



VII/CE-A2-01

Diagnóstico de Transformadores de Potencia a Través del Análisis de la Respuesta en Frecuencia (FRA)

Armando Luis Ortiz Torres +, Jacqueline G. Rolim*

Itaipu Binacional +, (UFSC) Universidade Federal de Santa Catarina*

Hernandarias – Paraguay +, Florianópolis – Brasil*

RESUMEN

Debido a la importancia de transformadores de potencia en los sistemas eléctricos de potencia, la salida de operación no planificada de estos equipos a consecuencia de fallas ocasiona grandes perjuicios a las empresas del sector eléctrico. En este sentido, diversas técnicas de monitoreo y detección de fallas incipientes en transformadores de potencia están siendo estudiadas e implementadas en los últimos años con la finalidad de evitar la ocurrencia de fallas o minimizar sus efectos. En este contexto, es presentado el Análisis de la Respuesta en Frecuencia (FRA) como una metodología de diagnóstico del estado de los devanados de transformadores de potencia, y gradualmente está siendo aplicado en este campo por los buenos resultados obtenidos con las investigaciones realizadas. No obstante, todavía no existe una normatización específica ni con relación a la metodología para la realización del ensayo de la respuesta en frecuencia, ni con relación a la interpretación de los resultados obtenidos con tal ensayo, interpretación que generalmente es realizada de forma visual y requiere especialistas entrenados para ello. Una descripción de la técnica de diagnóstico es presentada inicialmente, describiendo las dos metodologías más utilizadas para la realización del ensayo de respuesta en frecuencia y la correlación entre fallas y parámetros de los transformadores de potencia. Fueron obtenidos datos de ensayos de FRA que describen simulaciones de diferentes grados de deformación radial del devanado de un transformador estudiado. Los datos se refieren a mediciones de tensión y corriente en función de la frecuencia en una faja entre 10Hz y 2MHz con el objetivo de determinar el módulo de la función de transferencia del transformador, específicamente la admitancia del bobinado para los diferentes niveles de deformación mecánica simulados. Como forma de cuantificar las diferencias entre las mediciones obtenidas con la técnica y dar mayor soporte al diagnóstico visual previo realizado de las funciones de transferencias obtenidas, fueron utilizados dos indicadores numéricos estadísticos, el Coeficiente de Correlación (CC) y la Suma Absoluta del Error Logarítmico (ASLE), y una Red Neuronal Artificial (ANN) tipo GRNN (General Regression Neural Network).

PALABRAS CLAVES

Análisis de la Respuesta en Frecuencia (FRA), Transformadores de Potencia, Herramientas de Diagnóstico.

1 INTRODUCCION

El comportamiento de un sistema lineal, estable, invariante en el tiempo, de una entrada y una salida (SISO) puede ser descrito por su respuesta al impulso, o por su función de transferencia (FT), por eso el FRA también es conocido como Método de la Función de Transferencia. La FT es una cantidad compleja y puede ser representada por la magnitud y por el ángulo de fase, teniendo la frecuencia como parámetro. En el diagnóstico de transformadores de potencia con el FRA, generalmente es evaluada la magnitud de la FT. Según [1] el gráfico del ángulo de fase de la función de transferencia normalmente no contiene informaciones útiles para tal análisis.

El ensayo de respuesta en frecuencia consiste en la medición de la impedancia, admitancia y/o magnitudes de tensión en devanados de transformadores sobre una gran faja de frecuencias, generalmente comprendida entre 10 Hz e 3 MHz. Las mediciones realizadas en transformadores en buenas condiciones operativas, desde que sean precisas, proveen un diagrama de respuesta en frecuencia de referencia o también denominado en el medio técnico *impresión digital del transformador* (diagrama que depende de las características físicas del transformador, y por lo tanto única para cada equipo). Con la *impresión digital* son comparadas las mediciones de FRA realizadas después de la ocurrencia de eventos que puedan haber dañado un devanado, y de esta manera, diagnosticar el estado del equipo. Si las *impresiones digitales* no se encuentran disponibles, la comparación entre fases es posible en transformadores trifásicos, desde que solamente una de las tres fases esté dañada. También la comparación entre transformadores con las mismas características constructivas es posible, un ejemplo de la utilización de la técnica para esta situación es en el caso de investigar daños en bancos de transformadores monofásicos.

Los diagramas de FRA pueden ser divididos en tres grandes fajas de frecuencia para el análisis: bajas frecuencias con una faja típica entre 10 Hz y 50 kHz, medias frecuencias con una faja entre 50 kHz y 1 MHz y altas frecuencias comprendida entre 1 MHz y 3 MHz. La división en estas fajas de frecuencia fue propuesta por [2] y fue elegida de forma empírica teniendo en cuenta los polos y ceros típicos de la magnitud de la respuesta en frecuencia de transformadores de potencia.

2 CARACTERISTICAS DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA EN DEVANADOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

La característica típica y principal de la respuesta en bajas frecuencias para devanados de transformadores de potencia presenta una disminución de la amplitud de la FT alcanzando un valor mínimo resonante generalmente por debajo de 1 kHz con un posterior aumento de la amplitud, siendo esta resonancia causada por la interacción de la capacitancia *shunt* del devanado con la inductancia magnetizante. El estado de la magnetización residual del núcleo puede influenciar las mediciones del FRA en esta faja de frecuencias. En el FRA en las frecuencias medianas hay un grupo de resonancias correspondientes a la interacción entre la capacitancia *shunt* y la inductancia del núcleo de aire de los devanados. Estas resonancias son generalmente las más repetibles en los ensayos de FRA. En la región de las altas frecuencias se observa en las mediciones un grupo difuso de frecuencias resonantes correspondientes a la interacción de capacitancias serie y *shunts* con la inductancia del núcleo de aire de parte del devanado. En las altas frecuencias la influencia de los cables de medición se vuelve importante, principalmente en grandes transformadores (potencia superior a 200 MVA) [1].

3 CORRELACION ENTRE DEFECTOS Y PARAMETROS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Un modelo de devanado propuesto por [3] puede utilizarse para entender mejor a los principales parámetros que componen los devanados de transformadores de potencia. La figura 1 ilustra el modelo propuesto con los componentes del circuito de medición incluidos.

Las capacitancias paralelas por unidad de longitud ($C_{g/l}$) representan principalmente a los acoplamientos electrostáticos de los devanados entre sí, y acoplamientos adyacentes entre devanado y "tierra" (cuba o núcleo). Estas capacitancias son supuestamente distribuidas uniformemente a lo largo del devanado de interés. Las capacitancias serie (C_s) son encontradas en el interior de cada devanado, entre espiras, discos y bobinas individuales. Las inductancias propias y mutuas (L) del devanado son formadas por inductancias parciales entre conductores (espiras), inductancias entre bobinas, inductancias entre devanados e inductancias entre devanado y el tanque [4]. (C_b) representa la capacitancia del aislador pasante, (V) y (R) representan la señal de excitación y las resistencias de entrada y salida del equipo de medición respectivamente.

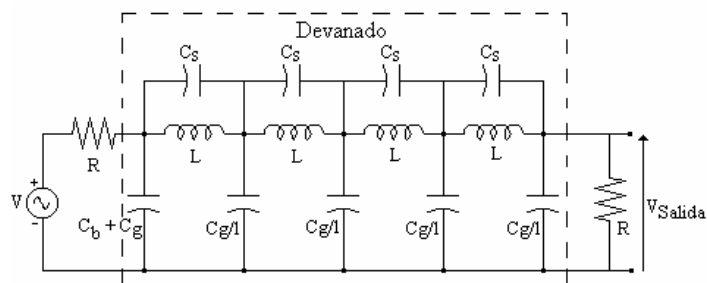


Figura 1 : Modelo equivalente de un devanado para el FRA con el sistema de medición.

Podemos asociar que defectos en un devanado pueden ser de origen eléctrico o mecánico, con la modificación de parámetros del devanado. En la tabla I son mostrados los principales parámetros que son modificados debido a algún defecto de naturaleza eléctrico y mecánico [1], [3], [4].

Tabla I : Variación de parámetros del transformador en función del defecto

Defecto	Principal Parámetro Variante
Circulación de Corriente en Lazo Cerrado	Inductancia
Puesta a Tierra Múltiple	Inductancia
Espiras en Corto Circuito	Inductancia
Corto Circuito entre Devanado y la Cuba	Inductancia
Corto Circuito entre Devanados	Inductancia
Hundimiento Local	Inductancia
Movimiento de Discos	Capacitancia Shunt
Encurvamiento	Capacitancia Shunt
Ingreso de Humedad	Capacitancia Shunt
Espiras Flojas	Capacitancia Serie
Envejecimiento del Aislamiento Sólido	Capacitancia Serie

4 METODOLOGIAS PARA OBTENER LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

Las mediciones en el FRA pueden ser obtenidas en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. Cada una de las metodologías presentan algunas ventajas con relación a procedimientos

de medición, procesamiento de señales, etc. Del punto de vista matemático las metodologías son equivalentes y una puede ser obtenida de la otra a través de la Transformada de Fourier. Los dos métodos más utilizados para realizar el FRA son: El Método de la Respuesta al Impulso (IRM) en el dominio del tiempo, y el Método de la Respuesta de Barredura en Frecuencias (SFRA) en el dominio de la frecuencia.

Dependiendo de la señal de salida que es medida, la función de transferencia calculada puede representar la relación de tensión entre devanados o la impedancia / admitancia de un devanado en función de la frecuencia.

4.1 Medición en el Dominio del Tiempo

El método de la Respuesta al Impulso (IRM) consiste en inyectar un impulso de baja tensión en un terminal del devanado del transformador a ser analizado. Esta señal de entrada y la señal de salida son medidas, filtradas y realizado un muestreo en el dominio del tiempo. Posteriormente, las señales son transformadas al dominio de la frecuencia aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT), y la función de transferencia es calculada dividiéndose la señal de salida por la señal de entrada [5], [6]. La amplitud de la señal de impulso aplicado es típicamente de 100 a 2000 Volts con un tiempo de ascenso entre 100 y 500 ns y duración entre 40 y 200 μs [7]. La figura 2(a) ilustra la topología para la realización del IRM y la figura 2(b) muestra el principio de cálculo de la función de transferencia.

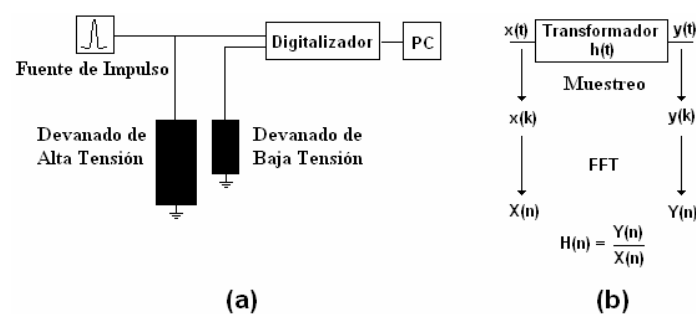


Figura 2 : (a) Configuración para la medición con el IRM (b) Principio de cálculo de la función de transferencia.

4.2 Medición en el Dominio de la Frecuencia

La técnica de medición en el dominio de la frecuencia es denominada SFRA – Método de la Respuesta de Barredura en Frecuencias (Swept Frequency Response Analysis) y fue desarrollado por [8], como una herramienta de diagnóstico de transformadores de potencia. Esta técnica consiste en aplicar una señal de excitación senoidal de frecuencia variable, de baja tensión y con amplitud constante en el devanado del transformador en estudio, también midiéndose la señal de salida del devanado para así calcular la función de transferencia.

Es muy común el uso de un analizador de red para el cálculo de la función de transferencia representando la impedancia / admitancia en función de la frecuencia de un devanado. Este equipo aplica una señal de tensión senoidal en un terminal del devanado del transformador, mientras que la corriente de salida es medida indirectamente a través de la tensión en la impedancia de entrada del analizador que es normalmente de 50 Ω. La frecuencia es variada en una faja de interés y la función de transferencia del devanado es calculada y presentada gráficamente en la forma de impedancia /

admitancia (modulo y ángulo). La figura 3 ilustra el diagrama esquemático para la medición de la impedancia / admitancia de un devanado con el SFRA con un analizador de red [9].

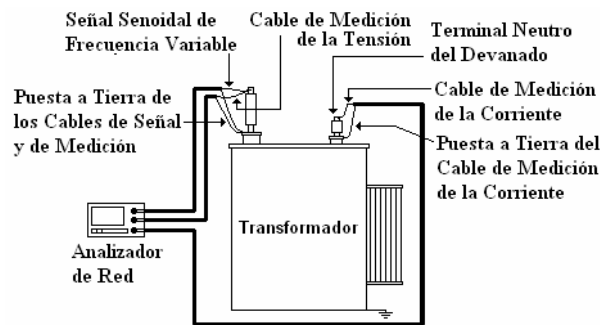


Figura 3 : Configuración esquemática de la medición con la SFRA

5 HERRAMIENTAS DE AUXILIO AL DIAGNOSTICO CON EL FRA

Dos indicadores numéricos y una Red Neuronal Artificial (ANN) tipo GRNN serán evaluados como herramientas de análisis de mediciones de FRA. Los indicadores numéricos son el Coeficiente de Correlación (CC) y la Suma Absoluta del Error Logarítmico (ASLE). A continuación serán descritos tales indicadores y la ANN y realizados comentarios sobre el desempeño de cada uno en cuantificar diferencias entre mediciones obtenidas con el ensayo de respuesta en frecuencia.

5.1 Indicadores Numéricos Estadísticos

5.1.1 Coeficiente de Correlación

El CC, como su nombre muestra, indica la correlación entre dos valores o curvas, aproximándose de 0 si los valores de muestras no se correlacionan, y aproximándose de 1 si los valores son similares. El coeficiente de correlación es descrito por la ecuación 1.

$$\delta_{cc}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i^2}} \quad (1)$$

La ecuación 1 es normalizada por el denominador. Sobre una condición en que $y_i = cx_i$ en la región $i_l \leq i \leq i_h$ donde c es una constante, δ_{cc} es igual a 1 [2].

Esta propiedad de este indicador numérico puede llevar a tomar decisiones equivocadas. Por ejemplo, asumiendo que $c = 1000$, o sea, $y_i = 1000x_i$ para todo i en una dada región, a pesar de una gran discrepancia entre x_i e y_i , la correlación dada por CC es igual a 1, fallando en la detección de la anomalía. Por tanto, CC es un indicador numérico considerado inadecuado para la comparación de la respuesta en frecuencia que incluyan mediciones con padrones similares en forma de onda pero diferentes en magnitud [2].

5.1.2 Suma Absoluta del Error Logarítmico (ASLE)

El indicador numérico descrito por la ecuación 2 fue propuesto por [2] como herramienta para indicar relación entre mediciones de FRA, los autores afirman que entre todos los criterios de comparación analizados el ASLE es el más indicado. El motivo es que generalmente las mediciones de FRA son presentadas en escala logarítmica para la comparación visual de los resultados, por lo tanto, lo que es visto en el gráfico en escala logarítmica es calculado por el ASLE.

$$\delta_{ASLE}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N |20 \log_{10} y_i - 20 \log_{10} x_i|}{N} \quad (2)$$

5.2 Red Neuronal Artificial tipo GRNN

La red tipo GRNN (General Regression Neural Network) es una variación de la red de base radial (RBF) que es una red que presenta gran capacidad de generalización y es utilizada principalmente para la aproximación de funciones. La red GRNN es una red directa, que a partir de un vector de entrada \vec{x} calcula un vector de salida \vec{y} . Su arquitectura puede ser vista en la figura 4 [10].

Las unidades de entrada tienen como función distribuir las variables x a todas las neuronas que componen la camada padrón (unidades padrones), en donde \vec{x} es el vector que contiene a todas las variables de entrada y p corresponde al número de variables de entrada.

Cada neurona perteneciente a la camada padrón corresponde a un ejemplar (o un centro de agrupamiento). El número de neuronas que componen esta camada corresponde al número de ejemplares utilizados en el aprendizaje. Después del aprendizaje, cuando un nuevo vector es presentado a la red, es calculada la distancia entre este y los ejemplares previamente definidos y almacenados. Es utilizada la distancia euclidiana para la realización de estos cálculos. El valor cuadrático o absoluto de estas diferencias es sumado y multiplicado por el bias, siendo entonces enviado a una función de activación no lineal. Los valores de salida de estas unidades disminuyen gradualmente en la medida en que la distancia entre el vector de entrada y el vector que representa el padrón almacenado aumenta. Se utiliza una función exponencial como función de activación. Las unidades pertenecientes a la camada padrón pueden ser visualizadas en la figura 5 [10].

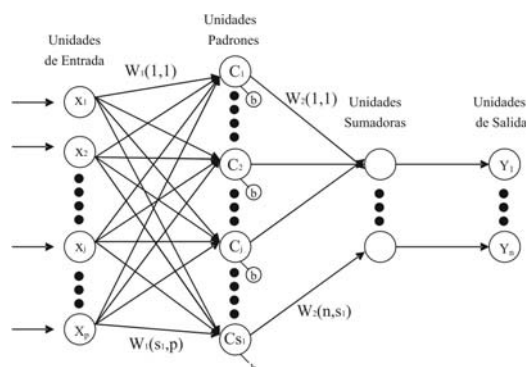


Figura 4 : Arquitectura de la Red GRNN

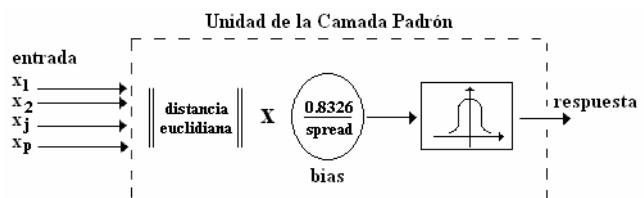


Figura 5 : Principio de funcionamiento interno de la unidad padrón

El desempeño de la red es principalmente influenciado por el parámetro de ajuste del bias (spread) y por los padrones almacenados. La salida de las unidades pertenecientes a la camada padrón

es enviada a la camada de suma, en donde el número de unidades que componen esta camada corresponde al número de observaciones (salidas deseadas). Las unidades de suma tienen la función de realizar la sumatoria de la salida de las unidades padrones, de acuerdo al número de observaciones que cada ejemplar representa. Este número de observaciones varía conforme el número de salidas deseadas, en el caso de la figura 4 con n salidas. Las unidades de la camada de salida simplemente dividen cada una de las sumatorias resultantes de las unidades de suma por la sumatoria total de todas las unidades que componen la camada de suma [10].

6 IMPLEMENTACION DE LAS HERRAMIENTAS DE DIAGNOSTICO Y RESULTADOS OBTENIDOS

6.1 Análisis de Deformaciones Radiales

El conjunto de datos que será analizado proviene de ensayos de respuesta en frecuencia cedidos por el Profesor Stefan Tenbohlen del Instituto de Transferencia de Energía y Tecnología de Alta Tensión de la Universidad de Stuttgart (Alemania). Los datos se refieren a las mediciones de respuesta en frecuencia realizadas en un transformador de potencia en donde fueron realizadas de propósito deformaciones mecánicas radiales en el devanado de alta tensión (AT), con el objetivo de estudiar el comportamiento de las funciones de transferencia medidas para los diferentes niveles de deformaciones mecánicas realizadas. La figura 6 muestra un resumen de los niveles que el devanado en estudio sufrió. La profundidad del hundimiento (deformación radial) es de 1 cm, que corresponde a 3.5% del diámetro del devanado. Considerando que el devanado puede ser dividido en 4 caras o partes, cada nivel de deformación representa la deformación radial de 1 cm en niveles relativos de deformación axial en cada cara. Como mostrado en la figura 6, en el nivel de deformación 9, que es el más severo, 100% de las caras A, B y C y 50% de la cara D fueron dañadas.

La figura 7 muestra el grupo de funciones de transferencia medidas para los diferentes niveles de deformaciones mecánicas que representan la admitancia del devanado de alta tensión. Es importante observar que todas las funciones de transferencia obtenidas con las mediciones de FRA serán divididas en fajas de frecuencias para el análisis conforme indicado en el ítem 1.1. En el esquema de conexión y medición para la realización del ensayo de respuesta en frecuencia, la señal de excitación aplicada y la corriente medida fueron el devanado de AT.

Niveles de Deformación N.D	Profundidad Radial 1 cm	Dimensión Relativa de la Deformación Axial			
		Cara A	Cara B	Cara C	Cara D
0					
1		10 %			
2		30 %			
3		60 %			
4	Correspondiente a 3.5 % del diámetro del devanado	100 %			
5		100 %	50 %		
6		100 %	100 %		
7		100 %	100 %	50 %	
8		100 %	100 %	100 %	
9		100 %	100 %	100 %	50 %

Figura 6 : Niveles de deformación del devanado en estudio

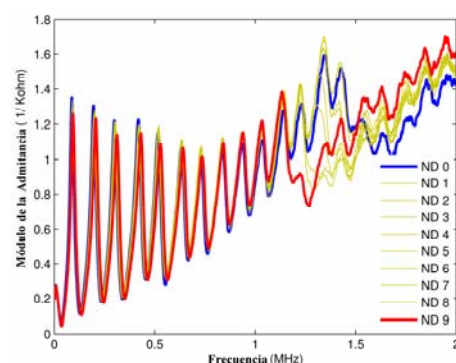


Figura 7 : Admitancia del devanado de AT

Con la inspección visual de las funciones de transferencia que representan los niveles de deformación (ND) realizados se observa; Bajas Frecuencias: pequeño desplazamiento horizontal de las curvas proporcional a la intensidad de la deformación mecánica; Frecuencias Medias: variación en

la amplitud proporcional a la intensidad de la deformación; Altas frecuencias: variación significativa en la amplitud y forma global de las curvas en esta faja de frecuencias, principalmente con el aumento de la intensidad de la deformación mecánica.

6.1.1 Resultados Obtenidos con el Coeficiente de Correlación (CC)

La tabla II muestra la correlación entre las curvas de FRA con el CC. Se observa que solamente a partir del nivel de deformación 6, en la región de frecuencias medianas y altas, el CC indicó una sutil diferencia con relación a la función de transferencia de referencia (nivel de deformación 0, devanado en perfectas condiciones).

Tabla II : Evaluación de la admitancia del devanado AT con el CC em fajas de frecuencias

Coeficiente de Correlación (CC)			
ND	Bajas Frecuencias	Medianas Frecuencias	Altas Frecuencias
0	1,0000	1,0000	1,0000
1	0,9997	0,9989	0,9993
2	0,9999	0,9987	0,9988
3	0,9992	0,9977	0,9963
4	0,9994	0,9939	0,9959
5	0,9991	0,9954	0,9908
6	0,9985	0,9851	0,9879
7	0,9963	0,9768	0,9822
8	0,9977	0,9754	0,9819
9	0,9953	0,9678	0,9808

6.1.2 Resultados Obtenidos con el Coeficiente Suma Absoluta del Error Logarítmico (ASLE)

La tabla III muestra los coeficientes ASLE relacionando las mediciones de FRA con diferentes niveles de deformación con la curva de referencia. Podemos ver en la tabla que los coeficientes ASLE indican diferencias considerables a partir del nivel de deformación 1.

Tabla III: Evaluación de la admitancia del devanado AT con el ASLE en fajas de frecuencias

Suma Absoluta del Error logarítmico (ASLE)			
ND	Bajas Frecuencias	Medianas Frecuencias	Altas Frecuencias
0	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,1849	0,4147	0,5345
2	0,1568	0,5052	0,6071
3	0,4472	0,5471	0,6715
4	0,3166	0,8917	0,7292
5	0,4935	0,7803	0,9704
6	0,5991	1,3620	1,0478
7	0,9042	1,7106	1,2111
8	0,7210	1,7669	1,3502
9	1,0600	2,0330	1,5985

6.1.3 Resultados Obtenidos con la Red Neuronal Artificial tipo GRNN

El objetivo de la red neuronal tipo GRNN es indicar la condición de la función de transferencia entre normal y defectuosa, por tanto, dos estados posibles fueron habilitados en el algoritmo desarrollado. En este sentido, la red fue entrenada con 4 vectores de entrada representando funciones de transferencia del caso en estudio. La curva que representa el nivel de deformación 0 fue indicada a la red como siendo el estado en que el devanado se encuentra en perfectas condiciones de

funcionamiento, ya los niveles de deformación 1, 5, y 9 fueron presentados a la red como siendo curvas que representan una condición defectuosa. El *spread* adoptado dependió de la faja de frecuencia, *spread*=0,4 para bajas frecuencias, *spread*=0,5 para medianas frecuencias y *spread*=0,6 para altas frecuencias. La red fue probada con las curvas de FRA restantes (representando a niveles 2, 3, 4, 6, 7 y 8). La tabla IV presenta los resultados obtenidos con la implementación de la red neuronal para el análisis de las funciones de transferencia divididas en bajas, medianas y altas frecuencias.

Tabla IV: Evaluación de la admitancia del devanado AT con la red GRNN en fajas de frecuencias

Red Neuronal Artificial tipo GRNN						
ND	Bajas Frecuencias		Medianas Frecuencias		Altas Frecuencias	
	Normal	Defectuosa	Normal	Defectuosa	Normal	Defectuosa
2	0,2529	0,7471	0,0138	0,9862	0,00	1,00
3	0,2497	0,7503	0,0213	0,9787	0,00	1,00
4	0,2513	0,7487	0,0000	1,0000	0,00	1,00
6	0,2479	0,7521	0,0000	1,0000	0,00	1,00
7	0,2461	0,7539	0,0000	1,0000	0,00	1,00
8	0,2464	0,7536	0,0000	1,0000	0,00	1,00

Como observado en la tabla IV, en la región de las altas frecuencias, la red identificó el estado de defecto a partir de los niveles de deformación iniciales.

7 CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo presentó la metodología de diagnóstico de transformadores de potencia denominada Análisis de la Respuesta en Frecuencia (FRA). Fueron descritas la metodología y la correlación entre defectos y parámetros físicos del devanado. Fueron analizadas visualmente las variaciones de diagramas de FRA para diferentes niveles de deformación mecánica realizadas en un devanado de alta tensión de un transformador de potencia. También fueron analizados y comparados dos indicadores numéricos y una red neuronal artificial tipo GRNN en el sentido de indicar numéricamente diferencias entre la curva que representa al devanado en perfectas condiciones y las curvas que representan deformaciones en el mismo. Entre las herramientas de auxilio al diagnóstico presentadas, los desempeños obtenidos con la red neuronal y con el coeficiente ASLE son considerados satisfactorios, entretanto, estudios adicionales son necesarios para evaluar las herramientas. El coeficiente CC presentó un resultado no satisfactorio, debido a las características de las curvas para este caso, con padrones similares en forma de onda pero diferentes en magnitud.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Ryder “Diagnosing Transformer Faults Using Frequency Response Analysis” (IEEE Electrical Insulation Magazine número 2 volumen 19, 2003, páginas 16-22)
- [2] J.W. Kim, B.K. Park, S.C. Jeong, S.W. Kim, P.G. Park “Fault Diagnosis of a Power Transformer Using an Improved Frequency Response Analysis” (IEEE Transactions on Power Delivery número 1 volumen 20, 2005, páginas 169-178)
- [3] S. M. Islam “Detection of Shorted Turns and Winding Movements in Large Power Transformers Using Frequency Response Analysis” (IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 23-27 Enero. 2000, páginas 2233-2238)
- [4] K. Stockler Herszterg “Desenvolvimento de um Modelo Matemático para Enrolamentos de Transformadores: Uma Abordagem Analítica da Resposta em Freqüência” (COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Mestrado em Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2004)
- [5] P.T.M. Vaessen, E. Hanique “A New Frequency Response Analysis Method for Power Transformers” (IEEE Transactions on Power Delivery número 1 volumen 7, 1992, páginas 384-390)
- [6] S.Tenbohlen, S. Ryder “Making Frequency Response Analysis Measurements: A Comparison of the Swept Frequency and Low Voltage Impulse Methods” (XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, 2003, Holanda)
- [7] E. Rahimpour, J. Christian, K. Feser, H. Mohseni “Transfer Function Method to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Winding” (IEEE Transactions on Power Delivery , número 2 volumen 18, 2003, páginas 493-505)
- [8] E.P. Dick, C Erven “Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis” (IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, número 6 volumen 1, 1978, páginas 2144-2153)
- [9] J. A. Britton “Transformer Maintenance and Diagnostics Using Frequency Response Analysis” (Disponível em www.electricenergyonline.com, acessado em 12/03/2006)
- [10] G. Cardoso Jr “Estimação da Seção em Falta em Sistemas Elétricos de Potência via Redes Neurais e Sistemas Especialistas Realizada em Nivel de Centro de Controle” (Doutorado em Engenharia Elétrica, UFSC, 2003, Florianópolis)