



ANÁLISIS DE SEÑALES DE CORRIENTE PARA DIAGNÓSTICO DE CORTOCIRCUITO ENTRE ESPIRAS DE TRANSFORMADOR BASADO EN TRANSFORMADA WAVELET

Analysis of current signals for diagnostics of short-circuited turns in a transformer based on Wavelet transform

Gustavo Álvarez-Monroy¹, Arturo Mejía-Barrón¹, Martín Valtierra Rodríguez^{1*}, Juan Pablo Amézquita-Sánchez¹, David Granados Lieberman², Juan C. Olivares Galván³, Rafael Escarela-Pérez³.

¹ENAP RG Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus San Juan del Río, Av. Río Moctezuma 249, San Cayetano, San Juan del Río, 76807, Querétaro, México.

²ENAP RG Departamento de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Irapuato, Carretera Irapuato - Silao km 12.5 Colonia El Copal, Irapuato, 36821, Guanajuato, México.

³Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 180, Colonia Reynosa Tamaulipas, Del. Azcapotzalco, 02200, Ciudad de México, México.

*Autor de correspondencia
martin.valtierra@enap-rg.org

RESUMEN

Hoy en día, los transformadores son elementos básicos y de gran importancia en los sistemas eléctricos. Desafortunadamente, estos elementos están propensos a fallas, entre las cuales destaca la falla de cortocircuito en los devanados. Debido a esto, existe una necesidad emergente en la propuesta de metodologías que ayuden a detectar y cuantificar esta falla de manera oportuna para evitar daños graves al transformador o dispositivos eléctricos conectados en la red. El presente trabajo propone una metodología para obtener características que ayuden a cuantificar fallas de cortocircuito mediante una técnica basada en la transformada Wavelet-packet, cuya función es descomponer una señal en sus diferentes componentes frecuenciales. El análisis llevado a cabo se basa en señales corriente de energización obtenida de manera experimental en un transformador monofásico, donde la señal de corrientes se divide en dos partes, la primera corresponde a la parte transitoria de la señal y la segunda parte corresponde al análisis del estado estable de la misma. La entropía de Shannon es propuesta como índice para la detección y cuantificación de la falla. Finalmente, diversas condiciones de falla de cortocircuito entre las espiras de los devanados son analizadas de manera experimental, las cuales son de 10, 20, 30 y 40 vueltas cortocircuitadas, además del estado sano del transformador. Los resultados obtenidos demostraron la efectividad de la metodología propuesta.

Palabras Clave:

corriente de energización, fallas de cortocircuito, diagnóstico de falla, entropía de Shannon, transformada wavelet, transformadores.

ABSTRACT

Nowadays, transformers are basic elements and of great importance in electrical systems. Unfortunately, these elements are prone to

faults, among which the short-circuit fault in the windings stands out. In this regard, there is an emerging need in the proposal of methodologies that help to detect and quantify this failure in a timely manner, and avoid serious damage to the transformer or connected electrical devices in the network. The present work proposes a methodology to obtain features that help to quantify short-circuit faults by means of a Wavelet-packet transformed technique, whose function is to decompose a signal in its different frequency components. The analysis carried out is based on energizing current signals obtained experimentally in a single-phase transformer so the analysis is divided into two parts, the first part corresponds to the transient part of the signal and the second part corresponds to the analysis of the steady state of the same. The Shannon entropy is proposed as an index for the detection and quantification of the fault. Finally, various short circuit fault conditions between turns of the windings are analyzed in an experimental manner. These conditions are 10, 20, 30 and 40 short circuited turns, in addition to the healthy state of the transformer. The results obtained demonstrated the effectiveness of the proposed methodology.

Keywords:

energization current, fault diagnostics, Shannon entropy, short-circuit faults, transformers, wavelet transform.

1. INTRODUCCIÓN

Los transformadores son dispositivos de gran importancia en los sistemas eléctricos, ya que ayudan en la transmisión y distribución la energía eléctrica de forma económica, eficiente y simple (Golshan, et al., 2015; Yazdani et al., 2015; Dashti et al., 2016; Ashrafian et al., 2014). Desafortunadamente, los transformadores son propensos a fallas las cuales pueden causar interrupciones en el suministro de la energía, además de altos costos de reparación, generando grandes pérdidas



económicas (Oliveira y Cardoso, 2017). Por lo tanto, el diagnóstico de fallas en transformadores es primordial en los sistemas eléctricos para evitar daños a la infraestructura y de esta forma asegurar tanto la estabilidad del sistema de potencia como la calidad del servicio eléctrico (Mao y Aggarwal, 2000). Algunas de las fallas internas que ocurren comúnmente en los transformadores son: el sobrecalentamiento interno, el sobreflujo en el núcleo, la sobrepresión en el tanque, fallas en los contactores y fallas de cortocircuito. Estas últimas ocurren en los devanados o entre espiras, y son causadas debido a la ruptura del aislamiento del devanado, además están comúnmente asociadas a los altos niveles de voltaje y corriente debido a descargas atmosféricas, fallas a tierra o por el deterioro natural. Las fallas de cortocircuito entre las espiras representan el 25% de las fallas del transformador que generalmente comienzan como un pequeño cortocircuito en una de las espiras del devanado, conocidas como fallas incipientes, pero se manifiestan rápidamente en fallas de gran magnitud que implican un mayor número de vueltas cortocircuitadas si no se detectan a una edad temprana (Bhowmick y Nandi, 2015).

En la literatura, las fallas entre las espiras han sido estudiadas en diversos trabajos de investigación. En estos, diferentes métodos para la identificación de las fallas de cortocircuito entre espiras han sido propuestos, tal es el caso de la transformada Wavelet (Oliveros et al., 2016), además se han propuesto métodos como ajuste de curvas (Ahmadi et al., 2014), modelos tiempo-frecuencia (Mejía et al., 2017), morfología matemática (Wu et al. 2016), análisis de funciones de transferencia (Lei et al., 2014), componentes simétricos (Faiz et al., 2016), análisis de vibraciones (Zhou et al., 2016) y el análisis de gases disueltos (Bhide et al., 2010). Por otra parte, el ajuste de curvas se ha utilizado para discriminar entre fallas internas y corrientes de energización obteniendo señales residuales entre las curvas ajustadas y una forma de

onda sinusoidal (Ahmadi et al., 2014). Modelos tiempo-frecuencia han sido propuestos para el análisis un transformador monofásico con la finalidad de obtener una herramienta para generar formas de onda con diferentes condiciones de falla de cortocircuito, además de la propuesta de diferentes índices para la identificación de la severidad de la falla (Mejía et al., 2017). Así también, técnicas basadas en morfología matemática se han llevado a cabo con el fin de extraer el gradiente y detalles de simetría de la señal de corriente con diferentes condiciones de falla interna (Wu et al. 2016). En el mismo sentido, se ha realizado análisis de la función de transferencia para observar la energía y la amplitud de la corriente de cortocircuito las cuales dependen de la severidad de la falla (Lei et al., 2014). Además, componentes de secuencia negativa se han analizado para detectar el fallo entre espiras mediante parámetros de amplitud y fase en los que se observa un aumento en la corriente de secuencia negativa con un alto nivel de severidad de falla de cortocircuito (Faiz et al., 2016). Algunos métodos de análisis alternativos basados en el análisis de vibraciones junto con el análisis de la fuerza electromagnética se han llevado a cabo para la detección de fallas (Zhou et al., 2016). También el análisis de gases disueltos ha sido propuesto, el cual se basa en el análisis de la composición química de gas en un transformador, estos gases son generados comúnmente por las tensiones térmicas o eléctricas en el aceite del transformador y el aislamiento del devanado (Bhide et al., 2010). Finalmente, se han propuesto diferentes metodologías para el estudio de fallas en los devanados, sin embargo, no todas las metodologías mencionadas tienen validación experimental, además, debido a la importancia de tal falla, la necesidad de nuevas metodologías con sustento experimental se encuentra latente. Es importante mencionar que la mayoría de las metodologías se han enfocado al análisis de señales ya sea en la parte transitoria, p. ej. el diseño de metodologías orientadas a pro-

tecciones diferenciales, o en la parte estable, la cual se enfoca principalmente en la detección de fallas; en este sentido, metodologías que analicen estos dos estados pueden, por un lado, ser propuestas como medida de la versatilidad de la técnica propuesta o, por otro lado, hacer una metodología más robusta y con mayor campo de aplicabilidad. En este sentido, la transformada Wavelet, la cual es un método de procesamiento de señales, proporciona una representación tiempo-frecuencia de las señales, considerando efectos no estacionarios y estacionarios. Lo anterior indica que la transformada Wavelet puede ser una técnica adecuada para el análisis de la parte transitoria (no estacionaria) y la parte estable (estacionaria) de las señales de energización; además presenta diversas ventajas como son poca carga computacional, compresión de datos y eliminación de ruido (Amezquita y Adeli, 2014). También, es importante mencionar que ha sido utilizada en diversas aplicaciones en electricidad. Por ejemplo, Torres et al. (2014) utilizaron la transformada Wavelet para la identificación de disturbios eléctricos como armónicos, interrupciones en el voltaje, entre otros. Urbina et al. (2017) usaron la transformada Wavelet para un mejor seguimiento en los cambios transitorios en las señales de corriente y voltaje debidos a las diversas condiciones que afectan la calidad de la energía en los sistemas eléctricos. Además, la detección de vueltas cortocircuitadas en transformadores por medio de la técnica de transformada Wavelet a partir de la corriente de energización se ha llevado a cabo obteniendo resultados prometedores sin embargo no se presentan algún índice de diagnóstico directo aunque si se presentan los coeficientes de correlación obtenidos de la transformada Wavelet para cada nivel de severidad de falla (Oliveras et al., 2016). Por otro lado, la entropía de Shannon es un índice empleado en diversas aplicaciones para detección de fallas en sistemas eléctricos que ha presentado buenos resultados como parámetro de detección y cuantificación de fallas. Por ejemplo, Gonzá-

lez et al. (2015) utilizan entropía de Shannon a partir de un método basado en descomposición de modo empírica para la detección de disturbios eléctricos que afectan la calidad de la energía. Incluso, por medio del índice de entropía de Shannon se han realizado diagnósticos automáticos de barra rota en motores de inducción (Camarena et al., 2016). En base a la información anterior, la propuesta de este trabajo es explorar el potencial de la transformada wavelet y la entropía de Shannon para el diagnóstico de fallas de cortocircuito en transformadores.

En este trabajo se propone una nueva metodología para el diagnóstico de fallas entre espiras en los devanados de un transformador monofásico utilizando la transformada Wavelet packet para discriminar la condición del transformador. La metodología propuesta se prueba y valida experimentalmente con un transformador monofásico en el que se analizan señales de corriente de 10, 20, 30 y 40 espiras cortocircuitadas. En la parte de la experimentación, señales de corriente de energización del transformador son obtenidas donde se propone un análisis separando la parte transitoria y el estado estable de la señal con la finalidad de observar el desempeño de la técnica en ambos casos. El análisis se realiza mediante la aplicación de la transformada Wavelet a cada una de las señales donde se propone la entropía de Shannon como índice de diagnóstico y así cuantificar la severidad de la misma. Finalmente, los resultados obtenidos muestran la utilidad de la propuesta para detección y cuantificación de la falla de cortocircuito entre vueltas, discutiendo la efectividad ya sea en el estado transitorio o en el estado estable.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describe brevemente la parte teórica que se ocupó en este trabajo. La cual se compone de dos secciones, en la primera se describe lo referente a la transfor-



mada Wavelet packet y en la segunda parte se tiene la definición de la Entropía de Shannon y la ecuación para obtener sus valores.

2.1. Transformada Wavelet packet

En procesamiento de las señales, la transformada Wavelet es un método de procesamiento utilizado para el análisis de señales no estacionarias (Cabal et al., 2010). Para estas señales, la transformada Wavelet puede proporcionar su representación tiempo-frecuencia (Torres et al., 2014; Camarena et al., 2015). Esta cuenta con dos algoritmos principales, algoritmo de Mallat y el método de la Wavelet packet. En ambos algoritmos,

una señal es descompuesta sucesivamente en múltiples componentes de baja y alta frecuencia (Ramchandran y Vetterli, 1993; Yen y Lin, 2000). Para cada descomposición, el conjunto de frecuencias bajas puede ser referido como aproximación (a), mientras que el conjunto de altas frecuencias puede ser referido como detalle (d). A diferencia del algoritmo de Mallat, el método de la Wavelet packet descompone tanto los componentes de aproximación como los de detalle para hacer una descomposición de bandas simétricas, el cual generalmente es llamado árbol de descomposición binaria como se muestra en la Fig. 1 (Amezquita y Adeli, 2014).

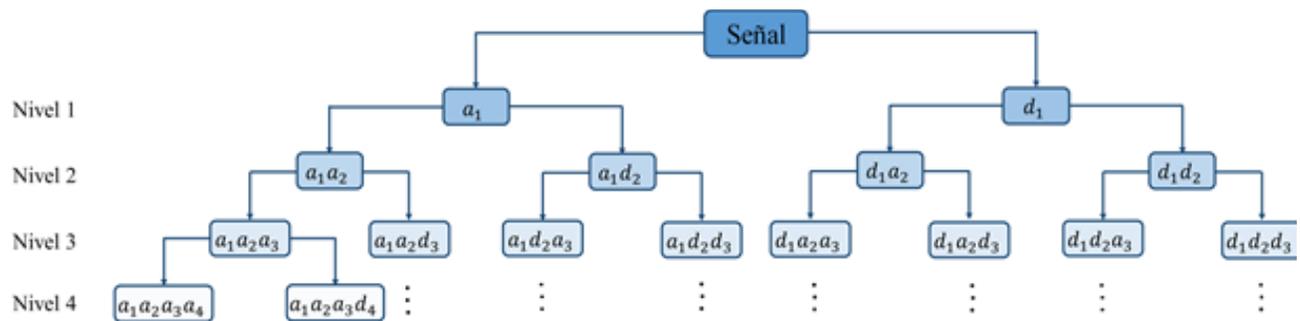


Figura 1. Ejemplo de un árbol de descomposición de la transformada Wavelet packet.

Es importante aclarar que las señales obtenidas en cada nodo deben ser ordenadas con el propósito de tener un incremento de frecuencia ascendente (Urbina et al. 2017).

En general, una función Wavelet packet $W_{j,k}^n$, tiene tres índices: j , k y n . El índice n se conoce como el parámetro de modulación u oscilación y, j y k son números, los cuales representan los parámetros de escalado (localización de la frecuencia) y traslación (localización del tiempo), respectivamente. La ecuación está dada por (Yen y Lin, 2000):

$$W_{j,k}^n = 2^{\frac{j}{2}} W^n(2^j t - k) \quad (1)$$

Las dos primeras funciones de la Wavelet packet ($n = 0$ y 1 , $j = 0$ y $k = 0$) se denominan función escalar y la función Wavelet madre, respectivamente. Están dadas por:

$$W_{0,0}^0(t) = \varphi(t) \quad (2)$$

$$W_{0,0}^1(t) = \Psi(t) \quad (3)$$

Se pueden obtener otras funciones para $n > 1$ con las siguientes funciones recursivas (Yen y Lin, 2000):

$$W_{0,0}^{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) W_{1,k}^n(2t - k) \quad (4)$$

$$W_{0,0}^{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) W_{1,k}^n(2t - k) \quad (5)$$

Donde ψ es el filtro pasa bajas (escalado) y ψ^* es el filtro pasa altas (Wavelet). Estos filtros están asociados con las funciones de escalado y las funciones Wavelet. Los coeficientes de aproximación (a) y detalle (d) se pueden obtener usando (4) y (5), respectivamente. Los coeficientes de la Wavelet packet de una función $x(t)$ se pueden calcular de la siguiente manera:

$$P_j^m(k) = \langle x, W_{j,k}^n \rangle = \int x(t) W_{j,k}^n(t) dt \quad (6)$$

Donde $P_j^m(k)$ representa el m-ésimo conjunto de coeficientes de descomposición de la Wavelet packet. Los componentes de frecuencia y sus tiempos se reflejan en $P_j^m(k)$ mediante el cambio de m , j y k . Cada conjunto indica un contenido de frecuencia de sub-bandas específico, que está regulado por el parámetro de escala j y el parámetro de oscilación k (Yen y Lin, 2000).

2.2. Entropía de Shannon

Claude Shannon empleó el concepto de entropía como una medida para el contenido de la información (Kollment et al., 2017). La entropía de Shannon es una medida en un sistema de probabilidad y refleja la cantidad de información que hay en el sistema. La fórmula para obtener la entropía de Shannon es simple y basada en los eventos de probabilidad (El-Amraoui et al. 2016).

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \log_2(P_i) \quad (7)$$

En un sistema, si P_i representa la probabilidad de que ocurra un evento, entonces $-\log_2(P_i)$ es la cantidad de información transitiva para el evento. Por tanto, el promedio estadístico de la información transitiva para todos los eventos individuales será definido como la información transitiva del sistema. La base $B=2$ es el número mínimo de bits que con los que se pueden comprimir una secuencia simbólica (Gu, 2017).

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta se muestra en la Fig. 2. Primeramente, las señales de corriente de energización son adquiridas, dichas señales son cinco, la primera obtenida del estado sano del transformador, las otras cuatro son obtenidas con diferentes condiciones de falla. Con el fin de obtener las señales con diversas condiciones fallas se utilizó y se modificó un transformador monofásico, al cual se le realizaron derivaciones de 10, 20, 30 y 40 espiras, de tal forma que al cortocircuitar cada una de las derivaciones mencionadas se emula la falla de corto circuito con diferentes niveles de severidad obteniendo de cada uno de ellos las señales de corriente de energización, como se muestra en la Fig. 2a. La corriente de energización se obtiene en la condición de energización máxima que se obtiene cuando el transformador se enciende en condición de cruce por cero de la señal de voltaje. También la cancelación del flujo remanente del transformador se consideró con la finalidad de obtener repetitividad en las condiciones de energización. Cabe señalar que, para la realización de las pruebas, no fue conectada ninguna carga al transformador y que se realizó una prueba con cada una de las condiciones mencionadas. Una vez obtenidas las cinco señales, a cada una de ellas se les aplicó transformada Wavelet packet, utilizando la Daubechies como Wavelet madre, se eligió esta wavelet madre ya que es la que mejor se adecua debido a sus características de remover el ruido, lo que es ideal para señales de corriente (Mohamed et al., 2007). Obtuvieron cuatro niveles de descomposición, del cual se analizaron los coeficientes del nodo (4,0). Con las señales obtenidas se realizó el análisis, el cual fue dividido en dos partes: el estado transitorio, el cual se tomó desde el momento que se energizó el transformador hasta que transcurrió 0.1164 s., de ese tiempo y hasta que finalizó la prueba, a los 0.25 s., se tomó la segunda parte, es decir, el estado estable. En ambas partes se propone la entropía de Shannon como in-



dice con el objetivo de proporcionar información para el diagnóstico de la severidad de las fallas. La Fig. 2b muestra cada uno de los pasos mencionados anteriormente.

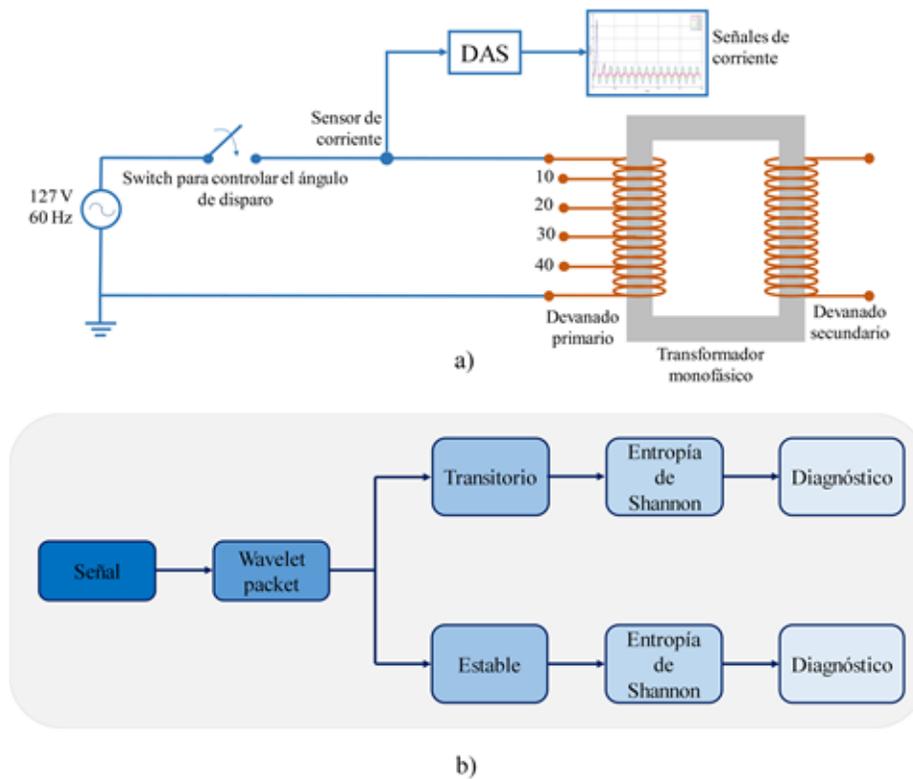


Figura 2. Metodología: a) diagrama para la adquisición de las señales, b) diagrama de la metodología propuesta.

4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

4.1. Experimentación

En la Fig. 3 se muestra la puesta experimental empleada para validar la metodología propuesta. Para obtener las señales de corriente de energización se utilizó un transformador monofásico de 120 VA, con un voltaje de entrada de 127 V y de salida de 24 V. El transformador cuenta con 474 vueltas en el lado primario y 91 vueltas en el lado secundario. Posteriormente, se modificó el lado primario del transformador de tal forma que se le realizaron derivaciones para emular las condiciones de corto circuito entre espiras, en donde se obtuvieron las siguientes condiciones de falla: 10, 20, 30 y 40 espiras cortocircuitadas. Para controlar la energización del transformador se utilizó el microcontrolador FDRM-K64, el cual controla la activación del

transformador por medio de un relevador de estado sólido, el cual cuenta con detección de cruce por cero lo que garantiza que el ángulo de disparo para todas las pruebas sea de 0° . Para el sistema de adquisición de datos se utiliza un osciloscopio Tektronix TDS 2024 con una frecuencia de muestreo de 5 kHz. El sensor de corriente empleado es el Tektronix A622 con un rango de 50 mA hasta 100 A. Para la obtención de las señales de corriente de energización del estado sano y de cada una de las diferentes condiciones de falla se emplea un intervalo de tiempo de 0.25 s.

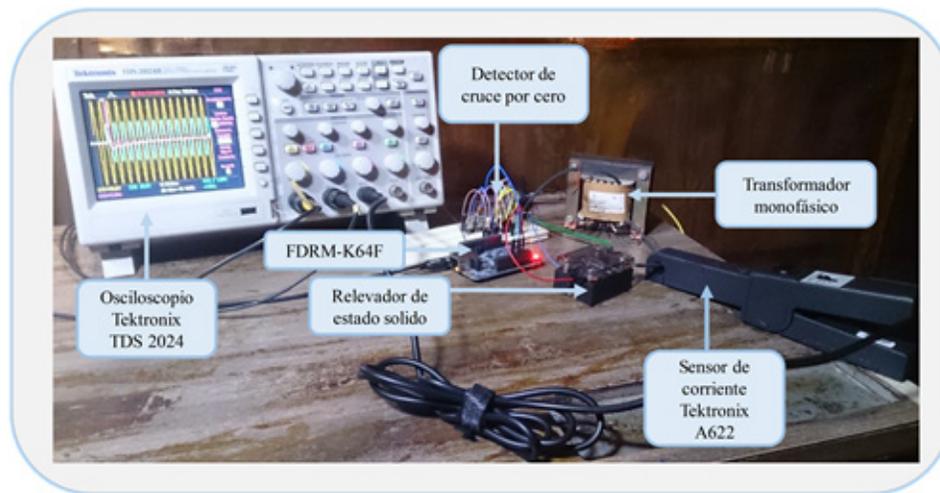


Figura 3. Puesta del experimento.

4.2. Resultados

Como se menciona en la sección de metodología, señales de corriente de energización de un transformador monofásico bajo diferentes condiciones de falla de cortocircuito son empleadas para el análisis de la parte transitoria y estacionaria. En la Fig. 4 se pueden observar diferentes gráficas las cuales representan los nodos 0, 1 y 2 del nivel de descomposición 4 de la transformada Wavelet, los cuales representan los anchos de banda frecuenciales de 0-156.25 Hz, 156.25-312.5 Hz y 312.5-468.75 Hz, respectivamente. En el apartado de la Fig. 4a se aprecian las gráficas del estado sano de la señal, en las Figs. 4b, 4c, 4d y 4e se observan las gráficas de los nodos antes mencionados y de las condiciones de falla de 10, 20, 30 y 40 espiras cortocircuitadas, respectivamente. Visualmente las gráficas del nodo 0 tienen una mejor definición y además se aprecia tanto el estado transitorio como el estado estable, la cual es la razón de que se seleccionara este nodo para realizar el análisis.

En la Fig. 5 se pueden observar los resultados que se obtuvieron al aplicar la metodología. En la Fig. 5a se aprecian las cinco señales de corriente de energización que fueron adquiridas, las cuales corresponden al estado sano y las fallas de 10, 20, 30 y 40 espiras cortocircuitadas del transformador, respectivamente.

A las señales antes mencionadas se les aplicó la transformada Wavelet. Posteriormente, se obtuvieron los coeficientes de cada una de las señales como se muestra en la Fig. 5b. Una vez obtenidos los coeficientes de cada señal, se obtuvo la parte transitoria y la parte estacionaria de cada señal como se muestra en las Figs. 5c y 5d, respectivamente. Además, con la finalidad de obtener un índice para la cuantificación de la falla se obtuvo la entropía de Shannon para identificar y cuantificar la falla.

En la Tabla 1 se muestra los valores obtenidos de la entropía de Shannon para las señales de los coeficientes del estado transitorio y estacionario. Los valores mencionados anteriormente fueron graficados y se observan en la Fig. 6, en donde se pueden apreciar dos gráficas. La gráfica roja muestra los valores del estado transitorio, en ella se observa que algunos valores son repetitivos y además no muestran un patrón a seguir que ayude a la identificación de la falla. En el caso de la gráfica verde, los datos tienden a seguir un comportamiento lineal por lo que a partir de estos datos se puede realizar la identificación e incluso la cuantificación de la falla. Lo anterior debido a que los valores de la entropía aumentan conforme las espiras cortocircuitadas también aumentan.



Nodo del árbol Wavelet

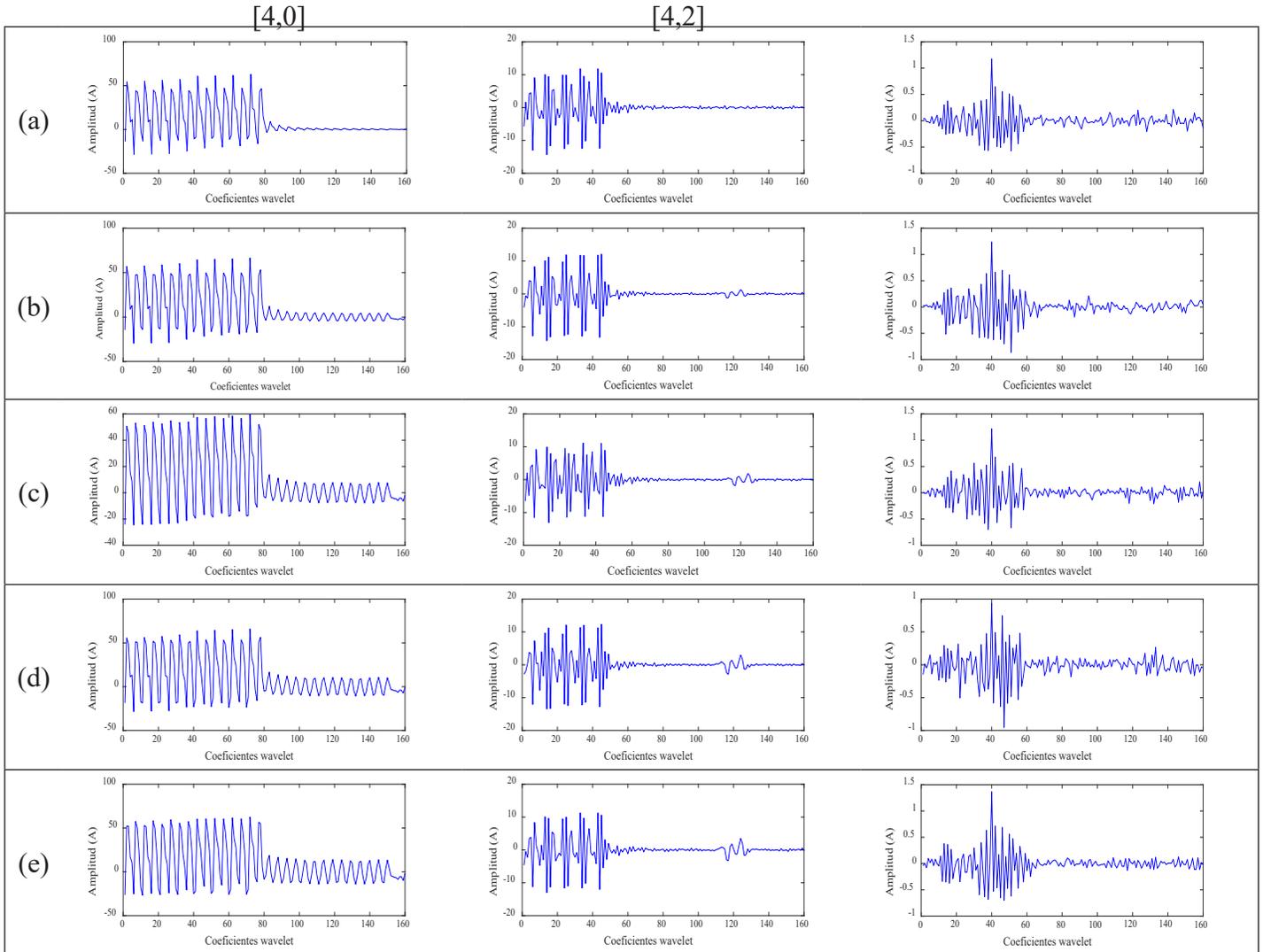


Figura 4. Señales en nodos del árbol wavelet, a) estado sano, b) 10 espiras cortocircuitadas, c) 20 espiras cortocircuitadas, d) 30 espiras cortocircuitadas, e) 40 espiras cortocircuitadas.

	Estado Sano	10 Vueltas cortocircuitadas	20 Vueltas cortocircuitadas	30 Vueltas cortocircuitadas	40 Vueltas cortocircuitadas
Transitorio	5.9307	5.9307	5.8980	5.9307	5.8652
Estado estable	5.7402	5.8069	5.8402	5.8736	5.9069

Tabla 1. Valores de la entropía de Shannon.

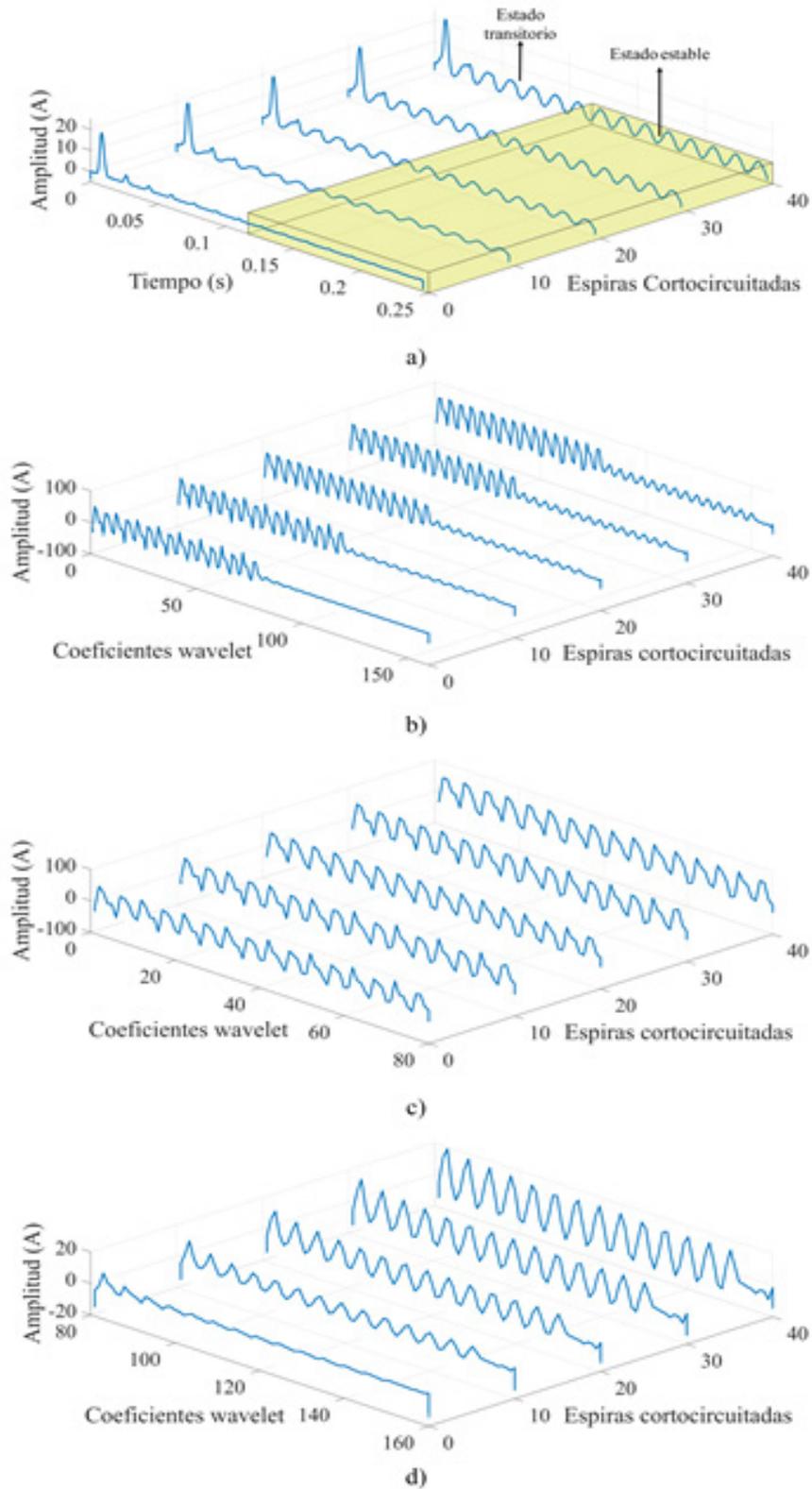


Figura 5. Señales, a) corriente de energización, b) aplicación de la transformada wavelet, c) coeficientes wavelet del estado transitorio, d) coeficientes wavelet del estado estable.

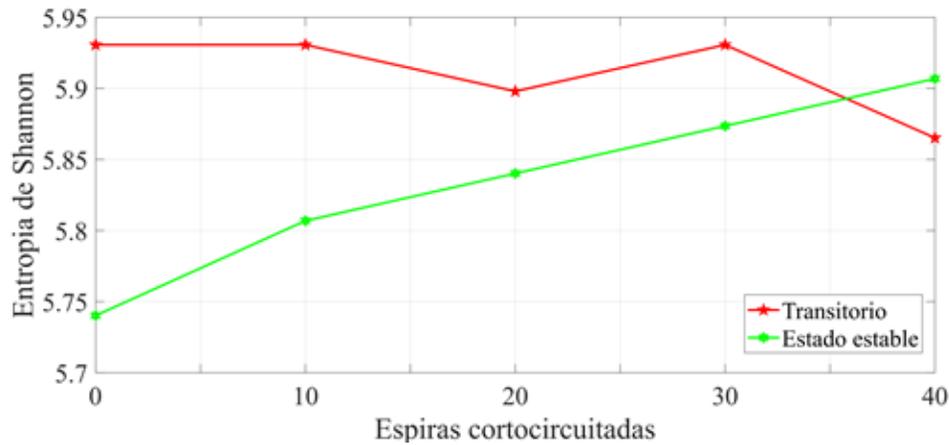


Figura 6. Valores de la entropía de Shannon.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone una metodología para analizar fallas de cortocircuito entre espiras, mediante la información obtenida a partir de señales de corriente de energización en transformadores. La metodología propuesta se validó a través de señales experimentales donde se consideran diferentes condiciones de falla tales como: 10, 20, 30 y 40 espiras cortocircuitadas y además de analizar el estado sano del transformador. Las señales mencionadas anteriormente contienen información del estado transitorio y del estado estable de la corriente de energización del transformador.

Por lo tanto, en este trabajo, se propone un análisis de cada una de las etapas de la corriente de energización del transformador. Lo anterior con el fin de obtener índices que ayuden a identificar fallas de cortocircuito, así como también la cuantificación de la misma. Para lograr el objetivo, se aplicó transformada Wavelet a las señales de corriente de energización, de donde se obtuvieron los coeficientes Wavelet. A cada una de las señales formadas por los coeficientes se les aplicó entropía de Shannon. Al utilizar este índice se obtuvieron datos para cada uno de los estados de la señal antes mencionados. El análisis desarrollado muestra que el estado estable, a diferencia del estado tran-

sitorio, provee mayor información para la detección y cuantificación de la falla. El índice de entropía de Shannon demostró ser adecuado para la cuantificación de la severidad de la falla ya que se observó que los valores de entropía se incrementaban conforme aumentaban las espiras cortocircuitadas. Aunque la propuesta demostró ser sensible en la detección de diez espiras cortocircuitadas, se debe realizar un mayor análisis para determinar el número mínimo de detección de espiras. La principal ventaja de la metodología propuesta es la versatilidad para diferentes aplicaciones, la cual es evaluada por medio del análisis por separado de las condiciones transitorias y de estado estable y aunque se obtienen resultados prometedores para el análisis en estado estable, nuevos índices pueden ser propuestos con el objetivo de mejorar el diagnóstico de la severidad de la falla en la parte transitoria.

En los trabajos futuros se propone utilizar otros métodos e índices que ayuden a la identificación de la falla en estado transitorio, además de validar las pruebas con un transformador de mayor potencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgar las becas 296868 y 610469 que ayudaron a la realización de este trabajo, y a las distintas instituciones de su adscripción por su apoyo durante toda esta investigación.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este proyecto fue solventado mediante el proyecto UAQ-PRODEP con registro FIN-2017-2.

REFERENCIAS

Ahmadi, M., H. Samet, and T. Ghanbari. 2014. Discrimination of internal fault from magnetising inrush current in power transformers based on sine-wave least-squares curve fitting method. *IET Science, Measurement & Technology*. 9:73-84. doi: 10.1049/iet-smt.2014.0012.

Amezquita-Sanchez J. P., and H. Adeli. 2014. Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures. *Arch Comput Meth Eng*. 23:1-15. doi. 10.1007/s11831-014-9135-7.

Ashrafian, A., B. Vahidi, and M. Mirsalim. 2014. Time-time-transform application to fault diagnosis of power transformers. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 8:1156-1167. doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0622.

Bhide, R. S., M. S. S. Srinivas, A. Banerjee and R. Somakumar. 2010. Analysis of winding inter-turn fault in transformer: A review and transformer models. 2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET). 1-7. doi: 10.1109/ICSET.2010.5684425.

Bhowmick, S., and S. Nandi. 2015. Online detection of an interturn winding fault in single-phase distribution transformers using a terminal measurement-based modeling technique. *IEEE Trans Power Deliv*. 30:1007-1015. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2347320

Cabal-Yepez, E., R. Saucedo-Gallaga, A. G. Garcia-Ramirez, A. A. Fernandez-Jaramillo, M. Pena-Anaya, and M. Valtierra-Rodriguez. 2010. FPGA-Based online detection of multiple-combined faults through information entropy and neuronal networks. *Int. Conf. Reconfigurable Comput. FPGAs (ReConFig)*. 244–249. doi: 10.1109/ReConFig.2010.31.

Camarena-Martinez, D., M. Valtierra-Rodriguez, J. P. Amezcua-Sanchez, D. Granados-Lieberman, R. J. Romero-Troncoso, and A. Garcia-Perez. 2016. Shannon Entropy and-Means Method for Automatic Diagnosis of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Vibration Signals. *Shock and Vibration*. 1-11. doi: 10.1155/2016/4860309

Camarena-Martinez, D., M. Valtierra-Rodriguez, L. A. Morales-Hernandez, J. P. Benitez-Rangel, and A. Dominguez-Gonzalez. Time-frequency analysis of power quality signals using compact kernel distribution technique. *IEEE International Autumn Meeting on power, electronics and computing, ROPEC 2015*. 1-6. doi: 10.1109/ROPEC.2015.7395078.

Dashti, H., M. Davarpanah, M. Sanae-Pasand, and H. Lesani. Discriminating transformer large inrush currents from fault currents. *Int J Electr Power Energ Syst*. 75: 74-82. doi: 10.1016/j.ijepes.2015.08.025



El-Amraoui, A., L. Masmoudi, H. Ez-Zahraoui, and Y. El-Amraoui. 2016. Quantum edge detection based on shannon entropy for medical images. 2016 IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Application (AICCSA). 1-6. doi: 10.1109/AICCSA.2016.7945739.

Faiz, J., J. Gharaeei, and S. Lotfi-fard. 2016. Detection, location, and estimation of severity of interturn faults in power transformers. IEEE 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 2016. 39-44. doi: 10.1109/CPE.2016.7544155.

Golshan, M. H., M. Saghaian-Nejad, A. Saha, and H. Samet. 2014. A new method for recognizing internal faults from inrush current conditions in digital differential protection of power transformers. Elec Power Syst Res. 71:61-71. doi: 10.1016/j.epsr.2003.11.015.

Gonzalez-Cordoba, J. L., A. Mejia-Barron, and M. Valtierra-Rodriguez. 2015. Automatic detection and classification of electrical disturbances by means of empirical mode decomposition method. IEEE International Autumn Meeting on power, electronics and computing, ROPEC 2015. 1-6. doi: 10.1109/ROPEC.2015.7395079.

Gu, R. 2017. Multiscale Shannon entropy and its application in the stock market. Phys Stat Mech Appl. 484:215-224. doi: 10.1016/j.physa.2017.04.164.

Kollment, W., P. O'Leary, and R. Ritt. 2017. Force based tool wear detection using Shannon entropy and phase plane. Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2017 IEEE International. 1-6. doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969765.

Lei, X., J. Li, Y. Wang, S. Mi, C. Xiang. 2014. Simulative and experimental investigation of transfer function of inter-turn faults in transformer windings. Elec Power Syst Res. 107:1-8. doi: 10.1016/j.epsr.2013.08.021.

Mao, P. L., and R. K. Aggarwal. 2000. A wavelet transform based decision making logic method for discrimination between internal faults and inrush currents in power transformers. Int J Electr Power Energy Syst. 22:389-395. doi: 10.1016/S0142-0615(00)00013-2.

Mejia-Barron, A., M. Valtierra-Rodriguez, D. Granados-Lieberman, J. C. Olivares-Galvan, R. Escarela-Perez. 2017. Experimental data-based transient-stationary current model for inter-turn fault diagnostics in a transformer. Elec Power Syst Res. 152:306-315. doi: 10.1016/j.epsr.2017.07.020.

Mohamed I. M., M. I. Dessouky, S. Deyab, and F. H. Elfouly. 2007. Comparison between haar and daubechies wavelet transformions on FPGA technology. Proc World Acad Sci Eng Tech. 26:68-72. doi: 10.1999/1307-6892/7063.

Olivares-Galvan, J. C., R. Escarela-Perez, J. A. A. González, J. C. Jacobo, D. Guillén, and F. P. Espino-Cortés. 2016. Detection of interturn faults during transformer energization using wavelet transform. IEEE International Autumn Meeting on power, electronics and computing, ROPEC 2016. 1-5. doi: 10.1109/ROPEC.2016.7830612.

Oliveira L. M. R., and A. J. Cardoso. 2017. Comparing power transformer turn-to-turn faults protection methods: Negative sequence component versus

space vector algorithms. *IEEE Trans Ind Appl.* 53:2817-2825. doi: 10.1109/TIA.2016.2613506.

Ramchandran, K., and M. Vetterli. 1993. Best wavelet packet bases in a rate-distortion sense. *IEEE Trans Image Process.* 2:160-175. doi: 10.1109/83.217221.

Torres J. E., M. Valtierra-Rodriguez, M. A. Juarez, and G. Vazquez. 2014. Efficient discrete wavelet representation of electrical power disturbances by measuring energy concentration in the tiled timefrequency plane. *IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).* 998-1003. doi: 10.1109/ISIE.2014.6864748.

Urbina-Salas, I., J. R. Razo-Hernandez, D. Granados-Lieberman, M. Valtierra-Rodriguez, and J. E. Torres-Fernandez. 2017. Instantaneous power quality indices based on single-sideband modulation and wavelet packet-Hilbert transform. *IEEE Trans Instrum Meas.* 66:1021-1031. doi: 10.1109/TIM.2017.2663560.

Wu, W., T. Ji, M. Li and Q. Wu. 2016. Using mathematical morphology to discriminate between internal fault and inrush current of transformers. *IET Generation, Transmission & Distribution.* 10:73-80. doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0216.

Yazdani-Asrami, M., M. Taghipour-Gorjikolaie, S. M. Razavi, and S. A. Gholamian. 2015. A novel intelligent protection system for power transformers considering possible electrical faults, inrush current, CT saturation and over-excitation. *Int J Electr Power Energy Syst.* 64:1129-1140. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.08.008

Yen, G. G., and K. C. Lin. 2000. Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring. *IEEE Trans Ind Electron.* 47:650-667. doi: 10.1109/41.847906.

Zhou, H., K. Hong, H. Huang, and J. Zhou. 2016. Transformer winding fault detection by vibration analysis methods. *Appl Acoust.* 114:136-146. doi: 10.1016/j.apacoust.2016.07.024.