



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Análisis de la respuesta en frecuencia como
herramienta de evaluación de las pruebas de impulso
en transformadores.**

Autor: Baudilio Valecillos

Director: Profesor Dr. Javier Sanz Feito.

Leganés 22 de septiembre 2005.

Resumen

El criterio de aceptación o rechazo de las pruebas de impulso en transformadores de potencia y de medida de tensión e intensidad, aplicadas según normas internacionales, consiste en comparar los oscilogramas obtenidos de la aplicación de impulsos normalizados a cada uno de los arrollamientos del transformador bajo estudio. Dichos oscilogramas son obtenidos aplicando formas de ondas similares pero de magnitudes diferentes. La comparación de dichas trazas se realiza de forma visual y cualitativa, lo que hace que el criterio de aceptación sea subjetivo, y que la presencia de defectos menores pueda pasar inadvertida.

La obtención de la respuesta en frecuencia de las ondas de corriente y tensión, aplicada durante las pruebas de impulso, y la comparación de dicha respuesta es una práctica recomendada por diversos autores para una mejor interpretación de los resultados obtenidos, ya que en el dominio de la frecuencia el efecto de posibles defectos ocurridos durante la prueba se ve resaltado. Esto permite eliminar ambigüedades de criterio, y obtener resultados menos dependientes del experto que realiza los ensayos.

La obtención de la respuesta en frecuencia del transformador es una técnica de diagnóstico en sí misma y diversos autores proponen la utilización de indicadores cuantitativos (coeficiente de correlación, bandas de tolerancia, etc.) para la evaluación de los registros oscilográficos, y disponer así de un criterio para comparar trazas en el dominio de la frecuencia.

En el presente trabajo se propone la utilización de la respuesta en frecuencia como herramienta auxiliar para la interpretación de los resultados obtenidos de la prueba de impulsos y la utilización de indicadores cuantitativos para comparar dichas respuestas en frecuencia. Se realiza una plataforma completa de evaluación de los registros y formas de onda obtenidos de las pruebas de impulso, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

Adicionalmente la plataforma aquí desarrollada podrá utilizarse para estudiar y caracterizar el comportamiento en frecuencia de diferentes elementos que conforman el sistema de potencia, por ejemplo: caracterizar el estado de descargadores de sobretensión según su comportamiento armónico [45], evaluación dinámica de sistemas de puesta a tierra [46], modelado de transitorios electromagnéticos en transformadores a partir de su respuesta en frecuencia[47], caracterización del aislamiento de cables [48], entre muchos otros, en los cuales es factible obtener la respuesta en frecuencia a través de la aplicación de impulsos.

Índice general

Resumen	3
Índice general	5
Índice de Figuras	7
Lista de abreviaturas y símbolos	8
Capítulo	9
Planteamiento del problema	
1.1 Descripción del ensayo	9
1.2 Interpretación de resultados Criterios de aceptación y rechazo	9
1.3 Objetivos	11
Capítulo 2	12
Nuevas propuestas para la interpretación de resultados	
2.1 Respuesta en frecuencia	12
2.1.1 Coherencia	12
2.1.2 Interpretación de resultados obtenidos por FRA	13
2.1.2.1 Coeficiente de correlación	14
2.1.2.2 Desviación espectral	14
2.1.2.3 Bandas de tolerancia	14
2.2 Líneas de trabajo actuales	15
2.2.1 Redes neuronales y FRA	15
2.2.2 Ondículas e impulsos	15
2.2.3 Modelado y FRA	15
Capítulo 3	17
Metodología	
3.1 Obtención de la respuesta en frecuencia	17
3.1.1 Métodos de barrido	17
3.1.2 Prueba de impulso	18
3.2 Modelado	20
3.2.1 Dependencia de la forma de onda	20
3.2.2 Digitalizador	21
3.3 Plataforma de medición	22
Capítulo 4	23
Resultados	
4.1 Obtención de la respuesta en frecuencia por métodos de barrido	23
4.2 Obtención de la respuesta en frecuencia de la prueba de impulso	23
4.3 Modelado	25
4.3.1 Influencia de la forma de onda	25
4.3.2 Digitalizador	26

4.4 Plataforma de medición	26
Capítulo 5	28
Verificación experimental	
5.1 Respuesta en frecuencia obtenida de la prueba de impulso	28
5.2 Cálculo de coherencia	30
5.3 Coeficiente de correlación	31
5.4 Bandas de tolerancia	31
Capítulo 6	32
Conclusiones	
6.1 Futuras propuestas	32
6.2 Conclusiones	32
Bibliografía	34
Anexo A	39

Índice de figuras

<i>Figura 3.1.1.1 Esquema de medición Solartron 1260</i>	18
<i>Figura 3.1.1.2 Esquema de medición HP4194A</i>	18
<i>Figura 3.1.1.3 Transformador de potencial ensayado</i>	18
<i>Figura 3.1.2.1 Forma de onda impulso normalizado</i>	18
<i>Figura 3.1.2.2 Generador de impulsos LINEALT</i>	19
<i>Figura 3.1.2.3 Diagrama del generador de impulsos LINEALT</i>	19
<i>Figura 3.1.2.4 Esquema básico generador de impulsos</i>	20
<i>Figura 3.2.3.1 Modelo del sistema</i>	21
<i>Figura 4.1.1 RF obtenida con HP4194A</i>	23
<i>Figura 4.1.2 RF obtenida con Solartron</i>	23
<i>Figura 4.2.1 Tensión de impulso aplicada</i>	23
<i>Figura 4.2.2 Intensidad de corriente de neutro</i>	23
<i>Figura 4.2.3 RF obtenida de la aplicación impulso</i>	24
<i>Figura 4.2.4 Comparación de RF</i>	24
<i>Figura 4.2.5 RF Comparativa impulso</i>	24
<i>Figura 4.2.6 RF Comparativa Solartron</i>	24
<i>Figura 4.3.1.1 Impulsos de tensión tiempo de frente</i>	25
<i>Figura 4.3.1.2 RF comparativa Tf</i>	25
<i>Figura 4.3.1.3 Impulsos de tensión tiempo de cola</i>	25
<i>Figura 4.3.1.4 RF comparativa Tc</i>	25
<i>Figura 4.3.2.1 RF resolución 8Bits</i>	26
<i>Figura 4.3.2.2. RF resolución 10Bits</i>	26
<i>Figura 4.4.1 Sistema de prueba</i>	27
<i>Figura 5.1.1 Transformador de distribución</i>	28
<i>Figura 5.1.2 Tensión de impulso</i>	29
<i>Figura 5.1.3 Intensidad de corriente de neutro</i>	29
<i>Figura 5.1.4 Respuesta en frecuencia obtenida</i>	29
<i>Figura 5.1.5 Respuesta en frecuencia luego de aplicar ventana exponencial</i>	30
<i>Figura 5.2.1 Coherencia</i>	30
<i>Tabla 5.3.1 Coeficiente de correlación</i>	31
<i>Figura 5.4.1 Bandas de tolerancia</i>	31

Lista de abreviaturas y símbolos.

Abreviatura/símbolo	Significado
FRA (inglés, Frequency Response Análisis)	Análisis de la respuesta en frecuencia
NBA	Nivel básico de aislamiento
FFT (inglés, Fast Fourier Transform)	Transformada rápida de Fourier
STFT (inglés, Short Time Fourier Transform)	Transformada de Fourier de corto tiempo
RF	Respuesta en frecuencia.
Tf	Tiempo de frente
Tc	Tiempo de cola

Capítulo 1.

Planteamiento del problema

1.1 Descripción del ensayo.

La prueba de impulso, o choque, en transformadores tiene como objetivo caracterizar el aislamiento del mismo ante sobretensiones tipo impulso. Consiste en aplicar impulsos de tensión de forma normalizada, a los arrollamientos del transformador bajo estudio. Es una prueba de diseño o tipo para transformadores de distribución y potencia [1], de rutina para transformadores clase II [1] y se puede usar, con un procedimiento especial, como control de calidad para transformadores de distribución [2]. La forma como se administra depende del caso para el cual se aplica. En su condición más general consiste en aplicar: una onda de impulso completa a tensión reducida (50%-70% NBA), dos ondas de impulso cortadas y una onda de impulso completa a tensión plena (NBA) [3]. En los casos en que así esté especificado se pueden aplicar dos ondas de impulso de frente cortado. En [4] se encuentran los parámetros que definen cada tipo de onda.

Durante la aplicación de cada uno de los diferentes tipos de onda se debe obtener un oscilograma de la tensión aplicada. Este oscilograma sirve para verificar que la forma de onda inyectada cumple con los parámetros requeridos, y sirve para realizar la evaluación de la prueba.

El terminal no ensayado del arrollamiento bajo estudio debe ser solidamente puesto a tierra para realizar la prueba. En este punto se coloca un medidor de corriente, que puede ser una impedancia o un transformador de impulsos de corriente. Esta traza también se utiliza para evaluar los resultados obtenidos en la prueba [5].

Los terminales de arrollamientos a los cuales no se les esta inyectando el impulso pueden ser colocados sólidamente a tierra o puestos a tierra a través de una impedancia menor a la impedancia de choque que tendría una línea de tensión igual a su tensión asignada. Lo importante es que la tensión transferida a estos arrollamientos no sea superior a su nivel de aislamiento. Estas tensiones transferidas se pueden medir, pero no es obligatorio hacerlo [5].

1.2 Interpretación de resultados. Criterios de aceptación y rechazo.

La normativa sobre pruebas de impulso [5] da guías de interpretación de resultados y debido a que dicha prueba es del tipo aceptación o rechazo (pass-fail) presenta criterios al respecto. Se presenta en esta norma una gran cantidad de información sobre cómo interpretar las mediciones, pero todas las metodologías son subjetivas. Se deja además en la norma la posibilidad de utilizar métodos que permitan mejorar la interpretación de resultados. Se puede resumir la metodología de evaluación de resultados de la siguiente manera:

La evaluación de los resultados se hace de forma comparativa, ya sea comparando los oscilogramas de tensión o los oscilogramas de corriente.

Se comparan los oscilogramas de tensión correspondientes a la aplicación del primer impulso de onda completa a tensión reducida con el impulso de onda completa a tensión plena; éstas deben ser iguales, tomando en cuenta la diferencia de amplitud de la señal de prueba. Caídas abruptas de la señal a cero indican defecto interno o externo (contorneo de los aisladores pasatapas) que en cualquier caso llevan al rechazo de la unidad bajo prueba. Pero pequeñas variaciones pueden ser debidas a fallos o descargas parciales y no es evidente su discriminación. Las formas de tensión obtenidas de ambas pruebas de onda cortada se comparan entre sí y se comparan con la de impulso completo hasta el punto de corte. La información obtenida de las ondas de impulso cortadas es limitada debido a que el tiempo de corte no se puede ajustar de forma precisa y la respuesta puede cambiar en caso de que dicho tiempo no sea el mismo.

Los oscilogramas de corriente se comparan de forma similar a los de tensión pero teniendo en cuenta que pueden existir oscilaciones en el frente de la onda (primeros 2 μ s) que no necesariamente significan fallos.

Estos criterios son de tipo subjetivo y se basan principalmente en la experiencia del experto que realiza la prueba.

El problema se plantea en cómo utilizar la respuesta en frecuencia como herramienta auxiliar para la interpretación de los resultados obtenidos de la prueba de impulsos y la definición de indicadores cuantitativos para comparar dichas respuestas en frecuencia.

Independientemente de su uso como herramienta comparativa de las pruebas de impulso, la respuesta en frecuencia (FRA Frequency Response Analysis, por sus siglas en inglés) ha adquirido importancia como método de diagnóstico de cambios físicos internos en transformadores. La comparación entre trazas, se realiza típicamente de forma visual, pero diversos autores proponen la utilización de indicadores cuantitativos (coeficiente de correlación, bandas de tolerancia, etc.). Aun así, dichos indicadores no se utilizan para comparar las trazas obtenibles de la prueba de impulso.

Comentario [JSF1]:
¿Conviene introducir alguna referencia?

La investigación consta de dos partes: en la primera, de carácter teórico-práctico se realiza un estudio de algoritmos, simulaciones así como su verificación práctica; en la segunda de carácter aplicado, se implementa un sistema que pueda utilizarse de forma rutinaria cuando se realicen pruebas de impulso.

Los pasos del estudio son:

- Identificación de algoritmos que permitan relacionar la respuesta en frecuencia con la respuesta ante el impulso y su base teórica.
- Aplicar las técnicas utilizadas para la comparación cuantitativa de registros de respuesta en frecuencia, como método de diagnóstico de transformadores, a los registros en el dominio de la frecuencia obtenidos de la prueba de impulso.
- Simular y determinar las mejores soluciones para especificar el sistema de adquisición de datos apropiado para la técnica que se desea aplicar.
- Realizar físicamente el sistema (Hardware y Software) que permita obtener de forma práctica la respuesta en frecuencia de la prueba de impulsos, de manera

Eliminado: propuestas

que el trabajo realizado se aplique cada vez que se realice una prueba de impulsos en el laboratorio.

1.3 Objetivos.

El principal objetivo de este trabajo es: incorporar al Laboratorio de Investigación y ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid la técnica de respuesta en frecuencia, a las utilizadas para interpretar los resultados obtenidos en las pruebas de impulso.

Como objetivos intermedios se plantean los siguientes:

- 1) Estudio de los métodos de obtención de respuesta en frecuencia de un transformador por barrido de frecuencia, montajes experimentales, parámetros de interés (factores que influyen en la medida), métodos de medición (analizadores de impedancias).
- 2) Estudio de los métodos de obtención de la respuesta en frecuencia de un transformador a través de la prueba de impulso (FFT), análisis de la dependencia de la forma de onda.
- 3) Obtención de los parámetros que caracterizan la calidad de la respuesta en frecuencia obtenida por FFT, análisis de coherencia. Parámetros utilizados para comparar mediciones: correlación, bandas de tolerancia.
- 4) Implementación de un sistema de adquisición de datos que permita obtener la respuesta en frecuencia de un transformador con la información obtenida de las pruebas de impulso a través de una rutina tipo FFT y comparar mediciones.
- 5) Verificación experimental del sistema obtenido.

Capítulo 2.

Nuevas propuestas para la interpretación de resultados

2.1 Respuesta en frecuencia

Para mejorar la interpretación de resultados de la prueba de impulso es posible comparar los resultados obtenidos en el dominio de la frecuencia en lugar de hacerlo en el dominio del tiempo [6], [7]. El método se basa en que un sistema lineal e invariante en el tiempo, tiene una respuesta al impulso (delta de Dirac) única que depende exclusivamente de las características físicas de dicho sistema. La transformada de Fourier de dicha respuesta al impulso (delta de Dirac) se conoce como respuesta en frecuencia [8].

Los cambios internos, de carácter geométrico, que podría sufrir el transformador a lo largo de su vida útil, se reflejan como cambios en su respuesta en frecuencia [9]. De manera que, obteniendo la respuesta en frecuencia del transformador de su prueba a tensión reducida y al compararla con su respuesta a tensión plena (NBA) se puede determinar si existe algún cambio en la estructura interna del transformador [6],[7],[10]. También se puede obtener esta información de las pruebas de impulso de onda cortada, información que no es fácilmente comparable en el dominio del tiempo [10].

En general la comparación de los resultados de la prueba de impulso en el dominio de la frecuencia es complementaria a la comparación de las formas de onda obtenidas en el dominio del tiempo, y ayuda a una mejor interpretación de los resultados [6].

La forma de obtener la respuesta en frecuencia del transformador de su prueba de impulso consiste en calcular el cociente entre la transformada de Fourier (FFT)[11] de la tensión aplicada al arrollamiento bajo estudio y la transformada de la intensidad de corriente medida, ecuación (1), referencia [6]. Aparte de la respuesta en frecuencia se puede hallar la función de transferencia entre cualesquiera dos variables del sistema bajo estudio. Por ejemplo se puede hallar la función de transferencia entre la tensión del arrollamiento primario donde se aplica el impulso de tensión y el voltaje del arrollamiento secundario de la misma fase, dependiendo del esquema de conexión utilizado en la prueba.

$$TF1 = \frac{FFT(V1)}{FFT(I1)} \quad (1)$$

En general, en la prueba de impulso se mide la tensión aplicada al arrollamiento bajo estudio y la corriente que circula a tierra, por lo que la función de transferencia de la ecuación (1) suele ser la estudiada. Aun así otras funciones de transferencia pueden ser más sensibles sobre ciertos tipos de falla [12].

2.1.1 Coherencia

Los registros oscilográficos de tensión y corriente deben digitalizarse para poder aplicar las rutinas de FFT. Según el número de bits del digitalizador que se utilice para grabar la medida se obtendrá un nivel de ruido y una relación señal/ruido determinados [6]. Debido a que el contenido energético del impulso es finito, los armónicos disminuyen de energía espectral con el aumento de la frecuencia, lo que sumado al ruido digital introducido por el digitalizador y al ruido electromagnético ambiental limita el ancho de banda útil de la respuesta en frecuencia obtenida. En [13] y [14] se presentan criterios y técnicas de evaluación y simulación de digitalizadores destinados a ser usados en pruebas de impulso.

Aun con un digitalizador especificado según norma [15], siempre existe un nivel de ruido, compuesto por el ruido digital debido al número finito de bits del digitalizador y por el ruido electromagnético ambiental [6]. Por esta razón se introduce el uso de la función de coherencia. Esta permite establecer un límite de frecuencia hasta la cual se puede considerar veraz la respuesta obtenida [16]. La coherencia se calcula como: el cuadrado de la densidad cruzada de potencia espectral de las dos señales que se comparan, dividido por el producto de las densidades de potencia espectral de cada señal [17], según la ecuación (2). En [16] se calcula entre diferentes impulsos como un promedio, pero puede calcularse respecto a un mismo impulso comparando sus STFT.

$$Cf = \frac{(S_{xy})^2}{S_{xx} * S_{yy}} \quad (2)$$

Donde S_{xx} y S_{yy} son las densidades de potencia espectral de cada señal, promediadas según el número de mediciones y S_{xy} es la densidad cruzada de potencia espectral, promediada también para el número de mediciones utilizadas para el cálculo. La coherencia oscila entre los valores 0 y 1. Cuando la coherencia es 1 indica una relación completamente lineal entre las señales estudiadas y cuando tiene valor cero indica que las señales no guardan ninguna linealidad entre sí [17].

Los autores que introducen el uso de la función de coherencia [16] hacen énfasis en que su valor debe ser lo más cercano que sea posible a la unidad y debe descartarse la parte de la traza donde la coherencia sea baja. Otros autores [18], defienden que valores de coherencia bajos, hasta alrededor de 0.4, no implican que la traza obtenida no deba utilizarse en esos puntos, sino que ésta debe ser ponderada según su coherencia.

2.1.2 Interpretación de resultados obtenidos por FRA

Hasta ahora se ha comentado el uso de la respuesta en frecuencia como herramienta en la evaluación de pruebas de impulso de transformadores, pero la respuesta en frecuencia se ha convertido por sí misma en una técnica de diagnóstico de cambios internos en transformadores [19]. Esta respuesta puede obtenerse de diferentes formas, el impulso (FRA-I por sus siglas en inglés, Frequency Response Analysis Impulse)[6], por barrido de frecuencia (FRA-S, Sweep)[9], con una función Chirp [20]. También hay avances encaminados a hacer las mediciones en línea [20],[21],[22]. Las últimas publicaciones buscan la respuesta en frecuencia usando los propios transitorios de la red eléctrica como excitación y aplicando un procedimiento similar al utilizado con las técnicas por impulso [21],[22].

La comparación visual de las trazas de FRA obtenidas en diferentes tiempos de vida del transformador es el método más utilizado para evaluar los resultados obtenidos e identificar posibles problemas en el mismo. Ciertas funciones que permiten resaltar o cuantificar los cambios obtenidos entre dos trazas, la correlación entre dos mediciones, usada originalmente como criterio para redes neuronales[27], la desviación espectral [39] y el uso de bandas de tolerancia[40] son los criterios más difundidos.

2.1.2.1 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación se utiliza para evaluar la diferencia entre dos trazas de FRA, representa cuán relacionadas están dos mediciones entre sí. El coeficiente de correlación entre dos mediciones se calcula según la ecuación (3) [27]. Es una herramienta para cuantificar las diferencias entre dos trazas, de forma numérica y no subjetiva. Se puede calcular para toda la traza de frecuencia obtenida o por décadas [41].

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (3)$$

El coeficiente de correlación varía entre 0 y 1. Cuando su valor es 1, indica una correspondencia perfecta entre las trazas, cuando su valor es 0 indica que no se relacionan entre si. En [42] se compara el coeficiente de correlación con la desviación espectral [39] y se demuestra que el coeficiente de correlación es el que presenta mejores resultados.

2.1.2.2 Desviación espectral

La desviación espectral se utiliza para comparar la diferencia de dos mediciones con su media. Representa la distancia promedio de varias señales a la media entre ellas. Entre dos señales se calcula según la ecuación 4. Es un valor expresado de forma porcentual de manera que mientras más cercano esta a cero indica una mejor relación entre las trazas [39],[42].

$$\sigma = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{x_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2}\right)^2 + \left(\frac{y_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2}\right)^2} \quad (4)$$

2.1.2.3 Bandas de tolerancia

Como ya se ha indicado existen fuentes de error (digitalizador, ruido) en la medición de FRA que conllevan a que dos mediciones consecutivas no presenten trazas idénticas. El uso de bandas de tolerancia [40] es una forma de comparar dos trazas de FRA entre sí, tomando en cuenta la existencia de error en la medición. La metodología es la siguiente: se calcula el nivel de ruido de la medida realizando una medición con todo el sistema montado pero sin señal de entrada. Luego se calculan las bandas superior e inferior para cada punto en función de su relación señal ruido. Al comparar dos trazas, si sus bandas de tolerancia se solapan se puede decir que la diferencia entre ellas es atribuible al ruido

presente en la medición, pero si no se solapan se puede atribuir a un cambio interno del transformador medido.

El cálculo de las bandas aplicado a funciones de transferencia se presenta en detalle en [40]. Este procedimiento será usado con modificaciones para la comparación de trazas de respuesta en frecuencia en el presente proyecto.

2.2 Líneas de trabajo actuales

Existe una amplia literatura sobre cómo evaluar las trazas obtenidas de la respuesta en frecuencia, sea cual sea su metodología de obtención. Todas parten de la misma base, si el mismo transformador cambia considerablemente su respuesta en frecuencia con el paso del tiempo esto indica algún tipo de problema interno [9]. Existen también aportaciones sobre comparación de trazas entre transformadores del mismo tipo constructivo y entre fases del mismo transformador, aplicando consideraciones probabilísticas [23]. La literatura sobre el tema indica que se pueden detectar movimientos y deformaciones de los arrollamientos, defectos entre espiras y problemas en el núcleo [24],[25],[26]. El análisis más básico va orientado a la comparación visual de las trazas obtenidas en diferentes instantes de tiempo de vida del transformador, mientras que las más complejas utilizan redes neuronales [27],[28] y ondículas [29-34].

2.2.1 Redes neuronales y FRA.

La aplicación de redes neuronales al análisis de las trazas de FRA presenta los típicos problemas de la utilización de dicho método [35]. Los resultados dependen del grupo de mediciones utilizadas para entrenar la red y ante cambios significativos en los sistemas estudiados las respuestas de la red no son fiables [35]. Por lo tanto redes entrenadas sobre un solo tipo constructivo de transformador darán excelentes resultados para ese transformador, pero su aplicación a otros transformadores dará resultados poco fiables.

2.2.2 Ondículas e impulsos.

La aplicación de Ondículas (Wavelets) arroja resultados de difícil interpretación y que dependen de una gran cantidad de variables, como por ejemplo de la ondícula madre elegida para hacer la descomposición, ver [29],[30]. Se han realizado avances en la clasificación del tipo de defecto ocurrida durante la prueba de impulso, defectos entre espiras y defectos al núcleo, pero los resultados obtenidos son cualitativos, (ver [31],[32]). Las aplicaciones más sencillas de ondículas a ondas de impulso parecen ser las que dan mejores resultados. Haciendo una descomposición de la corriente de la prueba de impulso se puede observar la aparición de defectos [33],[34]. Aun persiste el problema de la selección de la ondícula madre y del nivel de descomposición que debe utilizarse para obtener resultados repetibles.

2.2.3 Modelado y FRA.

Se han aplicado otras técnicas para estimar, de la respuesta en frecuencia, el tipo de daño ocurrido en el interior del transformador, basadas en modelado de dicha respuesta [24],[26],[36],[37]. En general existen diversos métodos de modelado y se pueden clasificar de la siguiente manera: modelos tipo caja negra, que sólo buscan reproducir la respuesta en frecuencia del sistema, sin mayores consideraciones físicas y se utilizan

usualmente para modelado de respuestas transitorias [38]. Modelos físicos donde se estiman los parámetros eléctricos a partir de la geometría del transformador y se utilizan tanto para modelado de transitorios como para estimación de defectos internos por FRA [37]. En [37] se propone un modelo en el cual se simulan diferentes tipos de falla y su efecto en la respuesta en frecuencia del transformador.

El hecho de que el diagnóstico se realiza por comparación de trazas dificulta la aplicación de la técnica sobre transformadores que no tengan una traza previa de FRA. Para solucionar este problema se aprovecha la simetría existente en los transformadores y se comparan mediciones de fases diferentes del mismo transformador. También es posible comparar trazas de transformadores gemelos en un banco o transformadores del mismo modelo. En [43] y [18] se presentan técnicas estadísticas que permiten llevar a cabo este tipo de comparación. Esta comparación con otros transformadores debe evaluarse con holgura debido a posibles cambios de diseño que pueden existir en transformadores que son aparentemente iguales.

Capítulo 3.

Metodología.

A continuación se presentan las metodologías utilizadas. Se presentan en el orden específico de los objetivos propuestos. Primero, los métodos de obtención de respuesta en frecuencia estudiados. Segundo, modelado de factores que influyen los resultados obtenidos. Tercero, características que debe presentar la plataforma de medición implementada.

3.1 Obtención de la respuesta en frecuencia.

3.1.1 Métodos de barrido.

Se realizaron ensayos de respuesta en frecuencia con analizadores de impedancia. Dichos analizadores inyectan una tensión sinusoidal de frecuencia variable sobre el objeto bajo ensayo y miden la intensidad de corriente resultante. El cociente de dicha tensión y corriente en función de cada frecuencia aplicada, expresada en decibelios, se conoce como la respuesta en frecuencia [9]. Esta metodología se conoce como método de barrido.

Como parte de este estudio se determinaron los montajes experimentales necesarios para llevar a cabo los ensayos con los analizadores de impedancia.

Los ensayos se llevaron a cabo sobre un transformador de medida de tensión de las siguientes características:

Transformador de Tensión Marca RITZ, modelo GSE-24W
Tensión nominal 16.5kV/100V
Potencia 100VA
NBA 125kV

Para la obtención de la respuesta en frecuencia por barrido se emplearon dos analizadores de impedancia.

- Solartron modelo 1260 Impedance Gain-Phase Analyzer.
Margen de frecuencia 10 μ Hz- 32MHz.
- Hewlett Packard modelo HP4194A Impedance Gain-Phase Analyzer.
Margen de frecuencia 10Hz- 100MHz

Los montajes experimentales se observan en las figuras 3.1.1.1 y 3.1.1.2 respectivamente. El transformador de potencial puede verse en la fotografía mostrada en la figura 3.1.1.3

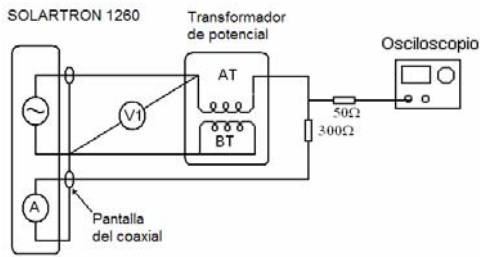


Figura 3.1.1.1 Esquema de medición Solartron 1260

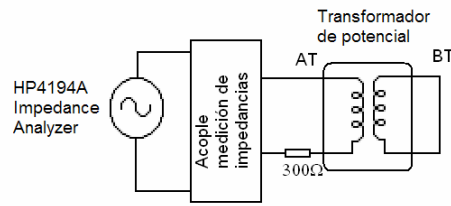


Figura 3.1.1.2 Esquema de medición HP4194A



Figura 3.1.1.3 Transformador de potencial ensayado.

3.1.2 Prueba de impulso.

La transformada de Fourier de la respuesta al impulso unitario (delta de Dirac) de un sistema se conoce como respuesta en frecuencia [8]. Esta puede calcularse como el cociente entre la transformada de Fourier de la función de excitación y la transformada de Fourier de la función de salida [8]. Éste procedimiento es utilizado para calcular la respuesta en frecuencia de la aplicación de un impulso. En el caso de estudio la excitación corresponde con el impulso normalizado de tensión tipo rayo de onda completa, según normativa internacional [4]. Esta onda corresponde con una onda doble exponencial con un tiempo de cresta de $1.2 \mu s$ y un tiempo de cola de $50 \mu s$. Se observa en la figura 3.1.2.1, tomado de [4]. La salida del sistema corresponde con la corriente al neutro medida durante la aplicación del impulso de tensión.

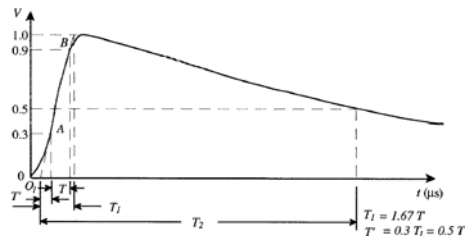


Figura 3.1.2.1 Forma de onda impulso normalizado.



Figura 3.1.2.2 Generador de impulsos LINEALT.

La respuesta en frecuencia obtenida de esta forma solo puede contener información sobre las frecuencias presentes en la función de excitación. Por lo tanto al tener el impulso normalizado un contenido en frecuencias limitado la función de transferencia obtenida tendrá un ancho de banda limitado.

El ensayo de impulso normalizado sobre los transformadores se realizó utilizando el generador de impulsos del laboratorio de alta tensión de la Universidad Carlos III de Madrid (LINEALT). Su fotografía se muestra en la figura 3.1.2.2. Las características de dicho generador son las siguientes:

Generador de impulsos de tensión modular marca HighVolt
Tensión máxima de salida 140kV. 0.9kJ

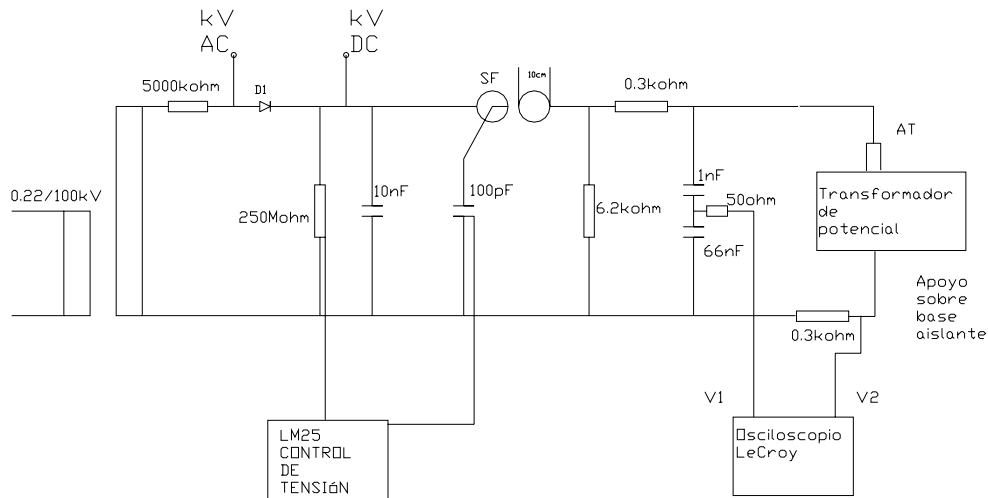


Figura 3.1.2.3 Diagrama del generador de impulsos LINEALT.

El esquema de medición utilizado se observa en la figura 3.1.1.3. V_1 corresponde con la tensión medida a través de un divisor de tensión, V_2 con la corriente medida a través de

una resistencia a tierra de $300\ \Omega$. Para evitar la reflexión de onda se acopla el sistema a través de una impedancia serie de $50\ \Omega$. El esquema básico del generador de impulsos del laboratorio (LINEALT) con los valores de sus componentes se muestra en la figura 3.1.2.4.

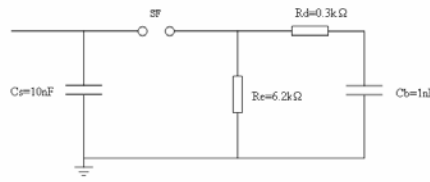


Figura 3.1.2.4 Esquema básico generador de impulsos.

La medición de las tensiones V_1 y V_2 se realiza con un osciloscopio marca LeCroy WP950, 500MHz 4 canales 16GS/s, 8Bits.

3.2 Modelado

3.2.1 Dependencia de la forma de onda.

Se obtiene la dependencia de la respuesta en frecuencia obtenida de los valores de tiempo de frente y tiempo de cola de la onda de impulso aplicada. Este análisis es llevado a cabo debido a las tolerancias existentes en la normativa respecto a los tiempos característicos de la onda normalizada. En el tiempo de frente de la onda se tolera un $\pm 30\%$ de diferencia respecto a $1.2\ \mu\text{s}$, mientras que en el tiempo de cola la tolerancia es de un $\pm 20\%$ respecto a $50\ \mu\text{s}$ [4].

Cambiar el tiempo de frente o cola del impulso aplicado requiere modificar las resistencias del circuito generador. El conjunto de resistencias con los valores necesarios para realizar el análisis de sensibilidad no se encuentran disponibles. Por lo tanto el análisis de sensibilidad se ha realizado sobre un modelo. Se ha modelado el generador de impulsos (figura 3.1.1.2) con sus valores nominales reales, la medición de tensión, la medición de corriente y el transformador de potencial (figura 3.1.1.3).

El modelo puede ser observado en la figura 3.2.1.1. El modelo del generador incluye sus resistencias, condensadores y disparo. El modelo del medidor de tensión incluye el ruido electromagnético, digitalizador y puesta a tierra. El modelo de la medición de corriente incluye el ruido electromagnético y digitalizador. El transformador es modelado como una red de impedancias.

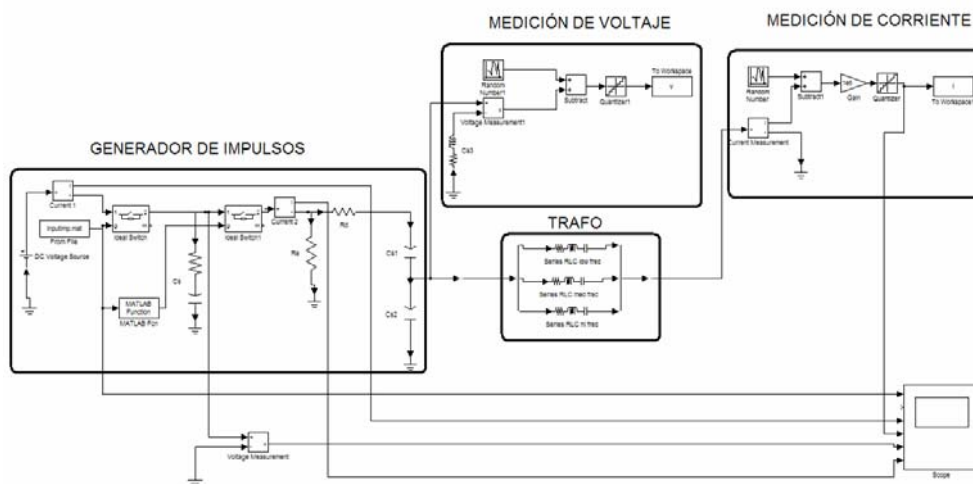


Figura 3.2.3.1 Modelo del sistema

Los digitalizadores de medición son modelados como cuantificadores ideales con resolución de 8bits y frecuencia de muestreo de 50MHz. Una ganancia adicional es introducida en el modelo de medición de corriente.

El ruido electromagnético es modelado como un número aleatorio de distribución Gaussiana con varianza $1e-7$, esto corresponde a un ruido con valor medio menor al Bit menos significativo del digitalizador. Esto permite ver el efecto del error de cuantificación.

3.2.2 Digitalizador.

En [13] y [14] se presentan criterios y técnicas de evaluación y simulación de digitalizadores a ser usados en pruebas de impulso. Se recomienda el uso de un digitalizador de al menos 10Bits de resolución y una frecuencia de muestreo mayor a 30MHz. En [44] se compara la respuesta en frecuencia obtenida de una prueba de impulso realizando las mediciones con un digitalizador de 10Bits-100MHz con la obtenida usando un osciloscopio de 8Bits-2.5GHz.

Se simula la influencia del número de Bits del digitalizador utilizado para las mediciones de tensión e intensidad con el fin de verificar las limitaciones de los osciloscopios disponibles.

Para la implementación final del sistema se dispone de un osciloscopio Tektronix TDS3032, cuyas características son: 8 Bits de resolución, tasa máxima de muestreo de 2.5GHz, memoria limitada a 10000 muestras por canal.

3.3 Plataforma de medición

La plataforma de medición desarrollada se compone de dos partes. Primero, la parte física con la cual se mide la tensión de impulso e intensidad de corriente de neutro, y segundo, el sistema de análisis por computadora de las mediciones obtenidas.

Se han estudiado las características que deben tener los medidores de tensión e intensidad de corriente en cuanto a resolución y frecuencia de muestreo. Se han realizado simulaciones en el modelo de la figura 3.2.3.1 cambiando las características de frecuencia de muestreo y resolución de los medidores, identificando el impacto que dichos cambios tienen en el ancho de banda y coherencia de la respuesta en frecuencia obtenida.

Una vez identificadas las características que debe poseer la parte física de la plataforma de medición se ha elaborado un programa de cálculo que permita realizar los ensayos y análisis de las señales medidas de forma sencilla.

El sistema computacional se compone de dos módulos, ambos escritos en el lenguaje de programación MATLAB. Una interfaz entre el ordenador y el osciloscopio a través del puerto serie, permite la utilización del sistema de forma sencilla.

El programa llamado “IMP ANALYSIS” realiza las siguientes funciones:

- Cálculo de la respuesta en frecuencia del sistema a partir de las trazas de tensión e intensidad medidas.
- Cálculo de la diferencia entre trazas de tensión e intensidad de ensayos consecutivos.
- Cálculo de la diferencia entre respuestas en frecuencia previamente obtenidas por métodos de barrido o con trazas calculadas de mediciones de impulsos consecutivos.
- Aplicación de filtros previamente definidos a las trazas de tensión e intensidad.
- Diseño y aplicación de ventanas exponenciales a las trazas de tensión e intensidad.
- Reducción de la tasa de muestreo de las trazas obtenidas.
- Cálculo de la correlación entre un conjunto de mediciones por década de frecuencia.
- Cálculo de la coherencia propia de una medición y coherencia entre un conjunto de mediciones.
- Cálculo de las bandas de tolerancia de una medición en función de su relación señal ruido.

Se realiza una comprobación experimental de la plataforma de medición desarrollada como parte del presente proyecto.

Capítulo 4

Resultados.

4.1 Obtención de respuesta en frecuencia por métodos de barrido

Para transformadores de tensión la prueba de impulso debe realizarse sobre los terminales de alta [1]. Se obtiene la función de transferencia por métodos de barrido sobre los terminales de alta tensión para poder comparar las trazas obtenidas con aquéllas que se obtendrán de la prueba de impulso.

Se observa en la figura 4.1.1 la traza de respuesta en frecuencia obtenida con el analizador de impedancias HP4194A. En la figura 4.1.2 la obtenida con el Solartron 1260. Se observa que ambas presentan un comportamiento similar.

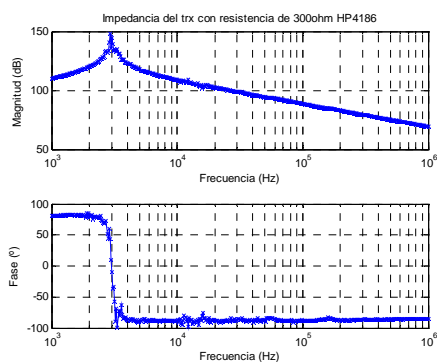


Figura 4.1.1 RF obtenida con HP4194A

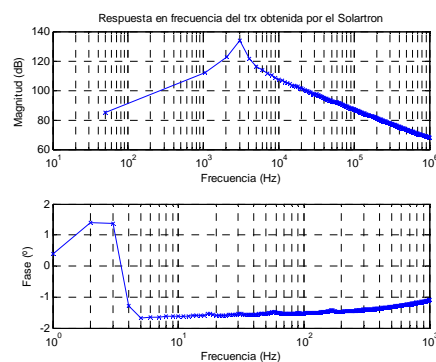


Figura 4.1.2 RF obtenida con Solartron

4.2 Obtención de respuesta en frecuencia por impulso

Se aplicó un impulso de tensión sobre el arrollamiento de alta tensión del transformador de potencial. En la figura 4.2.1 se observa como al forma de onda de la tensión corresponde con un impulso normalizado $1.2\mu\text{s}$ - $50\mu\text{s}$. La corriente de neutro se muestra en la figura 4.2.2

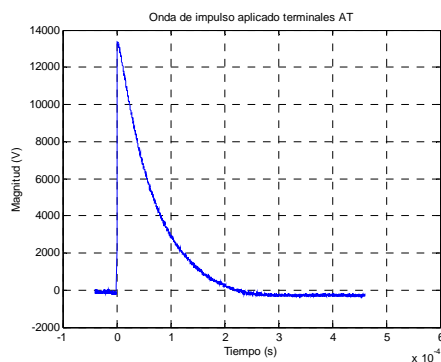


Figura 4.2.1 Tensión de impulso aplicada

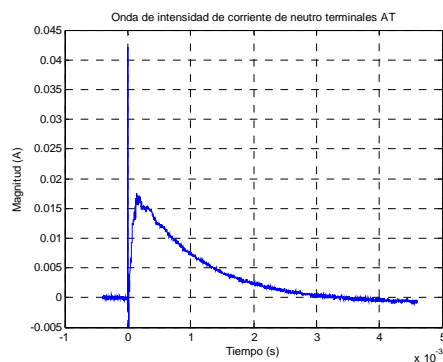


Figura 4.2.2 Intensidad de corriente de neutro

A partir de las mediciones de impulso se obtiene la respuesta en frecuencia del transformador por la metodología ya explicada, que se muestra en la figura 4.2.3. El ruido presente en la traza obtenida es debido a diferentes motivos.

- 1) El ruido electromagnético presente en el ambiente que se superpone a las señales medidas. Se observa en las trazas de tensión e intensidad, figuras 4.2.1 y 4.2.2 respectivamente.
- 2) Contenido en frecuencias limitado del impulso aplicado.
- 3) Cuantificación de los digitalizadores del osciloscopio.
- 4) Ruido de redondeo digital en los cálculos del ordenador.

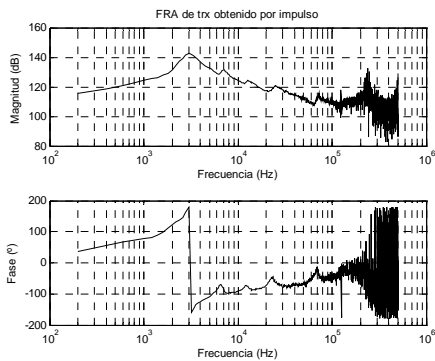


Figura 4.2.3 RF obtenida de la aplicación impulso.

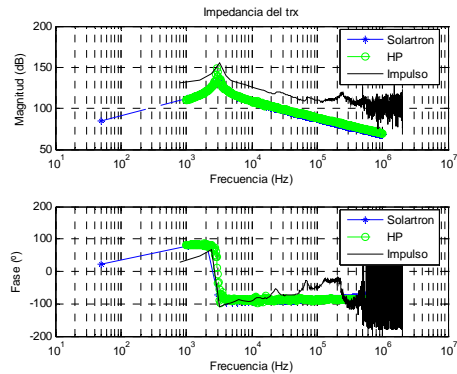


Figura 4.2.4 Comparación de RF.

En la figura 4.2.4 la comparación entre la función de transferencia obtenida por barrido de frecuencia y la obtenida de los impulsos. Se observa cómo el comportamiento de las funciones es similar, lo cual valida los montajes de medida.

Se realiza también la prueba de impulso sobre el arrollamiento de baja tensión. Se lleva a cabo con el lado de alta tensión en circuito abierto y con el lado de alta tensión en cortocircuito. Se observan las trazas de respuesta en frecuencia calculadas a partir de los impulsos aplicados en la figura 4.2.5. En la figura 4.2.6 se observa la función de transferencia obtenida por barrido. Al comparar las figuras 4.2.5 y 4.2.6 se observa cómo el ruido enmascara toda la información presente.

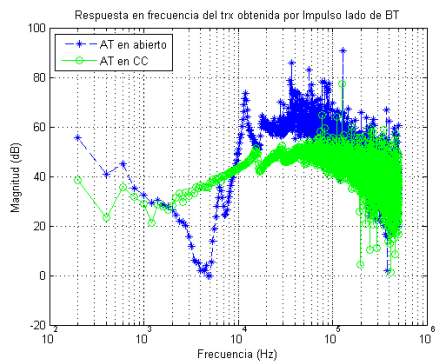


Figura 4.2.5RF Comparativa impulso

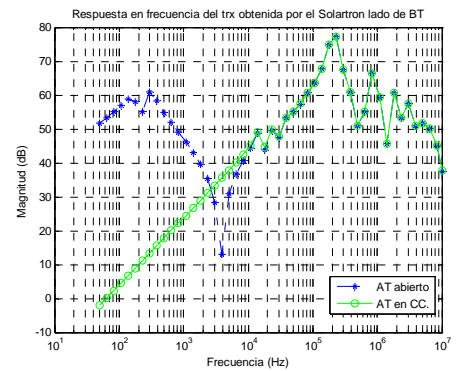


Figura 4.2.6 RF Comparativa Solartron

4.3 Modelado

4.3.1 Influencia de la forma de onda.

Las pruebas estandarizadas de impulso permiten una tolerancia al tiempo de frente y tiempo de cola de la onda aplicada (ver figura 3.1.2.1). Se permite un $\pm 30\%$ en el tiempo de frente y $\pm 20\%$ en el tiempo de cola [4]. Por lo tanto se realiza un análisis de sensibilidad ante dichas variación para verificar si éstas originan diferencias importantes en las trazas de frecuencia obtenidas. Se han realizado simulaciones utilizando el mismo esquema de la figura 3.2.3.1, cambiando los valores de las resistencias del circuito generador de impulsos para obtener los diferentes tipos de onda.

En la figura 4.3.1.1 se muestra el cambio en el frente de la onda de tensión, y en la figura 4.3.1.2 las respuestas en frecuencia obtenidas para cada caso. Se observa cómo la distorsión generada en la respuesta en frecuencia obtenida es mínima, en comparación con el ruido observado en los ensayos reales. Las simulaciones no incluyen los digitalizadores o ruido electromagnético para poder observar las diferencias entre trazas.

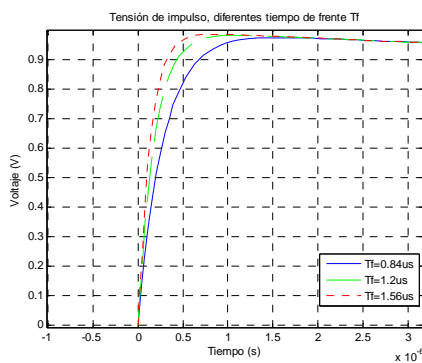


Figura 4.3.1.1 Impulsos de tensión tiempo de frente

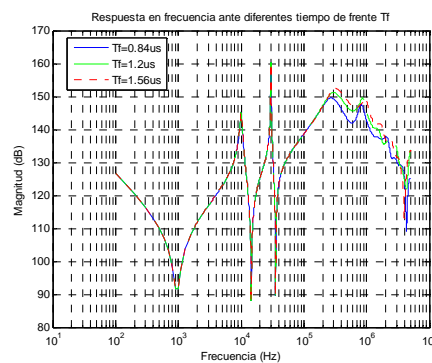


Figura 4.3.1.2 RF comparativa T_f

En la figura 4.3.1.3 se observan los cambios en los tiempos de cola de la onda de tensión y en la figura 4.3.1.4 las trazas de respuestas en frecuencia. La influencia del cambio en el tiempo de cola es mínima. Esto era de esperar, ya que el sistema debe ser independiente de la forma de la excitación. Aun así para aplicaciones online donde la forma de onda puede variar considerablemente se han observado diferencias significativas en las respuestas en frecuencia obtenidas [40].

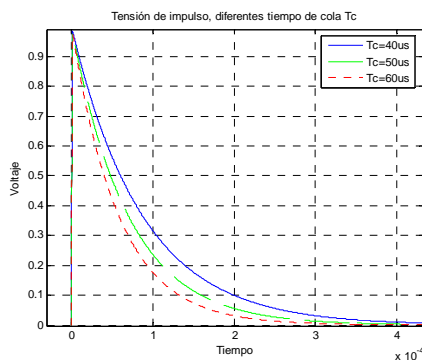


Figura 4.3.1.3 Impulsos de tensión tiempo de cola

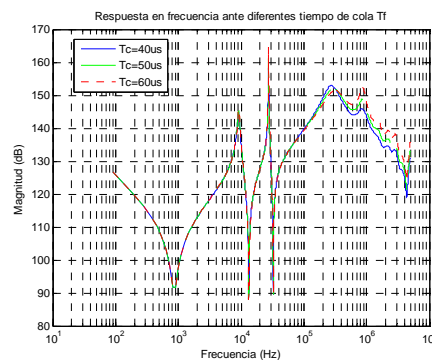


Figura 4.3.1.4 RF comparativa T_c

4.3.2 Digitalizador.

Los resultados obtenidos de simular digitalizadores de resolución diferente, se observan en la figura 4.3.2.1 para una resolución de 8 bits y en la figura 4.3.2.2 para una resolución de 10 bits. Se observa una disminución del ruido en las altas frecuencias al utilizar el digitalizador con 10 bits de resolución.

La frecuencia de muestreo utilizada corresponde a la máxima permitida por el osciloscopio disponible. Los impulsos de tensión e intensidad deben registrarse completos, lo cual limita la máxima tasa de muestreo efectiva del osciloscopio ya que éste dispone de memoria hasta 10000 muestras. Para un transformador de potencia típico se deben obtener las trazas hasta 200us. Esto limita la frecuencia de muestreo a 50MHz.

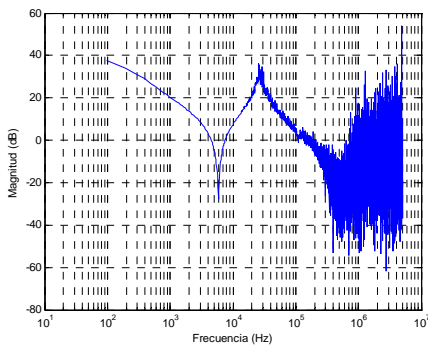


Figura 4.3.2.1 RF resolución 8Bits

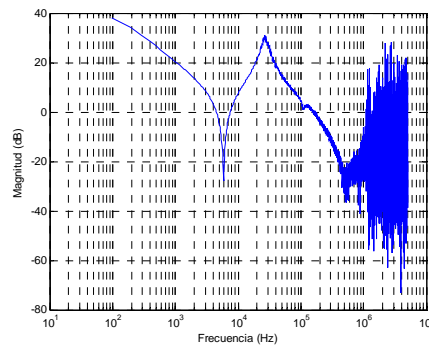


Figura 4.3.2.2 RF resolución 10Bits

4.4 Plataforma de medición.

Las simulaciones realizadas analizando el efecto del cambio de resolución y frecuencia de muestreo de los digitalizadores muestran que debe usarse el digitalizador de mayor número de Bits y frecuencia disponible. Sin embargo debido al alto costo económico de los digitalizadores se utilizará un osciloscopio, sabiendo las limitaciones que presentaran las trazas de respuesta en frecuencia obtenidas.

El sistema de verificación experimental se compone de:

- Inyector de impulsos repetitivos Haefely Type 48.
- Monitor de corriente para medición de transitorios fabricado por Ion Physics modelo CM-100H. Relación 1V/A.
- Osciloscopio Tektronix TDS3032 para la adquisición de las ondas de tensión y corriente, de 8Bits, 10000 muestras y 2.5GS/s.
- Computador personal para utilización del programa de análisis.

El sistema se puede ver en la fotografía de la figura 4.4.1



Figura 4.4.1 Sistema de prueba

El programa de ordenador para el análisis de mediciones se detalla en el anexo A.

Capítulo 5

Verificación experimental

La plataforma de medición especificada en el apartado 4.4 ha sido verificada de forma experimental. Dicha verificación se lleva a cabo en el laboratorio A de la Universidad Simón Bolívar en Caracas, Venezuela.

5.1 Respuesta en frecuencia obtenida de la prueba de impulso

Utilizando la plataforma desarrollada se ha aplicado un conjunto de impulsos normalizados de tensión, sobre un transformador, con las siguientes características:

Transformador de distribución Marca SVT
Tensión nominal 15kV/220V
Conexión Dy1
Potencia 500kVA.
NBA 125kV

Una fotografía del transformador se muestra en la figura 5.1.1



Figura 5.1.1 Transformador de distribución

La tensión aplicada es de valor reducido y tiene un valor pico de 200V. Las trazas de tensión e intensidad de neutro obtenidas por el programa de análisis se muestran en las figuras 5.1.2 y 5.1.3 respectivamente. Los valores se presentan en por unidad del valor máximo medido. Se observa que la tensión de impulso aplicada posee la forma requerida por la norma [4]. Los resultados son presentados en colores invertidos debido a que el programa representa la curva sobre fondo negro.

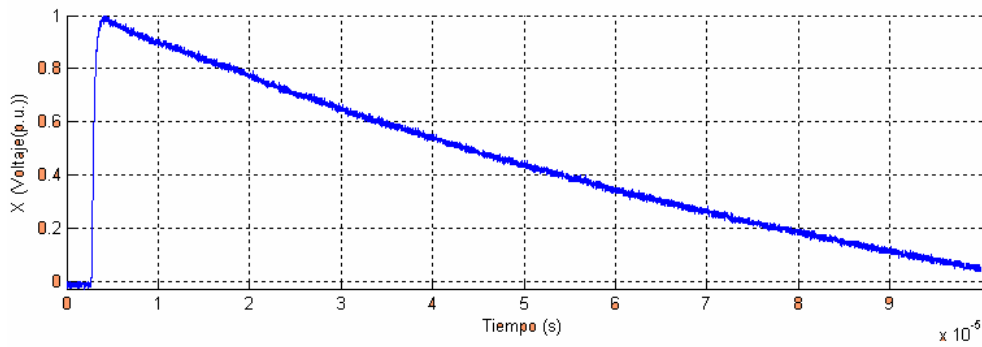


Figura 5.1.2 Tensión de impulso

En la figura 5.1.3 la intensidad de corriente, presenta el comportamiento típico [2] de un transitorio de corta duración y alta frecuencia que es seguido de oscilaciones de media frecuencia que disminuyen de frecuencia progresivamente hasta extinguirse. Resultado diferente al de la figura 4.2.2 debido a las diferencias constructivas entre ambos tipos de transformadores.

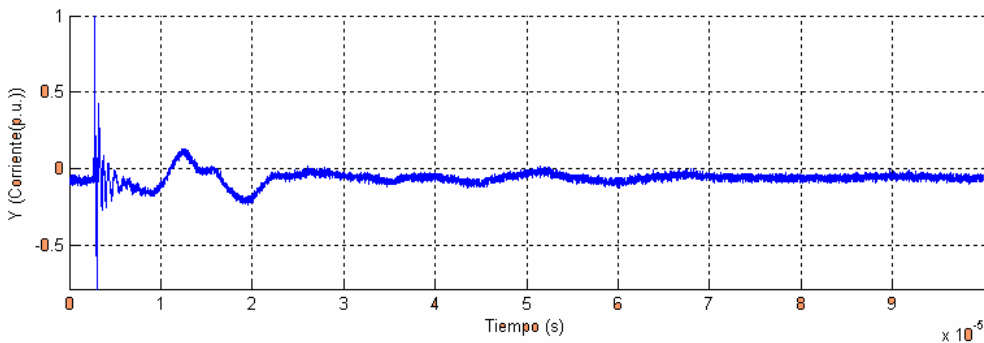


Figura 5.1.3 Intensidad de corriente de neutro

La respuesta en frecuencia obtenida a partir de las mediciones de tensión e intensidad de neutro mostradas en las figura 5.1.2 y 5.1.3 se presenta en la figura 5.1.4. Se observa cómo la traza de la respuesta en frecuencia (vista en la figura 4.4.1.4) presenta ruido a partir de los 400kHz, pero presenta un comportamiento no aleatorio en su forma. La respuesta calculada contiene información hasta los 2MHz pero dicha información se enmascarada con ruido.

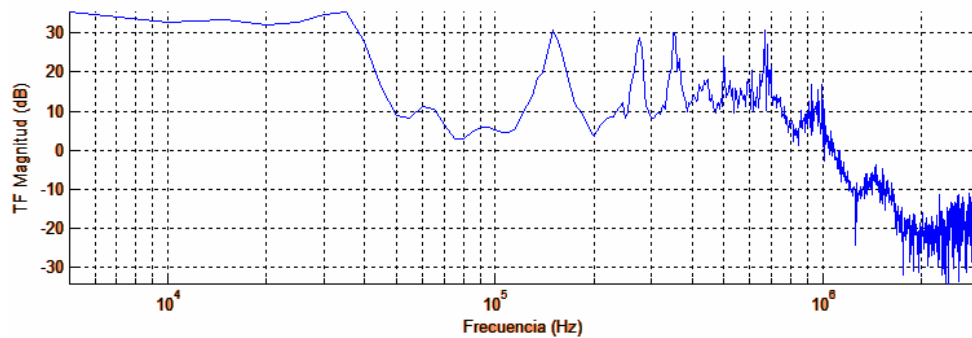


Figura 5.1.4 Respuesta en frecuencia obtenida

La alta tasa de muestreo necesaria para la obtención de una resolución adecuada del impulso [13] y el tamaño finito de los registros de memoria de los dispositivos digitalizadores, limita el número de puntos que se pueden obtener de la prueba. Esto origina que la cola de la onda sea truncada aunque no haya descendido hasta un valor cero (figura 5.1.2). La aplicación de la transformada de Fourier FFT a estos impulsos cortados origina un efecto tipo borde (leakage) similar al originado al muestrear a una tasa no adecuada (aliasing)[11]. Por este motivo se utilizan ventanas para limitar este efecto [11]. Debido a la naturaleza no periódica del impulso suelen usarse ventanas especiales tipo exponencial [40] u otros algoritmos que producen un efecto similar [44].

La respuesta en frecuencia obtenida aplicando una ventana exponencial a la tensión e intensidad se presenta en la figura 5.1.5. Es un resultado significativo que la respuesta en frecuencia obtenida sea limpia hasta frecuencias de 2MHz, un valor considerado apropiado [40].

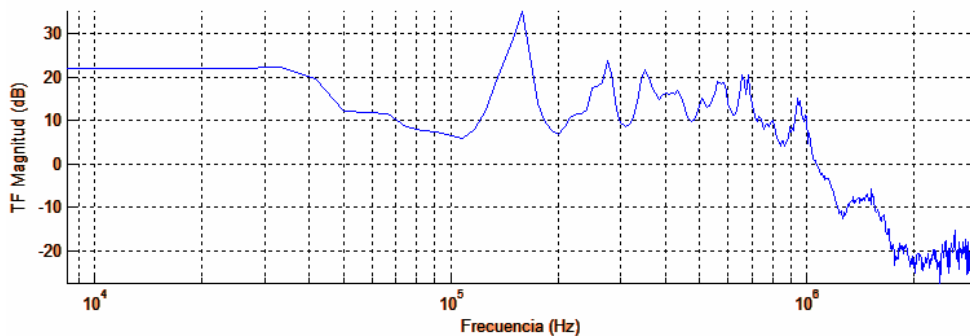


Figura 5.1.5. Respuesta en frecuencia luego de aplicar ventana exponencial

5.2 Coherencia.

El cálculo de coherencia para el sistema utilizado, se muestra en la figura 5.2.1. Los valores obtenidos son satisfactorios hasta aproximadamente 1.5MHz. Son indicativos de un buen apantallado electromagnético del circuito [18]. La digitalización se realizó con resolución de 8Bits y frecuencia de muestreo de 100MHz.

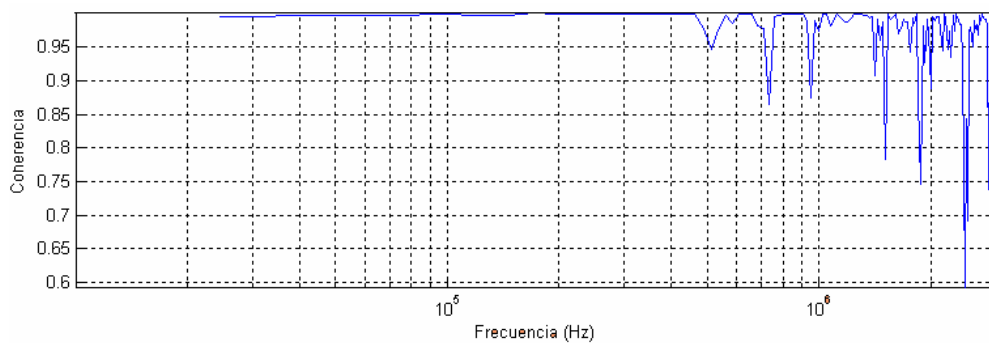


Figura 5.2.1 Coherencia

5.3 Coeficiente de correlación.

Los coeficientes de correlación calculados entre dos trazas de respuesta en frecuencia, obtenidas a partir las mediciones tomadas de dos impulsos consecutivos, se muestran en la tabla 5.3.1. Se calcula la correlación por década de frecuencia ya que de esta forma son más representativos los coeficientes obtenidos [42]. Un solo coeficiente para toda la traza aporta poco sobre el margen de frecuencias afectado. Los valores de correlación no son iguales a la unidad debido al ruido presente en las mediciones, que se refleja en las respuestas en frecuencia calculadas.

Frecuencia inicial	Frecuencia final	Correlación
1,00E+04	1,00E+05	0.9963
1,00E+05	1,00E+06	0.9961
1,00E+06	3,00E+06	0.9985

Tabla 5.3.1 Coeficiente de correlación

5.4 Bandas de tolerancia.

El cálculo de bandas de tolerancia presentado en [40] se ha aplicado sobre funciones de transferencia adaptando la metodología para poder aplicarla a las respuestas en frecuencia obtenidas.

En la figura 5.4.1 se observan las respuestas en frecuencia calculadas a partir de dos mediciones consecutivas, representadas con sus bandas de tolerancia. Al solaparse las bandas se concluye que no ha ocurrido ningún cambio interno en el transformador debido a la aplicación de los impulsos de tensión. A frecuencias superiores a 1Mhz se observa cómo no se solapan del todo las trazas. La coherencia (figura 5.2.1) indica que la información en ese rango de frecuencias es poco fiable, en cuyo caso se debe ser cauto antes de emitir una conclusión sobre posibles fallos en el transformador.

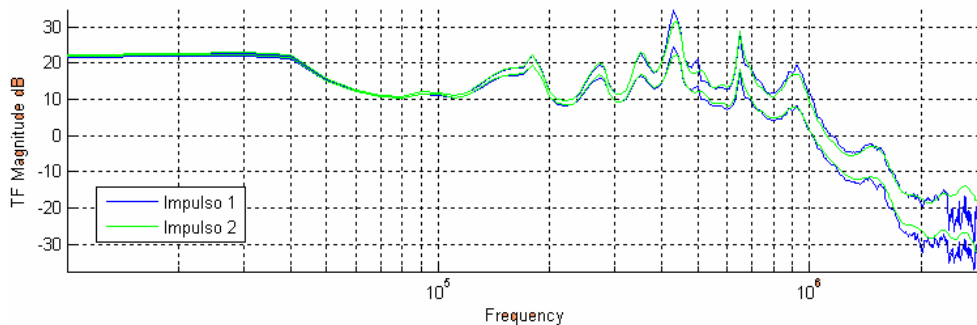


Figura 5.4.1 Bandas de tolerancia

Capítulo 6

6.1 Futuras propuestas

La plataforma de medición desarrollada permite, medir y analizar resultados de una prueba de impulsos a través de la obtención de la respuesta en frecuencia del transformador bajo ensayo. Los resultados obtenidos son satisfactorios al compararlos con los publicados en revistas y congresos de alto impacto. Aún así queda un conjunto de estudios que se recomienda llevar a cabo.

Realizar un análisis de la sensibilidad del sistema desarrollado antes fallos internos que puedan ocurrir en el transformador durante la prueba de impulso. Esto validaría el sistema como herramienta de uso rutinario para el diagnóstico de transformadores bajo ensayo.

Extender la plataforma desarrollada a la aplicación online. Es la tendencia de estudio actual en el campo de FRA, donde se utilizan los transitorios electromagnéticos presentes en la red eléctrica como impulsos de prueba, para obtener la respuesta en frecuencia de transformadores en servicio. Aportando con dicha traza información sobre posibles fallos mecánicos en la estructura interna del transformador que comprometerían su integridad física ante un cortocircuito externo.

Aplicar la plataforma al análisis de respuesta transitoria de otros tipos de sistemas. El autor del presente trabajo ha participado en trabajos de investigación que la plataforma desarrollada permitiría ampliar y profundizar. Por ejemplo investigaciones sobre respuesta transitoria de puestas a tierra para cálculo de tasa de salida ante el impacto de descargas atmosféricas [46] o el diagnóstico de descargadores de sobretensión de carburo de silicio a través de su respuesta en frecuencia [45].

6.2 Conclusiones.

En el presente trabajo se ha partido de la prueba de impulso o choque, que tiene como objetivo caracterizar el aislamiento de transformadores ante sobretensiones tipo impulso. Se han identificado problemas y aportado mejoras en la interpretación de los resultados obtenidos de dicha prueba.

Se ha desarrollado y aplicado de forma satisfactoria una plataforma que permite analizar los resultados, de pruebas de impulso a transformadores, a través del cálculo de la respuesta en frecuencia obtenida de las mediciones estándar del ensayo.

Se han realizado mediciones con diferentes sistemas de adquisición de datos y con dos sistemas de inyección de impulso diferentes. Se han realizado mediciones sobre transformadores con características constructivas diferentes probando el sistema desarrollado.

Las trazas de respuesta en frecuencia obtenidas se han analizado con las técnicas de diagnóstico y comparación utilizadas en ensayos de FRA, permitiendo obtener información cuantitativa de los resultados obtenidos de la prueba de impulso con la intención de evitar comparaciones cualitativas que lleven a discrepancias de interpretación.

Se ha cuantificado la calidad de la respuesta en frecuencia obtenida en función de la coherencia existente entre mediciones, identificando de esta forma posibles frecuencias que se encuentren especialmente influenciadas por el ruido, permitiendo descartarlas a la hora de realizar el diagnóstico de la prueba.

Se ha obtenido la correlación entre trazas de respuesta en frecuencia de ensayos consecutivos. Lo que permite cuantificar diferencias entre ensayos e identificar posibles desperfectos ocurridos durante la aplicación de la prueba.

Se han obtenido bandas de tolerancia sobre las trazas de respuesta en frecuencia, para incluir la presencia de ruido en las mediciones como una incertidumbre sobre el resultado final de la prueba, evitando de esta forma diagnósticos erróneos.

Las aportaciones realizadas se han integrado en una plataforma de medición, que permite su utilización de forma rutinaria durante las pruebas de impulso. De esta forma los beneficios del estudio realizado se aprovecharán continuamente.

La plataforma desarrollada tiene la flexibilidad necesaria para poder ser aplicada al estudio de fenómenos transitorios de otros sistemas.

Bibliografía.

- [1] IEEE Std. C57.12.00-2000 Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.
- [2] IEEE Std. C57.138-1998. Recommended Practice for Routine Impulse Test for Distribution Transformers.
- [3] IEEE Std. C57.12.90.1999 IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.
- [4] IEEE Std 4-1995. Standard Techniques for High-Voltage Testing.
- [5] ANSI/IEEE Std C57.98-1993. Guide for Transformer Impulse Test.
- [6] R. Malewski, B. Poulin. “*Impulse testing of power transformers Using the Transfer Function Method*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, N° 2, Abril de 1988.
- [7] C.G.A. Koreman, “*Improvements in transformer testing through the use of the transfer function*”, 5th ISH, Braunschweig, 1987.
- [8] A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, I.T. Young “*Signals and Systems*” Prentice-Hall International 1983. pp 212-214.
- [9] E.P. Dick, C.C. Erven. “*Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis*”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 1, N° 6, pp 2144-2153, Noviembre/Diciembre de 1978.
- [10] Hanique, E. “*A Transfer Function is a reliable Tool for Comparison of Full- and Chopped Lightning Impulse Tests*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994.
- [11] R.W. Ramirez, “*The FFT Fundamentals and Concepts*” Prentice-Hall 1985.
- [12] G.G. Karady M. Reta-Hernandez F. Amarth G. McCulla. “*Improved Technique for Fault Detection Sensitivity in Transformer Impulse Test*” 0-7803-6420-1/00/\$10.00 (c) 2000 IEEE.
- [13] I.R. McComb, J. Kuffel, R. Malewski, K. Shon. “*Qualifying An Impulse Test Digitizer for Measurement in HV Impulse Test*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, N° 3, pp 1256-1265, July 1990.
- [14] J. Kuffel, R. Malewski, R. V. Heeswijk. “*Modelling of the Dynamic Performance of Transient Recorders Used for High Voltage Impulse Tests*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, N° 2, pp 507-515, April 1991.
- [15] IEEE Std 1122-1998. IEEE Standard for Digital Recorders for Measurements in High-Voltage Impulse Tests.

- [16] R. Malewski: A. Claudi. Ch. Joseply: St. Jud: “*Checking electromagnetic compatibility of a HV impulse measuring circuit with coherence Functions*”: ERA Technology Conference H.V. Measurements and Calibration; Arnhem. 1994.
- [17] Stoica, P., and R. Moses. “*Introduction to Spectral Analysis.*” Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1997. Pgs. 61-64.
- [18] Larry Coffeen, Jeffrey Britton, Johannes Rickman. “*A new technique to detect winding displacements in power transformers using frequency response analysis*”, IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Bologna, Italy. 2003.
- [19] Norma aún no publicada al 1 septiembre del 2005. IEEE PC57.149, "Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers,"
- [20] S. Birlasekaran, Fred Fetherston. “*Off/On-Line FRA Condition Monitoring Technique for Power Transformers*”. IEEE Power Engineering Review, pp 54-56, Agosto de 1999.
- [21] T. Leibfried K. Fesser. “*Online Monitoring of Transformers by Means of the Transfer Function Method*”. CNF. Intenational Symposium on Electrical Insulation Pittsburgh P.A. USA June 5-8 1994.
- [22] T. Leibfried K. Fesser. “*Offline-Online Monitoring of Power Transformers Using Transfer Function Methods*”. CNF. Intenational Symposium on Electrical Insulation Montreal Quebec Canada June 16-19 1996.
- [23] J. Christian, K. Feser. “*Procedures for detecting winding displacement in power transformers by the transfer function method.*” IEEE transctions on power delivery Vol 19. No1. January 2004.
- [24] J.A.S.B. Jayasinghe, Z.D. Wang, P.N. Jarman, A.W. Darwin. “*Investigations on Sensitivity of FRA Technique in Diagnosis of Transformer Winding Deformations*”. IEEE, ISEI Indianapolis USA, 19-22 September 2004.
- [25] S.A. Ryder. “*Transformer diagnosis Using Frequency Rersponce Analysis: Results from Faults Simulations*”. 0-7803-7519-X/02/\$17.00 © 2002 IEEE.
- [26] S. M. Islam, “*Detection of Shorted Turns and Winding Movements on Large Power Transformers using Frequency Response Analysis*” 0-7803-5935-6/00/\$10.00 (c) 2000 IEEE.
- [27] Xu, D.K.; Fu, C.Z.; Li, Y.M.; “*Application of artificial neural network to the detection of the transformer winding deformation*”. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 1999. (Conf. Publ. No. 467) , Volume: 5 , 23-27 Aug. 1999. Page(s): 220 -223 vol.5
- [28] A. De, N. Chatterjee, “*A Fuzzy ARTMAP Fault Classifier for Impulse Testing of Power Transformers*” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 11, No. 6; December 2004.

- [29] L.Satish, “*Short-time Fourier and wavelet transforms for fault detection in power transformers during impulse tests*”, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol1 145, No 2, March 1998.
- [30] S. K. Pandey, L Satish, “*Multiresolution Signal Decomposition: A New Tool For Fault Detection In Power Transformers During Impulse Tests*”. IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 13, N° 4, October 1998.
- [31] P. Purkait, S. Chakravorti, “*Wavelet Transform-Based Impulse Fault Pattern Recognition in Distribution Transformers*” , IEEE Trans. on Power Delivery, VOL. 18, N°. 4, October 2003.
- [32] P. Purkait, S. Chakravorti, “*Pattern Classification of Impulse Faults in Transformers by Wavelet Analysis*” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 9, No. 4; August 2002.
- [33] S. N. Fernando, M. R. Raghuvver, W. Ziomek, “*Detection of temporary faults during impulse tests using wavelets*”. 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [34] Fu. Chenzhao, Liu Jian, Li Yanming, Liu Jie, Wang Guogang. “*Application of Soft-threshold De-noising Method in the Diagnosis of Transformer during Impulse Test*” P-4 16.
- [35] R.O. Duda, P.E. Hart, D.G. Stork, “*Pattern Classification Second Edition*”, J. Wiley & Sons. Inc. 2001. p 282.
- [36] J. Pleite, E. Olías, A. Barrado, A. Lazáro J. Vázquez. “*Transformer Modeling for FRA Techniques.*” Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES , Volume: 1 , 6-10 Oct. 2002. Page(s): 317 -321 vol.1
- [37] E. Rahimpour, J. Christian, K. Feser, H. Mohseni. “*Transfer Function Method to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Windings.*” IEEE Trans on Power Delivery Vol. 18, N°. 2, April 2003.
- [38] P.T.M. Vaessen, n.V. Kema. “*Transformer Model for High Frequencies*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, N° 4, pp 1761-1768, Octubre de 1988.
- [39] J. Bak-Jensen, B. Bak-Jensen, S.D. Mikkelsen. “*Detection of Faults and Ageing phenomena in Transformers by Transfer Functions*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, N° 1,pp 308-314, January 1995.
- [40] T. Liebfried, K. Feser. “*Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method.*” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N° 4, pp 1333-1341, October 1999.
- [41] S.A. Ryder. “*Experimental investigations of the repeatability of FRA Measurements.*” 2002 International Conference of Doble Clients Papers.

[42] S. A. Ryder. “*Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements.*” Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7- 10,2002.

[43] J. Christian and K. Feser, “Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method.”, IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 19, N° 1, January 2004.

[44] J. Hällström, M-L. Pykälä, “*Evaluation of Power Transformer Transfer Function from Impulse Test Records*” Nordic Insulation Symposium, Tampere, June 11-13, 2003.

[45] E. Da Silva, J. Ramírez, M. Martínez, J. Rodríguez, S. Dávila, B. Valecillos, “*Caracterización de la Corriente de Fuga en el Diagnostico de Descargadores de Sobretensiones de Carburo de Silicio*”, ALTAE 05, Panamá, Panamá, Julio 26-30, 2005.

[46] Ramírez J., Davila S. Valecillos B. Martínez M. Rodríguez J.C. Da silva E. Velazco J. “*Models of Grounding Systems under Lightning Discharges. Simple Electrode Configurations*” ICLP, Proceedings Volume I, Avignon, France September 13-16 2004

[47] M. Steurer, W. Hribernik, J. H. Brunke, “*Calculating the Transient Recovery Voltage Associated With Clearing Transformer Determined Faults by Means of Frequency Response Analysis*”, IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 19, N° 1, January 2004.

[48] T. O. Bialek, “*Evaluation and Modelling of High Voltage Cable Insulation Using a High Voltage Impulse*” PhD Dissertation, Mississippi State University, February 2005.

Bibliografía anexa

Se presenta bibliografía consultada que no se ha colocado como referencia directa.

T.R. McComb, F.A. Chagas, K. Feser B.I. Gururaj R.C. Hughes, G Rizzi. “*Comparative Measurement of HV Impulses to Evaluate Different sets of Response Parameters*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, N° 1, pp 70-77, January 1991.

P.T.M. Vaessen, E. Hanique. “*A New Frequency Response Analysis Method for Power Transformers*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, pp 384-391, Enero de 1992.

J. Bak-Jensen, B. Bak-Jensen S.D. Mikkelsen, C.G. Jensen. “*Parametric identification in potential Transformer Modelling*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, pp 70-76, Enero de 1992.

C.S. Burrus, R. A. Gopinath, H. Guo. *“Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms”* Prentice-Hall 1998.

ANEXO A

El programa “IMP-ANALYSIS” ha sido escrito con la finalidad de comparar trazas de respuesta en frecuencia obtenidas de mediciones realizadas durante la prueba de impulso. Se presentan sus funciones tomando como caso de ejemplo dos impulsos consecutivos aplicados al transformador visto en la figura 5.1.1. La plataforma y esquema de medición corresponden con los especificados en la sección 4.4 se observan en la figura 4.4.1 y figura 4.4.2 respectivamente.

El programa presenta una ventana principal, figura A.1, en ella se observa las trazas previamente cargadas a través de un navegador interactivo de archivos (figura A2). Para ofrecer un mejor contraste visual el programa dibuja las gráficas sobre fondo negro, y por tanto las imágenes mostradas son en colores invertidos.

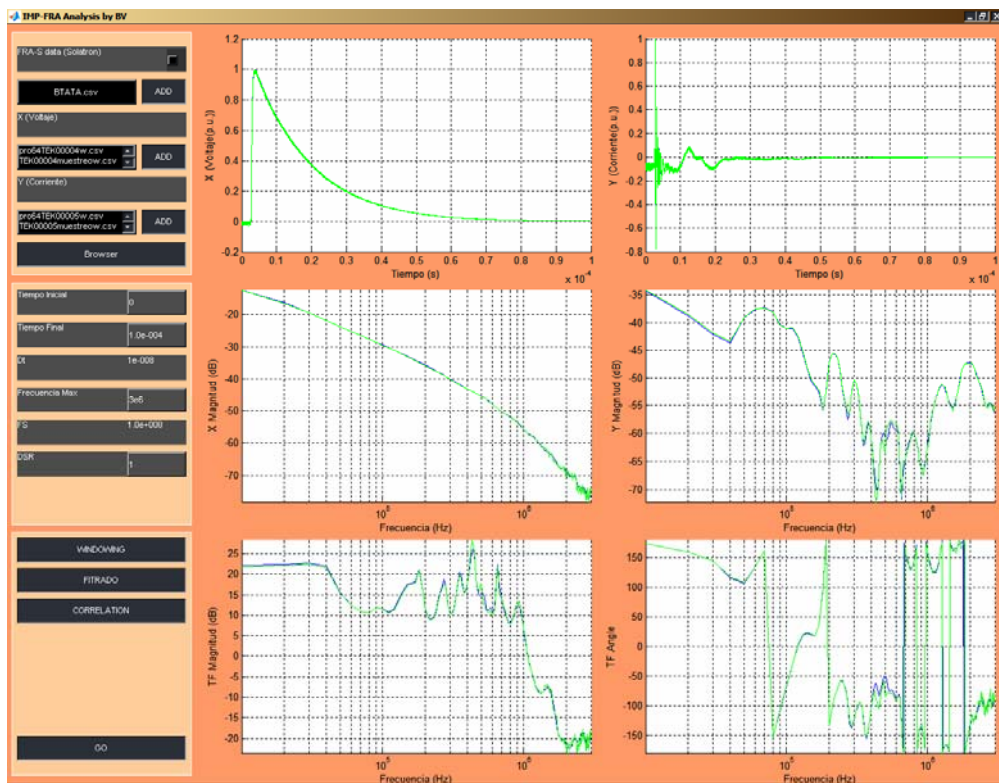


Figura A1.

En el programa se observa en la esquina superior izquierda las trazas de los impulsos de tensión aplicados, y a su izquierda las intensidades medidas. En el centro izquierda la traza de contenido de frecuencia de la tensión medida, y a su lado la traza correspondiente de intensidad. En la parte inferior izquierda la magnitud en decibelios de la respuesta en frecuencia obtenida y a su derecha el ángulo en grados.

Sobre cualquiera de las seis graficas con el botón secundario del ratón se accede a un área de comparación detallada, correspondiente a la grafica en la cual se ha pinchado.

Se observa en la figura A3 la ventana de comparación de trazas de la magnitud de la respuesta en frecuencia. Se muestra la diferencia entre las trazas.

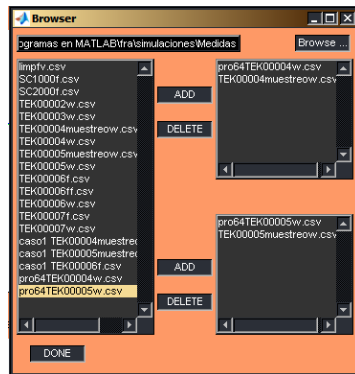


Figura A2.



Figura A3

Se puede observar en dicha ventana (área de comparación de detalles) la coherencia entre mediciones. Se observa en la figura A4 con su pantalla de selección de opciones. Se puede hallar la coherencia entre varias mediciones o la coherencia de una sola medición a través de su STFT.



Figura A4

Las respuestas en frecuencias con sus respectivas bandas de tolerancia, y ventana de selección de opciones para el cálculo de dichas bandas se observan en la figura A5.

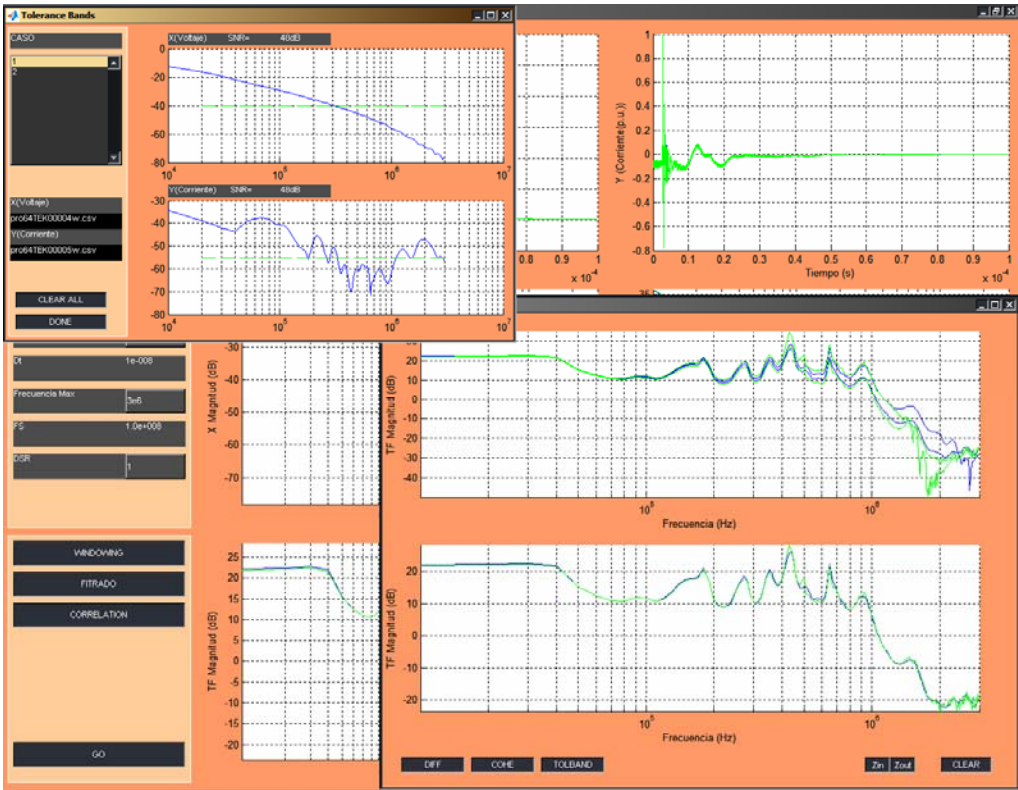


Figura A5.

En la figura A6 se observa la ventana para el cálculo de la correlación entre trazas de respuesta en frecuencia. Esta puede realizarse sólo entre dos trazas.

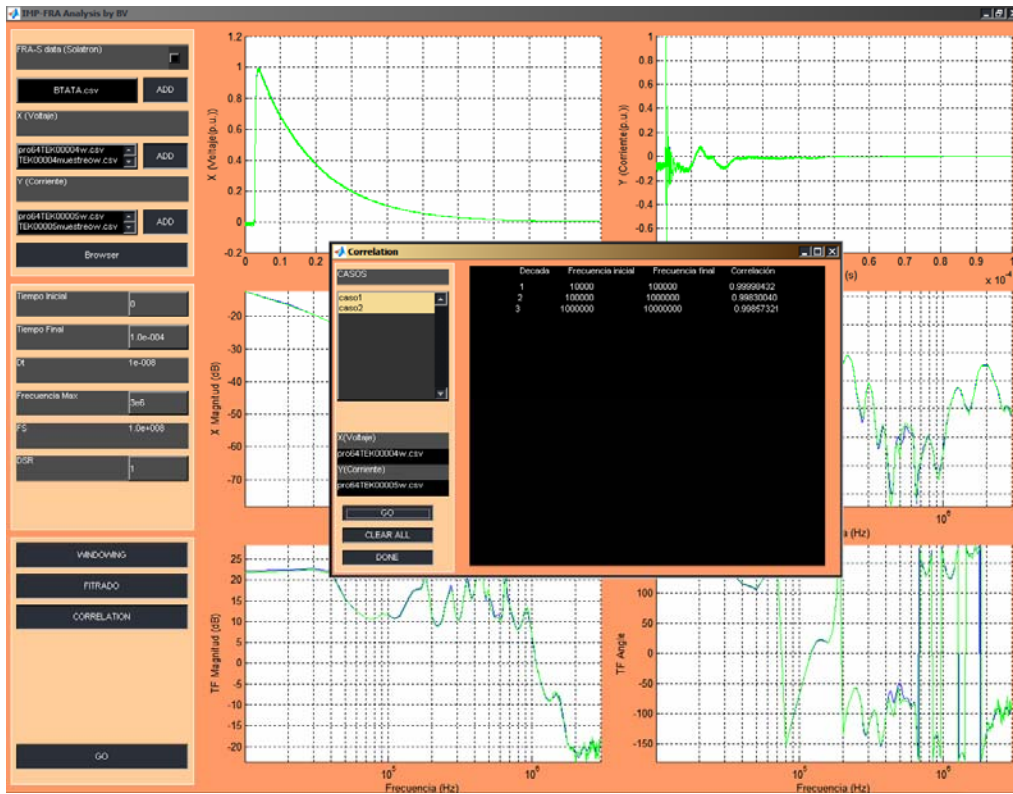


Figura A6.

En la figura A7 se muestra la pantalla de aplicación de ventanas exponenciales para evitar el efecto de borde en el cálculo de FFT.

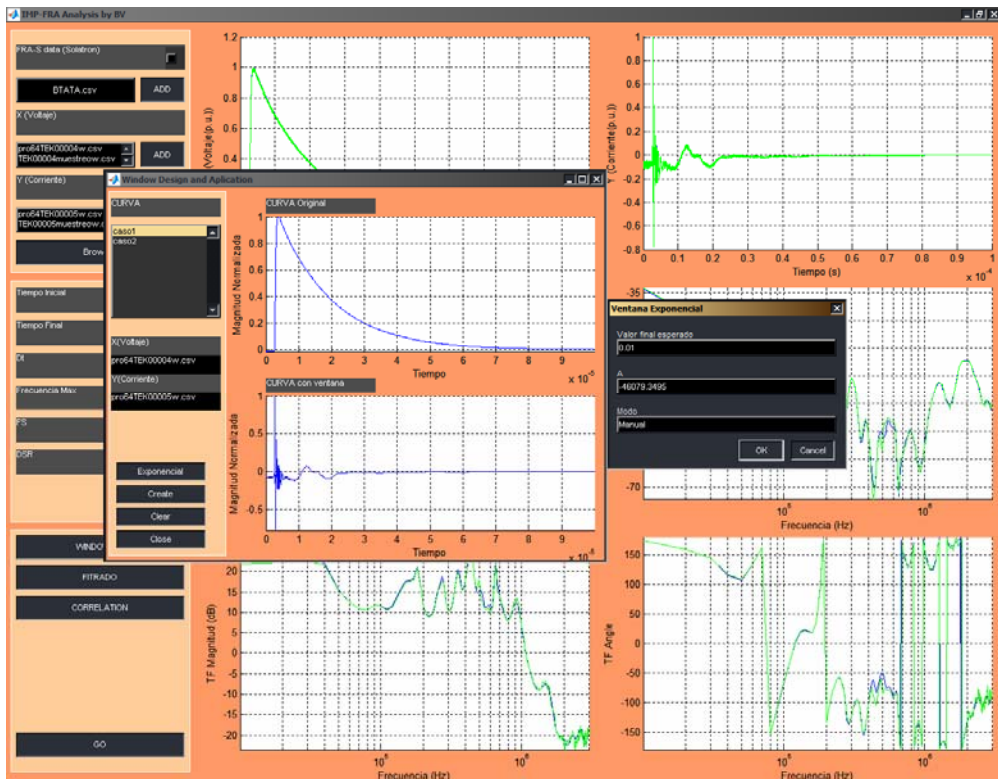


Figura A7.

En la figura A8, se muestra la ventana para la aplicación de filtros predefinidos. Se eligen los archivos que contengan el numerador y denominador del filtro digital y se aplican a la onda de tensión o corriente seleccionada. Se pueden aplicar también filtro average móvil o Savisky-Golay de forma directa.

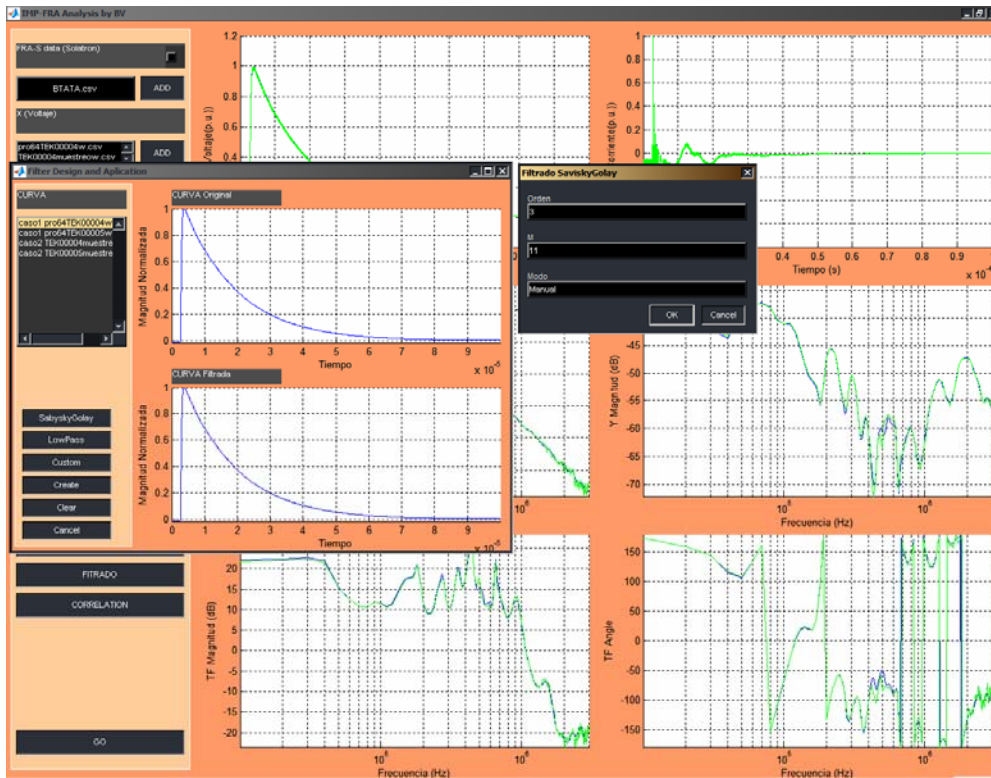


Figura A8.

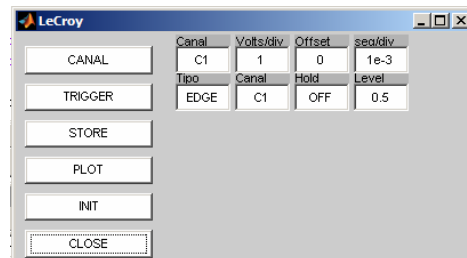


Figura A9.

Para permitir un manejo más ágil de las mediciones realizadas se ha implementado una interfaz entre el ordenador personal y el osciloscopio a través de un puerto RS232. En la figura A9 se observa la ventana que permite manejar dicha interfaz.