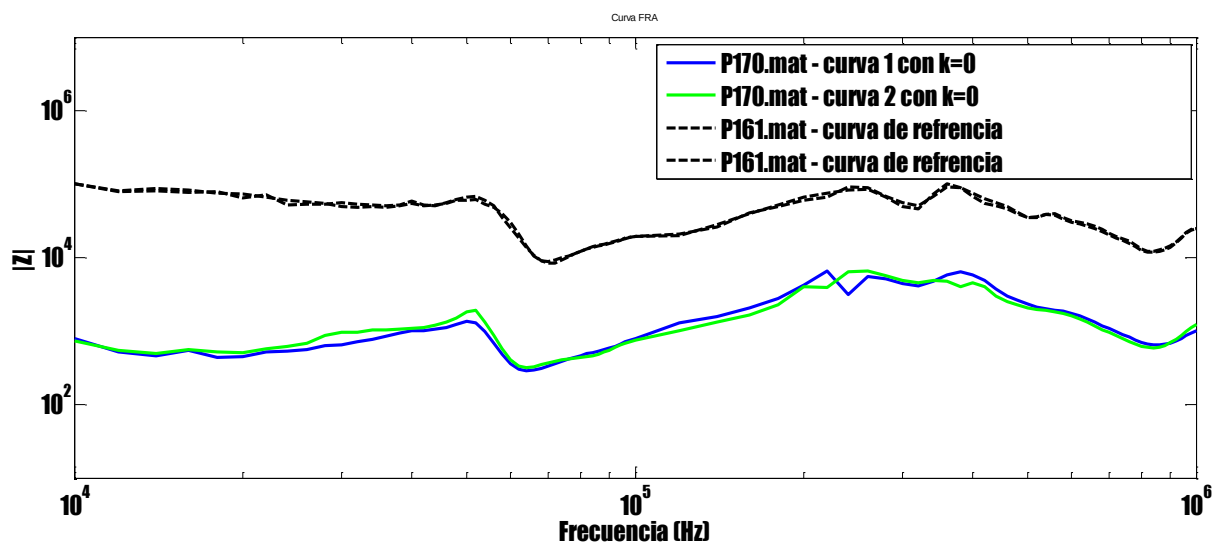
Gráfica 15. Prueba P169 fase R, transformador Explorer con factor de carga $k=0$ (configuración X1Xn_AC) y prueba de referencia IFRA off-line P160¹¹³.



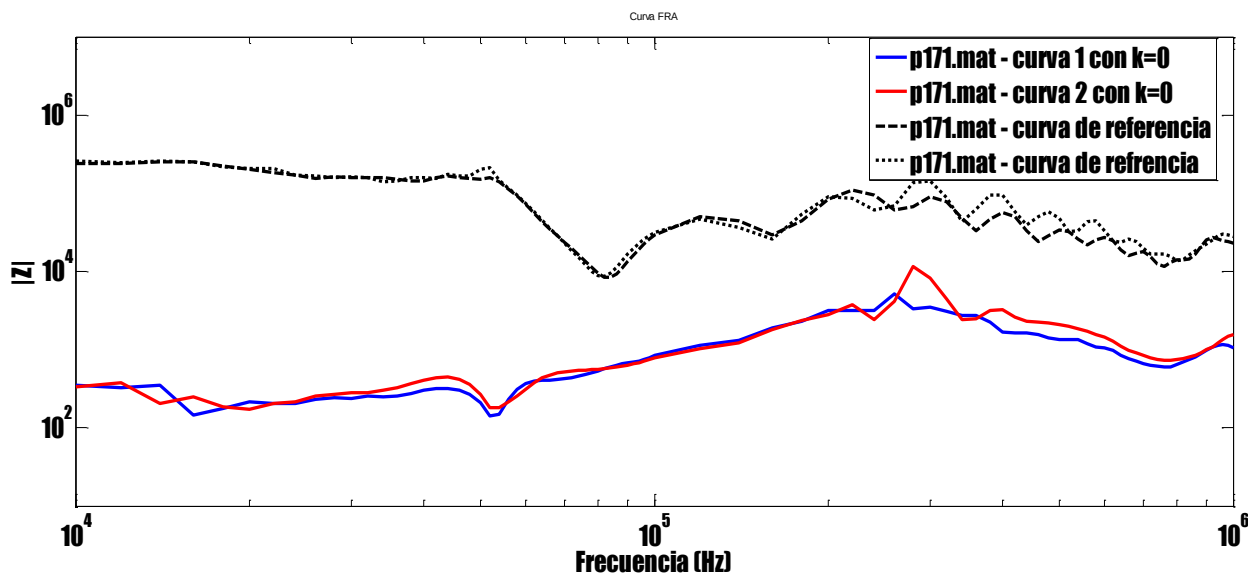
¹¹² Elaboración propia.

¹¹³ Elaboración propia.

Gráfica 16. Prueba P170 fase S, transformador Explorer con factor de carga $k=0$ (configuración X2Xn_AC) y prueba de referencia IFRA off-line P161¹¹⁴.



Gráfica 17. Prueba P171 fase T, transformador Explorer con factor de carga $k=0$ (configuración X3Xn_AC) y prueba de referencia IFRA off-line P162¹¹⁵.



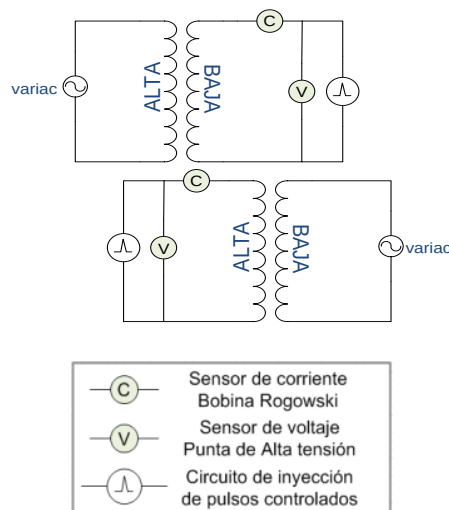
¹¹⁴ Elaboración propia.

¹¹⁵ Elaboración propia.

Cuando se tiene el transformador energizado en uno de sus devanados (graficas 14,15,16 y 17), a pesar de que se tiene una buena repetitividad en los resultados, se observa que la curva difiere de la obtenida off-line, esto se debe a que la configuración cambia y ya no es posible hacer una comparación directa con los resultados obtenidos off-line.

Como se muestra en la Figura 19, la fuente de tensión externa es un *variac* que posee una inductancia asociada, implicando variaciones en amplitudes y resonancias.

Figura 19. Configuraciones de la medida IFRA on-line en un transformador.¹¹⁶

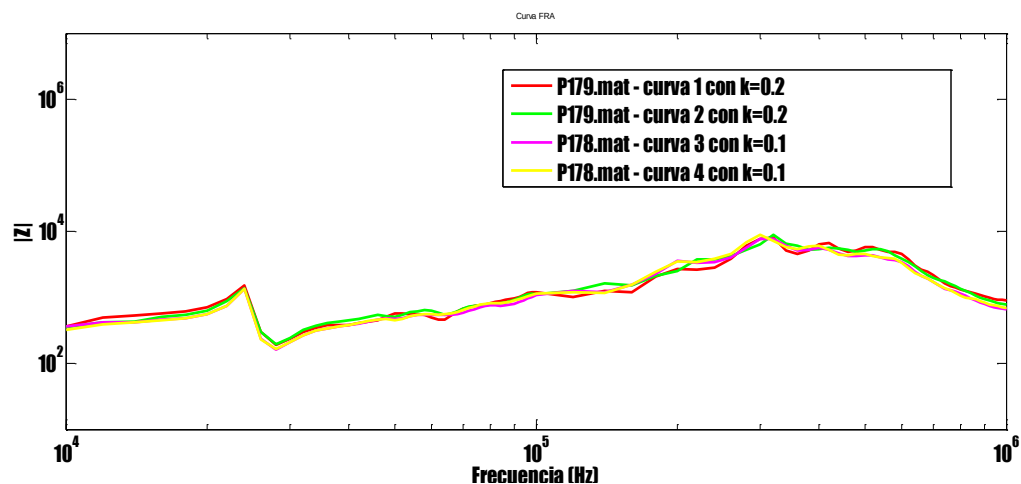


- **Carga conectada:** Como se describió en el Capítulo II, la carga conectada, influye en la repetitividad de la prueba IFRA On-line ya que esta puede ser alterada por las características dinámicas del sistema de potencia. Para analizar la influencia de la carga conectada en la repetitividad de la curva de IFRA on-line cuando se tienen diferentes valores de carga (K), se analizaron las pruebas 178 con $K=0.1$, 179 con factor $k=0.2$, en el transformador Rymel y las pruebas 167 con $k=0.41$ y 175 con $k=0.45$, realizadas en el transformador Explorer. Estas

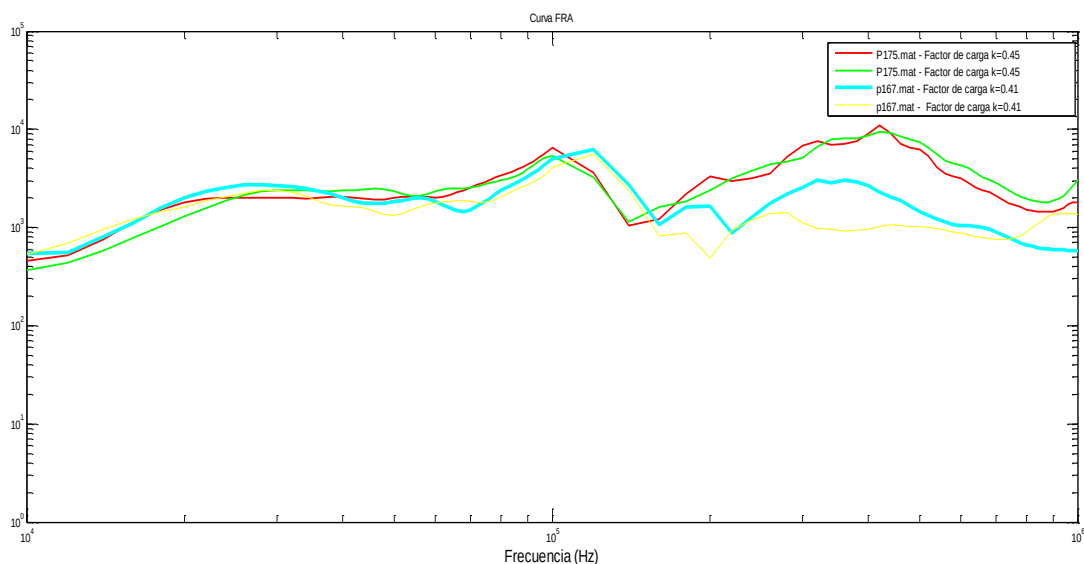
¹¹⁶ Elaboración propia.

pruebas se realizaron con el prototipo experimental IFRA On-line, los resultados se muestran a continuación.

Gráfica 18. Prueba P178 y p179 configuración B_AA, transformador Rymel con factor de carga $k=0.1$ y $k=0.2$ respectivamente¹¹⁷.



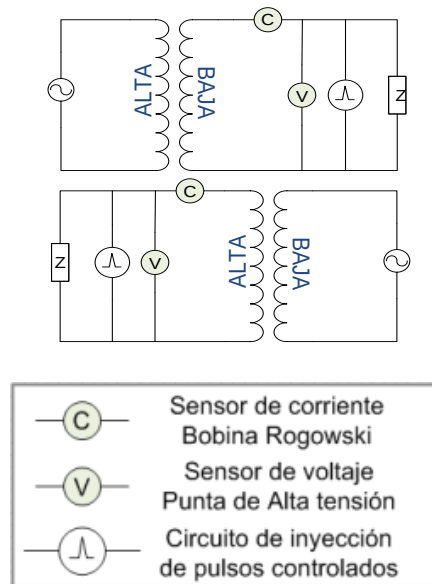
Gráfica 19. Prueba P167 y P175 configuración, transformador Explorer fase R con factor de carga $k=0.41$ y $k=0.45$ respectivamente¹¹⁸.



¹¹⁷ Elaboración propia.

¹¹⁸ Elaboración propia.

Figura 20. Configuraciones de la medida IFRA on-line en un transformador¹¹⁹.

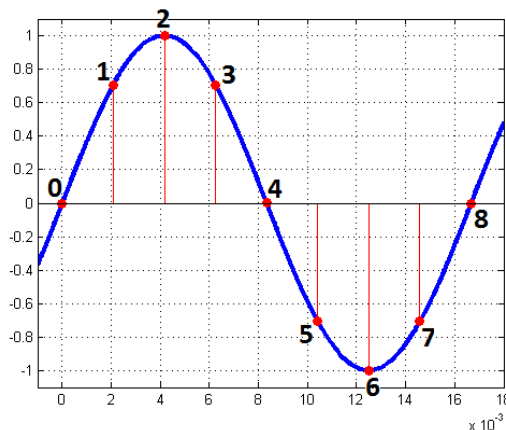


A pesar de tener una buena repetitividad en las curvas, se debe de tener en cuenta todos los parámetros del sistema de alimentación identificando cada elemento y sus impedancias asociadas.

- **Posición de los pulsos sobre la onda de 60 Hz:** Al inyectar los pulsos controlados sobre la onda de 60 Hz, estos puede aparecer en diferentes posiciones las cuales harán que el transformador este sometido a una mayor amplitud, por lo tanto la repetitividad de la curva de FRA On-line se puede ver afectada por este factor.

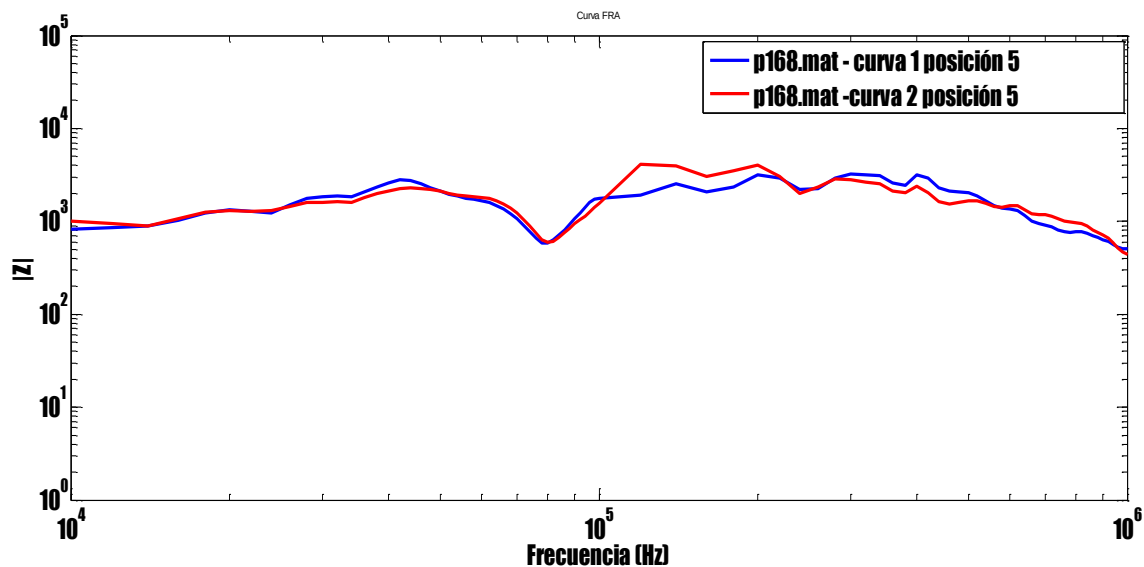
¹¹⁹ Elaboración propia.

Gráfica 20. Gráfica de posición de pulsos sobre la onda de 60Hz¹²⁰.



Para ver la influencia de la posición de los pulsos sobre la onda de 60 Hz se realizaron las pruebas FRA on-line, P168 posición del pulso 5, P169 posición del pulso 1 y P176 posición del pulso 4, para el transformador Explorer en la fase R con configuración X1Xn_AC.

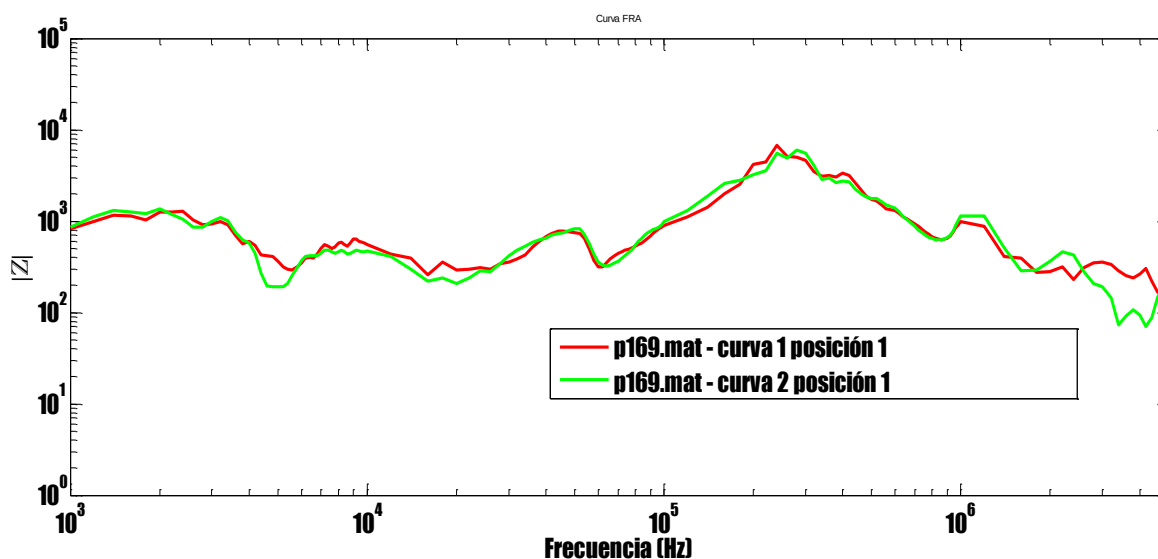
Gráfica 21. Prueba P168 sin carga, fase R, transformador Explorer posición 5 sobre la onda de 60 Hz¹²¹.



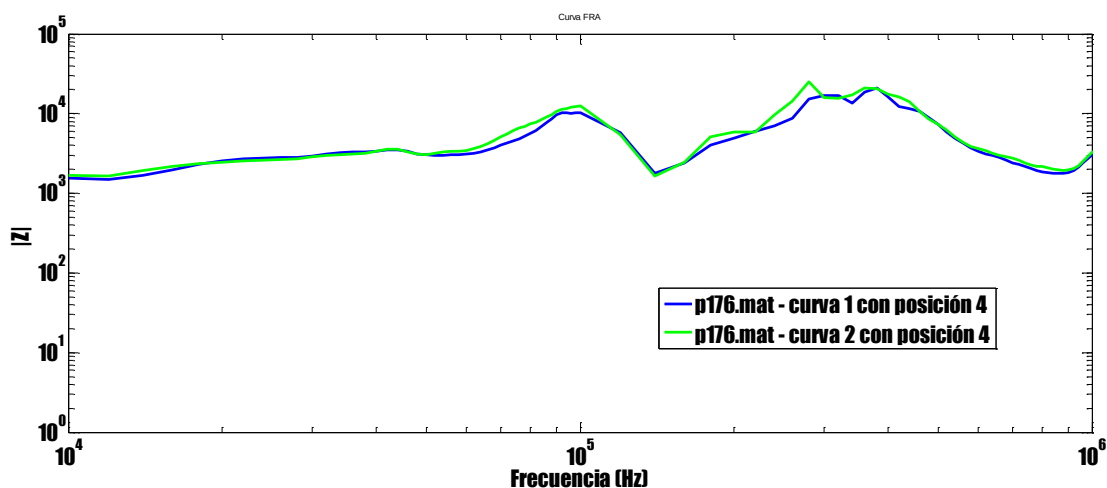
¹²⁰ Elaboración propia.

¹²¹ Elaboración propia.

Gráfica 22. Prueba P169 con carga, fase R, transformador Explorer posición 1 sobre la onda de 60 Hz¹²².



Gráfica 23. Prueba P176 con carga, fase R, transformador Explorer posición 4 sobre la onda de 60 Hz¹²³.



La posición de los pulsos sobre la onda de 60 Hz no influye en la repetitividad de la curva de FRA on-line para el rango de 10 KHz a 1 MHz, donde predomina la parte

¹²² Elaboración propia.

¹²³ Elaboración propia.

del devanado y la conexión de los cables, pero esto podría afectar en bajas frecuencias por la magnetización del núcleo del transformador, ya que de manera experimental no cambia.

RESUMEN DEL CAPÍTULO III

En este capítulo se realizó un análisis cualitativo de algunos factores con posible influencia en la repetitividad de la prueba IFRA on-line, para esto se hicieron pruebas pilotos que se analizaron por medio de un software que permitió visualizar las curvas.

En el siguiente capítulo se realiza el mismo análisis de este capítulo de manera cuantitativa, en el cual se usan métodos estadísticos para determinar la repetitividad de las curvas analizadas anteriormente.

4. ANÁLISIS DE LA REPETITIVIDAD DEL MÉTODO IFRA ON-LINE HACIENDO USO DE ÍNDICES ESTADÍSTICOS

4.1. INTRODUCCIÓN

El análisis de la repetitividad de las curvas obtenidas por el método IFRA on-line, consiste en comparar cualitativamente las ondas, es decir no se ha aplicado ningún método cuantitativo como si se hace con las curvas FRA off-line.

Por lo anterior, la necesidad de cuantificar las diferencias entre curvas on-line es indispensable, autores diversos proponen la utilización de indicadores cuantitativos (coeficiente de correlación, desviación espectral, etc.) para la evaluación entre curvas, logrando de esta manera, que la comparación se realice objetivamente.

En el desarrollo de este capítulo se identificarán algunos de los coeficientes estadísticos más comunes que permitan cuantificar las diferencias entre las curvas de IFRA por medio de sustentación teórica y matemática asociada a cada coeficiente, además se realizará un análisis cuantitativo con estos coeficientes entre las curvas que se utilizaron en el capítulo 3 para el análisis de los factores que afectan la repetitividad en la prueba IFRA on-line.

4.2. COEFICIENTES UTILIZADOS PARA LA COMPARACIÓN ENTRE CURVAS IFRA

4.2.1. Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación¹²⁴ se utiliza para evaluar la diferencia entre las curvas de IFRA, cuantificando la diferencia entre ellas por diferentes rangos de frecuencia. Considerando dos curvas de IFRA con n números, X {x₁, x₂, x₃, ..., x_n} y Y {y₁, y₂, y₃, ..., y_n}, el coeficiente de correlación entre estas dos curvas se define en la Ecuación 4.

Ecuación 4.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2}}$$

El valor del coeficiente de correlación puede variar desde -1 hasta 1, es decir $-1 < \rho < 1$, indicando que mientras más cercano a 1 esté el valor del coeficiente de correlación, más fuerte será la asociación entre las dos curvas. El rango de frecuencia que se proponen para el cálculo de este coeficiente es de 10kHz a 1 MHz.

Aunque Simón A. Ryder no propone unos rangos de valores de los coeficientes para determinar la similitud entre curvas, en un artículo de Wang, Vandermaar y Srivastava¹²⁵, sí se proponen rangos de comparación (Ver Tabla 2).

¹²⁴ Véase en VANDERMAAR. Op. Cit.; y en WANG. 1999. Op. Cit.

¹²⁵ WANG. 1999. Op. Cit.

Tabla 3. Interpretación de resultados obtenidos usando el coeficiente de correlación¹²⁶.

CC	Magnitud	Fase
Buena aproximación	$\geq 0,998$	$\geq 0,95$
Problemas o diferencias ya considerables	$< 0,998$	$< 0,95$

4.2.2. Suma algebraica del error logarítmico

La suma algebraica del error logarítmico (ASLE, por sus siglas en inglés, *Absolute Sum of Logarithmic Error*)¹²⁷ calcula la suma total del error punto a punto de las curvas y lo divide por la cantidad de datos que tenga la región para la cual se está calculando.

Si se consideran dos curvas de IFRA con n números, $X \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ y $Y \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$, la suma algebraica del error logarítmico entre estas dos curvas se calcula según la Ecuación 5. El grado de deformación se puede predecir con la misma facilidad de los valores obtenidos de magnitud o fase haciendo uso de ASLE.

Ecuación 5.

$$ASLE_{(X,Y)} = \frac{\sum_{i=1}^N |20 \log_{10} Y(i) - 20 \log_{10} X(i)|}{N}$$

El valor de la magnitud ya está en escala logarítmica y por tanto no es necesario tomar logaritmos en el cálculo de parámetros de suma absoluta de error logarítmica. El rango de frecuencia para el cálculo de ASLE es de 10kHz a 1 MHz y la interpretación de los resultados obtenidos aplicando este coeficiente se encuentran en la Tabla 3.

¹²⁶ Elaboración propia.

¹²⁷ Véase en WANG. 2003; y en WANG. 1999. Op. Cit.

Tabla 4. Interpretación de resultados obtenidos con el coeficiente ASLE¹²⁸.

ASLE	Magnitud	Fase
Buena aproximación	$\leq 0,4$	$\leq 0,8$
Problemas o diferencias ya considerables	$> 0,4$	$> 0,8$

4.3. ANÁLISIS CUANTITATIVO ENTRE LAS CURVAS PRESENTADAS EN EL CAPÍTULO III PARA EL ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA REPETITIVIDAD DEL MÉTODO IFRA ON-LINE

Para realizar un análisis no sólo cualitativo sino también cuantitativo de la repetitividad de las curvas IFRA on-line, se usan los indicadores estadísticos que permiten evaluar las curvas IFRA on-line simuladas en el capítulo III para el estudio de los factores que afectan la repetitividad de la prueba. Los indicadores estadísticos utilizados son:

- Coeficiente de correlación (CC).
- Suma algebraica del error logarítmico (ASLE).

El análisis cualitativo y cuantitativo se analiza en el rango *de frecuencia de* 10KHz a 1MHz. En la tabla siguiente se resume la interpretación de cada uno de los indicadores estadísticos.

¹²⁸ Elaboración propia.

Tabla 5. Interpretación de los indicadores estadísticos¹²⁹.

Indicador	Buena aproximación	Aproximación cercana	Aproximación pobre	Aproximación nula o muy pobre
CC	≥ 0.998	0.97-0.997	0.95-0.969	< 0.95
ASLE	≤ 0.4	0.401-0.6	0.601-0.8	> 0.8

A continuación se presenta el análisis cuantitativo por cada uno de los siguientes factores vistos en el Capítulo III:

- **Alimentación externa:** El análisis se realiza a partir de las Gráficas 14, 15, 16 y 17.

Tabla 6. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 14, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz¹³⁰.

	Referencia curva 1
Indicador	Curva 2
CC	0,99330
ASLE	0.34003

En la tabla 6 el coeficiente de correlación y el Asle, tienen una buena aproximación lo que indica que hay una buena repetitividad en las curvas de IFRA on-line de la prueba P177 para un factor de carga de $k=0$.

¹²⁹ Elaboración propia.

¹³⁰ Elaboración propia.

Tabla 7. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 15, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz¹³¹.

	Referencia curva 1
Indicador	Curva 2
CC	0,99097
ASLE	0,60001

En la tabla 7 el coeficiente de correlación tiene una buena aproximación lo que indica que hay muy poca diferencia entre las curvas de IFRA y buena repetitividad en la curvas de la prueba P169 para un factor de carga $k=0$. Para el factor Asle la aproximación es cercana a buena lo que indica que hay un error mediano en la repetitividad de las curvas.

Tabla 8. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 16, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz¹³².

	Referencia curva 1
Indicador	Curva 2
CC	0,97197
ASLE	1,24099

En la tabla 8 el coeficiente de correlación tiene una muy aproximación cercana a buena lo que indica que hay poca diferencia en las curvas de IFRA on-line de la prueba P170 para un factor de carga $k=0$. Para el factor ASLE la aproximación es pobre lo que indica que hay un error en la repetitividad de las curvas IFRA on-line.

¹³¹ Elaboración propia.

¹³² Elaboración propia.

Tabla 9. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 17, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz¹³³.

	Referencia curva 1
Indicador	Curva 2
CC	0,88372
ASLE	1,82856

En la tabla 9 el coeficiente de correlación tiene aproximación pobre lo que indica que hay diferencia en las curvas de IFRA on-line de la prueba P171 para un factor de carga $k=0$. Para el ASLE la aproximación es pobre lo que indica que hay un error en la repetitividad de las curvas IFRA on-line

De las anteriores tablas, se deduce que el CC y ASLE indican para algunas curvas un problema en la repetitividad de IFRA On-Line. Esto es debido que el principalmente el ASLE no es sensible a la repetitividad de las curvas que pueden ser similares en forma pero con una diferencia en amplitud.

La alimentación externa puede ser un problema que afecta la repetitividad de la curvas FRA on-line por debajo de 10KHZ, por lo cual se sugiere usar el mismo pulso y trabajar en este rango de frecuencia recomendado (10KHz a 1 MHz).

- **Carga conectada:** El análisis se realiza a partir de las Gráficas 18 y 19.

¹³³ Elaboración propia.

Tabla 10. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 18, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz¹³⁴.

Indicador	Referencia curva 1		
	Curva 2	Curva 3	Curva 4
CC	0,99077	0,99710	0,99068
ASLE	0,58465	0,39800	1,16008

En la tabla 10 el coeficiente de correlación tiene una buena aproximación lo que indica que hay muy poca diferencia entre las curvas de IFRA y buena repetitividad en la curvas de la pruebas P178 y P179 para un factor de carga $k=0.1$ y $k=0.2$. Para el factor ASLE la aproximación es cercana a buena lo que indica que hay un error mediano en la repetitividad de las curvas.

Tabla 11. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 19, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz¹³⁵.

Indicador	Referencia curva 1		
	Curva 2	Curva 3	Curva 4
CC	0,98619	0,88693	0,88372
ASLE	1,58846	6,99566	1,83856

En la tabla 11 el coeficiente de correlación tiene aproximación pobre lo que indica que hay diferencia en las curvas de IFRA on-line de las pruebas P167 y P175 para

¹³⁴ Elaboración propia.

¹³⁵ Elaboración propia.

un factor de carga $k=0.41$ y $k=0,45$. Para el Asle la aproximación es pobre lo que indica que hay un error en la repetitividad de las curvas IFRA on-line.

En la gráficas 19 y 20, las curvas de IFRA on-line con diferentes factores de carga muestran una tendencia a ser repetibles, sin embargo la gráfica 20 en alta frecuencia pierde repetitividad, lo cual se ve reflejado en el factor ASLE y la CC.

La carga conectada es un factor que afecta la repetitividad de las curvas FRA on-line, por lo que se sugiere conocer detalladamente el sistema de alimentación, identificando cada elemento para así tener en cuenta las impedancias asociadas ya que es inherente los efectos que provoca la carga sobre la repetitividad de la curva.

- **Posición de los pulsos sobre la onda de 60 Hz:** El análisis se realiza a partir de las Gráficas 21, 22 y 23.

Tabla 12. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 21, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz¹³⁶.

	Referencia curva 1
Indicador	Curva 2
CC	0,97585
ASLE	2,54525

En la tabla 12 el coeficiente de correlación tiene una muy aproximación cercana a buena lo que indica que hay poca diferencia en las curvas de IFRA on-line de la prueba P168 para la posición 5 sobre la onda. Para el factor ASLE la aproximación

¹³⁶ Elaboración propia.

es pobre lo que indica que hay un error en la repetitividad de las curvas IFRA on-line.

Tabla 13. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 22 en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz¹³⁷.

	Referencia curva 1
Indicador	Curva 2
CC	0,99097
ASLE	0,63827

En la tabla 13 el coeficiente de correlación tiene una buena aproximación lo que indica que hay muy poca diferencia entre las curvas de IFRA y buena repetitividad en la curvas de la prueba P169 para para la posición 1 sobre la onda. Para el factor ASLE la aproximación es cercana a buena lo que indica que hay un error mediano en la repetitividad de las curvas.

¹³⁷ Elaboración propia.

Tabla 14. Resultados de los indicadores estadísticos de las curvas de la gráfica 23, en el rango de frecuencia de 10KHz a 1MHz¹³⁸.

	Referencia curva 1
Indicador	Curva 2
CC	0,91290
ASLE	6,23993

En la tabla 14 el coeficiente de correlación tiene una muy aproximación cercana a buena lo que indica que hay poca diferencia en las curvas de IFRA on-line de la prueba P176 para la posición 4 sobre la onda. Para el factor ASLE la aproximación es pobre lo que indica que hay un error en la repetitividad de las curvas IFRA on-line.

La posición de los pulsos sobre la onda de 60 Hz puede ser un problema que afecta la repetitividad de las curvas FRA on-line por debajo de 10KHZ, por lo cual se sugiere usar el mismo pulso y la misma posición sobre la onda de 60 Hz para obtener una repetitividad adecuada.

RESUMEN DEL CAPÍTULO IV

En este capítulo se realizó un análisis cuantitativo usando dos coeficientes estadísticos: Coeficiente de correlación y suma algebraica del error logarítmico con las curvas que se presentaron en el Capítulo III para el análisis de los factores que afectan la repetitividad de la prueba IFRA on-line. Con este análisis se puede determinar los factores que afectan la repetitividad de manera cuantitativa de la

¹³⁸ Elaboración propia.

curvas IFRA on-line según los coeficientes estadísticos, teniendo un criterio de comparación más fuerte y confiable.

5. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas con base en el trabajo realizado:

- El estudio de los factores que afectan la repetitividad en la prueba FRA on-line es un tema que aún se encuentra en una etapa "inicial" de desarrollo. Hasta el momento, se tienen varias conclusiones sobre estos factores por diferentes autores, que se convierten en los primeros indicios para obtener una buena prueba de FRA on-line. Gracias al análisis realizado en este trabajo de grado, se identificaron algunos de los factores que afectan la repetitividad de la prueba FRA on-line.
- Mediante el uso de herramientas computacionales se utilizó un análisis cualitativo de las pruebas realizadas para el estudio de los factores que afectan la repetitividad de la prueba FRA on-line.
- Haciendo uso de indicadores estadísticos, se logró cuantificar y evaluar las curvas IFRA on-line simuladas en el Capítulo III para el estudio de los factores que afectan la repetitividad de la prueba FRA on-line.
- Uno de los mayores limitantes encontrados para llevar a cabo el análisis de los factores que afectan la repetitividad de la prueba FRA on-line es el ruido y los efectos ambientales que pueden influenciar la prueba a frecuencias menores que 10 KHz y mayores que 1MHz. Los efectos del ruido y del ambiente los cual tienden a relacionarse directamente con el núcleo magnético, pueden mitigarse pero no evitarse, esto da como resultado una resolución baja en este rango de frecuencia.

- De acuerdo con los resultados obtenidos en la repetitividad de las curvas FRA on-line, se logró dar validez y viabilidad al IFRA on-line desarrollado por el Grupo de Investigación GRALTA de la Universidad del Valle. Es viable para un diagnóstico de transformadores a futuro, dándole validez al método.

TRABAJOS FUTUROS

Las recomendaciones siguientes son derivadas del conocimiento obtenido a través del desarrollo de este trabajo:

- Es muy importante conocer la respuesta de los coeficientes para una amplia gama de transformadores, esto debería incluir coeficientes estadísticos distintos a los tratados en esta tesis, para determinar la repetitividad de la prueba FRA on-line.
- Para trabajos futuros se propone aplicar todo este análisis de repetitividad de FRA on-line para una gama amplia de transformadores en donde se varié el tamaño (diferentes potencias), el tipo de construcción y de bobinados.
- Usar la técnica de Splines para determinar la tendencia de la curva FRA on-line.

BIBLIOGRAFÍA

ARGÜESO, M. Estudio de una bobina de Rogowski como sonda detectora de pulsos de alta frecuencia. Tesis de doctorado. Universidad Carlos III de Madrid. 2005

BENGTSSON, C. Status and trends in transformer monitoring. En: IEEE Transactions on power delivery, Julio, 1995. Vol. 11, No. 3.

BIRLASEKARAN, S. y FETHERSTON, F. Off/on-line FRA condition monitoring technique for power transformer. En: Power Engineering Review, IEEE. Agosto, 1999. Vol. 19, No. 8, pp. 54-56.

CASTAÑO, C. Definición y análisis de los factores que influyen en la respuesta en frecuencia de los transformadores eléctricos. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Eléctrica. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. 2010.

CASTAÑO, C. Evaluación del estado eléctrico y mecánico del transformador mediante el análisis de la variación en frecuencia de sus parámetros eléctricos. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Eléctrico. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. 2008.

COFFEEN, L. et al. An on-line frequency response analysis (FRA) update. *TechCon*, 2009. pp. 129-151.

COFFEEN, L. et al. A Summary of NEETRAC On-line Frequency Response Analysis (FRA) and a New EPRI Commercial Prototype FRA Installation at First

Energy. Estados Unidos: NEETRAC and EPRI Substation Equipment Maintenance Optimization & Diagnostics Conference. Marzo, 2009.

COFFEEN, L. et al. On-Line Monitor Tracks Transformer Health. NEETRAC, Technical Report, Florida Power & Light. Octubre, 2007.

COFFEN, L. On-line Frequency Response Analysis System. Development of Specifications. EPRI Project Manager, Technical Progress. Estados Unidos. Marzo, 2003.

COFFEN, L. System and Method for On-Line Impulse Frequency Response Analysis. Estados Unidos, Patent 6549017B2. Abril 15, 2003.

DE RYBEL, T. et al. Online Signal Injection Through a Bus-Referenced Current Transformer. Power Delivery, IEEE Transactions on. Enero, 2010. Vol. 25, No. 1. pp. 27-34.

DICK, E. P., y ERVEN, C. C. Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis. En: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Diciembre, 1978. Vol. 97, No. 6. pp. 2144-2153 C.G.A.

FESER, K. et al. The transfer function method for detection of winding displacements on power transformers after transport, short circuit or 30 years of service. 2000.

FIROOZIAND, H. y MAHMOODI, N. Frequency Response Analysis - Low Frequency Characteristics and Fault Diagnosis on Power Transformers. Alemania. 2010.

GALLI, S. et al. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. En: Proceedings of the IEEE. Junio, 2011. Vol. 99, No. 6.

GOMEZ, E. et al. Estado actual y tendencias futuras de la técnica del análisis de respuesta en frecuencia (FRA) con el transformador en servicio. Cali: Universidad del Valle. 2012.

GONZÁLEZ J. C., et al. An overview of the On Line Application of Frequency Response Analysis (FRA). Madrid, España, 2007. pp. 1294-1299.

GONZÁLEZ J. C., et al. On-line measurements of the Frequency Response of the Transformer by means of the Bushing Tap Coupler. Advanced Research Workshop on Transformers. Baiona – España. Octubre, 2007. pp. 1-6.

IEC. IEC 60076-18 International Standard: Power transformers. Part 18: Measurement of Frequency Response International Electrotechnical Commission. Edición 1. Julio, 2012.

LEIBFRIED, T. y FESER, K. Monitoring off power transformers using the transfer function method. En: Power Delivery, IEEE Transactions on. Octubre, 1999. Vol. 14, No. 4. pp. 1333-1341.

LEIBFRIED, T. y FESER, K. Off-line and on-line monitoring of power transformers using the Transfer Function method. En: Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Canadá. Junio 16-19, 1996. pp. 34-37.

LEIBFRIED, T. y FESER, K. On-line Monitoring of Transformers by Means of the Transfer Function Method. En: Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, Estados Unidos, June 5-8, 1994.

LEIBFRIED, T. On-line monitoring of power Transformers – System Technology and data evaluation. Siemens Germany. High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication. Agosto, 1999. pp.22-27.

LEIBFRIED, T. On-line Monitors keep transformers in service. En: IEEE Computer Applications in Power. 1998. pp. 1-7.

MALEWSKI, R. et al. Five Years of monitoring the impulse test of power transformers with digital recorders and the transfer function method. CIGRE paper. París, 1992. No. 12-201.

MALEWSKI, R. et al. Measurement of Switching Transients in 735 kV Substations and Assessment of their Severity for Transformer Insulation. En: IEEE Transactions on Power Delivery. Octubre, 1988. Vol. 3, No. 4.

MELO, M. y ALVES, M. Experience with on-line monitoring of capacitance and tangent delta of condensive bushings. En: IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition. Latinoamérica. 2008. pp. 1-6.

PLEITE, J. y GONZÁLEZ, C. Diagnóstico de Transformadores Basado en el Análisis de la Respuesta en Frecuencia. En: FRA. Universidad Carlos III De Madrid. 2008.

RAMSEIER, S. y SPIESS, H. El canto de las líneas eléctricas. En: Revista ABB. Switzerland. Febrero, 2006.

RICHENBACHER, A.G. Frequency Domain Analysis of Responses From L.V.I. Testing of Power Transformers. 43rd Doble. Int'l Client Conference. 1976.

ROBERTSON, D. C. et al. Wavelets and electromagnetic power system transients. En: IEEE Transactions on Power Delivery. Abril,1996. Vol, 11.

SETAYESHMEHR, A. et al. On-line Monitoring of Transformer via Transfer Function. En: IEEE Electrical Insulation Conference, Canadá. June, 2009. pp. 278-282.

SETAYESHMEHR, A. et al. On-line Monitoring and Diagnoses of Power Transformer Bushings. En: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, June, 2006. Vol. 13, No. 3.

TENBOHLEN, S. y RYDER, S. A. Making Frequency Response Analysis Measurements: A Comparison of the Swept Frequency and Low Voltage Impulse Methods. En: XIII ISH Netherlands. 2003.

VANDERMAAR, A. On-line Frequency Response Analysis System. Development of Specifications. EPRI Project Manager, Technical Progress. Canadá, Diciembre, 2001.

WANG, M. et al. Condition monitoring of transformers in service by the low voltage impulse method. En: IEE High Voltage Engineering Symposium, Vancouver, Canadá. Agosto, 1999.

WANG, M. Winding movement and condition monitoring of power transformers in service. Tesis de Doctorado. University of British Columbia. 2003.

WIMMER, R. y FESER, K. Calculation of the transfer function of a power transformer with online measuring data. En: Technology. 2004. No. 3, p. 5.

Low Voltage Impulse Method (LVI). First proposed by W. Lech & L. Tyminski in Poland for detecting transformer winding deformation.1960

<http://www.framit.com>. Consultada el 1 de agosto del 2012.

<http://www.doble.com/products>. Consultada el 1 de agosto del 2012.

<http://electronica.uc3m.es/groble/publicaciones>. Consultada el 1 de agosto del 2012.

<http://my.epri.com/portal/server.pt?space=CommunityPage&cached=true&parentname=ObjMgr&parentid=2&control=SetCommunity&CommunityID=221&PageIDqueryComId=0>. Consultada el 1 de Agosto de 2010.

ANEXO

