

**PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES
ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS**

Manizales, 26 de abril de 2017

Doctor
JOSÉ LUIS SALAZAR LÓPEZ
Director de Nuevas Creaciones
Superintendencia de Industria y Comercio
Cra. 13 No. 27-00 piso 1°
Bogotá DC

Referencia: Respuesta Requerimiento - Oficio N° 4862 Ref. Expediente
N° NC2017/0001140 Solicitud Patente.

Respetado señor:

Por medio de la presente, con el mayor respeto, de conformidad con el asunto de la referencia, en mi calidad de apoderado especial de la Universidad Nacional Sede Manizales, me permito dar respuesta al Oficio N° 4862, expedido dentro del proceso de solicitud de patente N° NC2017/0001140, lo cual realizo en los siguientes términos:

Con el fin de dar respuesta al oficio de la referencia y para atender las recomendaciones y solicitudes contenidas en el mismo, presento la redacción siguiente, la cual contiene los cambios implementados al escrito de solicitud de patente inicial.

Solicitud de patente del *“Procedimiento para la medición de la vida útil de transformadores eléctricos basado en la entropía de campos magnéticos”*

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

“PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Inventores: Jorge Hernán Estrada Estrada y Eduardo Antonio Cano Plata

Presentado por: Universidad Nacional de Colombia

RESUMEN:

El transformador es uno de los equipos más importantes en la industria de la producción, la transmisión, la distribución y el consumo de energía eléctrica. La invención proporciona un método para estimar la vida remanente de los transformadores a partir de una evaluación de la onda electromagnética radiada como variable de entrada al procedimiento inventado.

Esta invención se basa en la implementación de un procedimiento que analiza las ondas radiadas del buje del transformador. La invención descompone la señal radiada por el buje del transformador en su contenido espectral. A continuación, calcula el aumento entrópico de las componentes armónicas de la señal electromagnética radiada del transformador. Con esto se determina el desgaste térmico del transformador, obteniendo el equivalente de la temperatura de punto caliente del transformador en función de la entropía de la señal magnética radiada. Este procedimiento permite relacionar las variaciones de las señales electromagnéticas radiadas por el transformador con el desgaste de sus componentes por la condición térmica que generan los estados de energización y operación del transformador.

El antes mencionado procedimiento, evalúa el envejecimiento del transformador de manera no invasiva. Esta invención permite cuantificar el nivel de desgaste de los transformadores para las decisiones de operación, mantenimiento y planes futuros de compra en la reposición del activo transformador en una empresa prestadora del servicio de distribución de energía eléctrica.

DESCRIPCIÓN

CAMPO DE LA TÉCNICA AL CUAL PERTENECE LA INVENCION

La presente invención se ubica en el campo técnico de la ingeniería predictiva o ingeniería de mantenimiento predictivo, la cual es una especialidad inmersa o relativa a las actuaciones de mantenimiento predictivo, encargada de realizar los estudios correspondientes, para hallar las necesidades de mantenimiento y estimar la vida útil de los equipos.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

En la actualidad, si se requiere una mayor productividad, las empresas que dependen de dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos, deben invertir tiempo y dinero en la resolución de problemas típicos de su industria, esto lo hacen adquiriendo nuevas tecnologías que hacen más eficientes e idóneos sus procesos productivos. No obstante con este método, por su capacidad de predecir la vida útil de transformadores, permite tener ahorros significativos en las empresas de distribución de energía eléctrica.

CAMPO Y APOORTE TECNOLÓGICO DE LA INVENCION

El procedimiento que se pretende patentar por medio de este documento, se fundamenta en las técnicas de instrumentación no invasivas, que por medio de un método o proceso de medición basado en la entropía, utilizando los campos magnéticos radiados, actúa como medio para la gestión de activos. Aplicación: un sistemas de diagnóstico que permite medir la vida útil de transformadores, el cual se complementa con un procedimiento para interpretar la información obtenida.

ANTECEDENTES - ESTADO DEL ARTE ANTERIOR

Frente al estado del arte de este tipo de dispositivos y procedimientos de diagnóstico o lectura, podemos encontrar un número relativamente bajo de desarrollos, frente a los cuales, incluiremos los resultados más significativos.

La forma como se cita en el cuerpo de la redacción de los antecedentes está enumerada de acuerdo a los documentos evaluados como se detalla a continuación:

- [1] M. J. Heathcote, The J&P transformer book, Twelfth edition, Elsevier Ltd, 1998.
- [2] W. H. Tang, Q. H. Wu, Condition Monitoring and Assessment of Power Transformers Using Computational Intelligence, Springer, 2011.
- [3] IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Standard C57.12.90, 2015.
- [4] IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers, IEEE Standard C57.149, 2012
- [5] IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors, IEEE Standard C57.152, 2013.
- [6] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Standard C57.104, 2008.
- [7] IEEE Recommended Practice for Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors, IEEE Standard C57.113, 2010
- [8] IEEE Standard General Requirements and Test Procedure Power Apparatus Bushings, IEEE Standard C57.19.00, 2004.
- [9] James L, et al., Model-based monitoring of transformers. Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for electromagnetic and electronic systems, 1995.
- [10] Ming L, Jonsson B, Bengtsson T, Leijon M, Directivity of acoustic signals from partial discharges in oil. IEE Proc Sci Meas Technol 142(1):85–88, 1995.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

- [11] A. K. Lazarevich AK. Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformer Using an Optical Acoustic Sensor, The Virginia Polytechnic Institute and State University, Ph. D. thesis, Blackburg, Virginia, USA.
- [12] Gulski E, Kreuger FH, Krivda A, Classification of partial discharges. IEEE Trans Electr Insul 28(6):917–940, 1993.
- [13] IEEE Recommended IEEE Recommended Practice for Performing Temperature Rise Tests on Oil-Immersed Power Transformers at Loads Beyond Nameplate Ratings, IEEE Standard C57.119, 119.
- [14] N. Y. Utami, Y. Tamsir, A. Pharmatrisanti, H. Gumilang, B. Cahyono, R. Siregar, Evaluation Condition of Transformer Base on Infrared Thermography Results, IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, 2009.
- [15] S. Pincus, “Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure,” Chaos An Interdiscip. J. Nonlinear Sci., vol. 5, no. 1, pp. 110–117, 1995. Agregar bibliografía de estropia de la información
- [16] J. S. Richman and J. R. Moorman, “Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy,” Am. J. Physiol. Circ. Physiol., vol. 278, no. 6, pp. H2039–H2049, 2000.
- [17] M. Costa, A. Goldberger, and C.-K. Peng, “Multiscale Entropy Analysis of Complex Physiologic Time Series,” Phys. Rev. Lett., vol. 89, no. 6, p. 068102, Jul. 2002.

Actualmente los procesos de recepción de transformadores nuevos y usados, se basan en pruebas eléctricas, térmicas, mecánicas y ensayos de aislamiento [1]. Se utilizan dos métodos de evaluación: “off line” (expresión en inglés: que indica que el equipo se desconecta: fuera de línea) y métodos “online” (expresión en inglés que indica equipo en servicio o en línea). Estos son los métodos que se utilizan para valorar la condición de los transformadores y para detectar fallas incipientes.

El diagnóstico de transformadores por métodos fuera de línea, son normalmente aplicados en procesos de recepción y aceptación de transformadores nuevos y usados, los cuales requieren una evaluación muy detallada de su estado. Adicionalmente, es posible aplicar diversas pruebas de métodos fuera de línea en programas de monitoreo basado en el tiempo y la confiabilidad, para detectar posibles fallas incipientes [2]. Sin embargo, esta estrategia de monitoreo es muy laboriosa y no es rentable, lo que también es ineficaz para identificar fallas que se desarrollan entre las inspecciones programadas [2].

Los métodos en línea son utilizados en programas de mantenimiento en los cuales se monitorea y controla de forma continua las variables que definen la condición de deterioro del transformador, lo que permite programar las acciones de mantenimiento basados en la condición que se detecte. El monitoreo basado en la condición detectada, está relacionado con una amplia gama de desarrollos orientados a la detección de descargas parciales [7], medición de la deformación de los devanados [4], tasa de generación de gases [6] y evolución de las condiciones térmicas [13].

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Dentro de las estrategias del diagnóstico en línea, se han desarrollado métodos de diagnóstico no invasivo, donde la mayoría están orientados a la detección de descargas parciales por medio de la adquisición y procesamiento de señales, tales como ondas eléctricas [9], acústicas [10] y ópticas [11].

Otro método de diagnóstico no invasivo desarrollado corresponde al monitoreo por termografía infrarroja [13], por medio del cual se puede vigilar patrones inusuales de la temperatura en los devanados, radiadores y bujes del transformador.

Sin embargo, de la amplia gama de métodos de diagnóstico desarrollados, éstos no han determinado un único indicador que permita establecer el nivel de desgaste o envejecimiento del transformador. Que además, considere los principales indicadores de deterioro del transformador, como son: las descargas parciales, la deformación de los devanados, la alteración de la estructura del núcleo y el deterioro del aislante [1].

Adicional a los ensayos, hay métodos que consideran el juicio de un experto que valorará el estado de cada componente de la máquina basado en su conocimiento y experiencia como lo cita el texto de *T. J. Ross, "Fuzzy logic with engineering applications," Third Edition, A John Wiley and Sons, Ltd, USA, 2010.*

Con todo lo dicho, no se dispone de herramientas que integren los resultados de estas pruebas en un solo valor, que permita considerar las interrelaciones y contribuciones de cada elemento a la confiabilidad de todo el equipo, por lo que la valoración del nivel de vida útil remanente del transformador completo será imprecisa.

Por otro lado, el concepto de entropía nace del segundo principio de la termodinámica presentado por Clausius en 1865 quien trata de expresar con este concepto la transformación de la energía útil en otro tipo de energía. Más tarde Boltzmann reformuló el concepto, diciendo que la entropía es una medida del desorden del universo. La entropía puede definirse como el "avance natural de la destrucción" o "desorden inherente" a un sistema. Este principio establece que en cada instante el universo se hace más desordenado. Hay un deterioro general pero inexorable hacia el caos. Uno de los patrones fundamentales de comportamiento que encontramos en el mundo físico es la tendencia de las cosas a desgastarse o agotarse. Los edificios se derrumban, la gente envejece, las montañas y costas se erosionan, los recursos naturales se agotan, y todo sin retorno [15].

En síntesis, el caos representa a todos aquellos sistemas dinámicos en constante evolución, imposibles de predecir debido a la cantidad de variables que lo integran. Una mínima perturbación en sus condiciones iniciales puede producir inmensas alteraciones finales.

Esta invención soporta su base conceptual en los trabajos realizados por Richman y Moorman [16]. Basados de los trabajos por Claude E. Shannon y sus posteriores desarrollos derivados de la teoría de la información, específicamente en el desarrollo del concepto de entropía aplicado a series de tiempo discretas. Con los trabajos de Madalena Costa en el

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

área de la medicina [17] se ve en esta invención que la teoría es fácilmente aplicable para el diagnóstico de transformadores eléctricos.

Otros documentos valorados:

A continuación se presentan otros resultados de la búsqueda bibliográfica, en forma cronológica, para darle un mayor énfasis al enfoque de la invención. En este caso, se presenta la enumeración del documento, el tipo de documento, la fecha de publicación, él o los inventores, el solicitante, la referencia, resumen comentado y una breve descripción de la figura más representativa cuando sea el caso.

Documento A:

Artículo Científico

Título: Studies of condition of insulation in aged power transformers, Parte I y II.

Fecha de Publicación: Julio 1991

Autores: D. Allan C. Jones B. Sharp

Referencia: doi: 10.1109/ICPADM.1991.172272, Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials July 8-12, 1991 Tokyo, Japan.

Resumen: En este trabajo se describen técnicas de evaluación de la vida de aislamiento de un transformador, desarrolladas por la Comisión de Electricidad de Queensland, para la estimación de la vida útil disponible de sus grandes transformadores de potencia (método invasivo, requiere muestras del aceite).

Documento B:

Artículo Científico

Título: A Study of Wavelet Entropy Theory and its application in Power System

Fecha de publicación: Agosto del 2004

Autores: Zhengyou He, Yumei Cai, Qingquan Qian

Referencia: doi: 0-7803-8748-1/04, IEEE. 847 Proceedings of the 2004 International Conference on intelligent Mechatronics and Automation Chongdu, China Agosto de 2004.

Resumen: En este trabajo se establece que la predicción de fallas y de daños en el sistema eléctrico y la limitación de su incidencia ha sido el énfasis en el estudio de sistemas modernos de potencia. Los datos en tiempo real que se recolectan en el sistema eléctrico contienen la complejidad e incertidumbre del mismo sistema. Así entonces al combinar el análisis de una transformada matemática (transformada ondita), una técnica de análisis de tiempo y frecuencia y la teoría de la entropía resolvería el problema anteriormente descrito. Medias en línea de las variables eléctricas de tensión y corriente. Método invasivo.

Documento C:

Documento de Patente

Título: Transformer Performance Prediction.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Fecha de Publicación: 12/05/2005

Inventores: David N Cox, Tomás E Long, Karen J Smiley, John C. Sutton

Solicitantes: Abb Research LTD,; Cox, David, N, ; Long, Thomas, E, ; Smiley, Karen, J, ; Sutton, John, C.

Referencia: WO2005043340

Resumen: La invención divulga un método para predecir el rendimiento del transformador, el cual incluye la recepción de información representativa de una pluralidad de transformadores construidos, la información que comprende una especificación de diseño para cada transformador incorporado, y la información de las medidas de ensayo para cada transformador incorporado. La recepción de una segunda especificación del diseño de un transformador, se determina a través de un sistema inteligente, éste hace una predicción del ensayo, con esto obtiene un resultado que permite evaluar el rendimiento del transformador.

Además, Muestra el sistema inteligente recibiendo toda la información, del diseño en la fabricación, de las pruebas de laboratorio y de los resultados de las hojas de vida en la puesta en servicio que entrega el operador o usuario del transformador. Método de evaluación en línea pero no invasivo, porque requiere de la información en línea del comportamiento del transformador.

Documento D:

Artículo Científico

Título: Magnetic Flux Entropy as a Tool to predict Transformer's failures

Autores: J. H. Estrada, S. Valencia Ramírez, C. L. Cortés y E. A. Cano Plata.

Referencia: doi: 10.1109/tmag.2013.2260821, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 8, August 2013.

Resumen: Este documento propone la entropía de flujo magnético como otra técnica para evaluar las fallas de transformadores eléctricos. La herramienta a utilizar se obtiene basados en que la entropía puede revelar algunas irregularidades, distorsiones, sobrecarga, armónicos y el envejecimiento del transformador, mediante ondas senoidales eléctricas que suministran energía a las viviendas. Además de lo anterior, dentro de esta investigación se revisan conceptos de entropía y las ecuaciones básicas se aplican a los datos obtenidos a partir de ondas magnéticas y ondas de infrarrojo radiadas por el equipo medido.

Documento E:

Documento de Patente

Título: Método de control de fallas en el transformador

Fecha de Publicación: 05/02/2014

Inventor: Hu Dongbo

Solicitantes: Corporación Estatal de la Red Eléctrica de China, Red estatal de Xianning.

Referencia: CN103558479

Resumen: La invención se refiere a un método para el seguimiento de fallas dentro de un transformador. Dicho método se caracteriza porque se evidencian cambios en el colector de

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

corriente, realizando así un seguimiento a las fallas en el interior del transformador. Cuando se producen fallos en las bobinas del devanado del transformador, esto entregará los datos del cambio al colector de corriente, de modo que se juzga la falla que se produce en un cierto nodo dentro de los transformadores. El método se puede usar para monitorear los fallos dentro del transformador- es un método invasivo.

La figura más representativa de la patente, muestra los devanados del transformador, con tres puntos de toma de información a través de un colector, designado con el número 2, con ello se muestra que el método es completamente invasivo.

Documento F:

Documento de Patente

Título: Método económico de predicción de la vida del transformador de potencia basado en datos de su funcionamiento

Fecha de Publicación: 01/04/2015

Inventores: Du Zhendong, Zhao Wanfang, WANG Hui-fang, Wu Zhen, Huang Jinhua, Lan Chau, Dai Pan, Sun Feifei, Chen Zhiheng, Zhang Jie, Li Li

Solicitantes: Corporación Estatal de la Red eléctrica de China, Red Estatal de Zhejiang, Instituto de Investigación Económica.

Referencia: CN104484723

Resumen: La invención proporciona un método de predicción de la vida económica del transformador de potencia basado en la hoja de vida del transformador. De acuerdo con el método, se construye un modelo de predicción de la vida económica del transformador con el mínimo EUAC (equivalente al costo anual uniforme). Tomando como base la clasificación y la extracción de datos críticos, se realiza con datos de vida útil del transformador el modelo, para el cálculo de parámetros críticos en la tasa de falla. Con esto calcula la distribución de probabilidad para determinar el tiempo en que estará sin servicio. Luego obtienen un PHM (modelo de riesgo proporcional) y con el método de simulación de Monte Carlo, se analizan los elementos económicos y se realiza una predicción cuantitativa sobre la vida económica del transformador de potencia sobre la base del cálculo del costo anual de mantenimiento, del costo anual de interrupción y del costo anual de operación del transformador de potencia. Con la adopción del método, los datos de vida del equipo pueden utilizarse eficazmente, un resultado de predicción es razonable y el método tiene el significado de guía para las decisiones de operación y mantenimiento, así como para la planificación y transformación de futuras subestaciones de transformadores.

La figura más representativa, muestra el modelo de simulación de Montecarlo con su respectivo diagramas de bloque donde las ecuaciones se ponen en funcionamiento midiendo los parámetros de afectación económica más representativos como lo son la tasa de fallos y la tasa de “black out” o apagones que se pueda generar por la salida imprevista del transformador, usualmente debido a la falla de éste. (es un método de simulación para la predicción de la falla).

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Documento G:

Documento de patente

Título: Método de predicción de fallas del transformador basado en Datos del gas disuelto en el aceite del transformador.

Fecha de publicación: 5/08/2015

Inventor: Wang Feng, Mao Guanghui, Zhang Yuan, Chen Honggang, Bi Jiangang, Czipo

Solicitante: Instituto de Investigación de Energía Eléctrica, Corporación estatal de la red eléctrica de China, Compañía estatal de la red eléctrica en la provincia de Gansu

Referencia: CN104820146 A

Resumen: La invención proporciona un método de predicción de fallos del transformador basado en la monitorización de los datos del gas disuelto en el aceite del transformador. El método incluye los siguientes pasos: optimización de datos históricos en línea del gas disuelto en el aceite del transformador, identificación del modelo de los datos optimizados, estimación por autor regresión de los parámetros del modelo de media y el modelo de establecimiento. Con el método de predicción de fallos del transformador adoptado, a través del contenido del gas característico en el aceite del transformador se puede detectar las fallas del transformador y se pueden proponer medidas de mantenimiento. En comparación con técnicas anteriores, el método puede mejorar la calidad de la muestra del aceite (es un método invasivo), incorpora características individuales del transformador y reflejan una característica del gas disuelto en el aceite, pues éste cambia con el tiempo. Dado que los datos obtenidos mediante la adopción del método no cambian abruptamente, el método puede hacer una interpretación física más estable y concisa en comparación con un modelo de predicción que se establece a través de la adopción del aprendizaje tradicional de la máquina (como el caso de la patente anterior). Con el método de predicción de fallas del transformador, adoptado en este invención, la precisión de la predicción de datos en línea del gas disuelto en el aceite del transformador se puede mejorar, y las predicciones de la falla y las medidas de mantenimiento pueden ser más exactas y fiables, se puede proporcionar una garantía fiable para el mantenimiento y el uso del transformador y la vida útil del transformador puede ser prolongada.

La figura más representativa en la patente muestra un diagrama de flujo, donde la característica principal es la recursividad, que se logra para hacer un método de optimización con la técnica de programación lineal. Es de observar que la recursividad la hace sobre el método ARMA. (es un método invasivo, requiere de la muestra del aceite a ser analizada).

Documento H:

Documento de patente

Título: Sistema de evaluación del rendimiento del transformador del sistema eléctrico.

Fecha de publicación: 12/10/2016

Inventor: Lin Guangqin

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Solicitante: Lin Guangqin

Referencia: CN 106019091 A

Resumen: La invención evalúa la concentración de furanos disueltos en el aceite de la cuba del transformador, con esta medida determina el nivel de degradación del papel aislante. Con ello calcula el ciclo de vida del transformador. A través de los datos del aceite presente en el transformador, la influencia de la absorción del furano por el filtro de termosifón (centro de la invención) la medición y la precisión se mejora (es un método invasivo que requiere evaluar una muestra de aceite).

Documento I:

Artículo científico

Título: Life Assessment of Electric Arc Furnace Transformers

Autores: Eduardo A. Cano Plata, Oscar J. Soto Marin, Armando J. Ustariz Farfán

Fecha: 3/02/2017

Referencia: DOI: 10.1109 / TIA.2017.2688408/IEEE Transaction on Industry application versión de prueba 2017.

Resumen: Los transformadores eléctricos de hornos de arco son muy importantes en la industria de producción de acero. Actualmente, es muy común en las empresas de este tipo, comprar transformadores usados, esto por la enorme inversión que representa la adquisición de un nuevo transformador y también el retraso en la transacción de la compra. Antes de aceptar un acuerdo comercial y poner en funcionamiento el transformador, es necesario evaluar el nivel de desgaste debido a los esfuerzos electromagnéticos a los que está sometido el transformador. Para ello, se somete el transformador a pruebas eléctrica, pruebas mecánicas y de aislamiento, que siguen los procedimientos estipulados en guías y estándares, durante el proceso de compra con el fin de identificar fallas incipientes y determinar su condición general. Este artículo propone una metodología para llevar a cabo estas pruebas. Además, un nuevo modelo basado en la lógica difusa se aplica para evaluar el nivel de desgaste del transformador, su vida remanente, y su viabilidad de reutilización. Las variables de entrada difusas de este nuevo modelo son los resultados de las pruebas realizadas en cada condición del transformador.

Comentarios al respecto de la búsqueda bibliográfica:

Las diferencias técnicas entre la invención revelada en el presente documento y los desarrollos existentes son:

Todos los artefactos y procedimientos resaltados como relevantes, son eminentemente invasivos, además los que se hacen fuera de línea, requieren apagar el equipo que se va a diagnosticar, desconectando la energía eléctrica. Lo anterior, no solo implica un principio de funcionamiento diferente, sino que conlleva altos riesgos para el personal de mantenimiento por exposición a altos niveles de energía y elementos químicos como el aceite y los gases disueltos en la cuba del transformador.

Complementando lo dicho con anterioridad, el dispositivo que se pretende patentar es no invasivo y maneja procedimientos matemáticos, que no contemplan las invenciones

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

mencionadas.

Por lo tanto: Nuestra invención es un nuevo procedimiento y no comparte elementos comunes con las invenciones descritas.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION - SUMARIO

La presente invención se refiere a un procedimiento que utiliza la electrónica y se vincula a un a un método, estando caracterizada por consistir en el uso de una antena directiva con polo de media onda y ganancia de 40 db (db significa decibeles), un receptor de radio, un trípode, amplificador de microondas con ganancia de 33db, LED operando como indicador de encendido y todo lo anterior, se comunica con un sistema de adquisición de datos vinculado al procedimiento, que permiten la interpretación de las señales recibidas, determinando de modo no invasivo, el estado de funcionamiento y la cuantificación de la vida útil de transformadores eléctricos; lo anterior, utilizando la entropía para la interpretación de señales presentes en los campos magnéticos radiados por los transformadores. La invención se muestra en la figura 2.

El principio de funcionamiento de esta invención se resume de la siguiente manera:

Antena tipo corneta: La adquisición de las señales electromagnéticas radiadas del transformador se realiza mediante una antena tipo “corneta” que capta la señal emitida por el buje del transformador. El buje del transformador, actúa como una antena $\lambda/4$ (lambda cuartos) que transmite la señal que es procesada por esta invención.

Trípode: Sirve de apoyo a la antena tipo corneta, para evitar movimientos durante el periodo de registro.

Realización física del equipo: La señal electromagnética es procesada por medio de amplificadores con transistores de arseniuro de galio para poder registrarla de forma digital en el puerto de entrada de sonido del equipo que puede ser un portátil, tableta, celular o computador. El registro se realiza en un intervalo de 20 segundos. Este intervalo de tiempo asegura que la señal contiene suficientes muestras para poder realizar el análisis espectral.

Procedimiento: La señal se descompone en su contenido espectral, por medio de un filtro pasabandas de 30 Hz hasta 5 kHz y una transformada de Fourier con una ventana tipo Hanning. Posteriormente, se calcula la entropía multiescala de las magnitudes del contenido espectral de la señal. Mediante este proceso, se determina la variación de la señal electromagnética radiada por el transformador. Luego, se calcula el desgaste térmico del transformador a través de la temperatura de punto caliente del transformador, utilizando como variable de entrada la entropía de la señal electromagnética radiada. Por último, de forma similar al planteamiento de Arrhenius-Dakin se calcula la vida útil del transformador en función de la entropía inversa de la señal electromagnética.

De esta forma, se tiene que:

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

- La antena tipo corneta y el trípode son utilizados para la captación de la señal electromagnética radiada por el transformador.
- La realización física del equipo hace la adecuación de la señal y el registro de la señal electromagnética radiada por el transformador.
- Luego el procedimiento de la invención realiza el procesamiento e interpretación de la señal registrada entregando un valor cuantitativo de la vida útil del transformador. Es decir: hace una evaluación de la entropía inversa de la información de las señales de campo magnético radiado, sirve para determinar la temperatura de punto caliente del transformador. Con lo cual, las ecuaciones y conceptos de desgaste de transformadores con respecto a la temperatura son aplicables en relación a la variación entrópica de las señales magnéticas.
- Esta innovación, permite calcular la vida remanente del transformador teniendo como variable a ser procesada, la señal electromagnética radiada.
- El comportamiento de la entropía de las señales magnéticas capturada a través de la onda electromagnética radiada, se fundamenta en la constante de Boltzmann, es decir, se obtiene la cuantificación de la energía necesaria para cambiar la entropía de la onda electromagnética radiada en un nat, por el proceso de degradación térmica del transformador bajo prueba.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES
ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

PLIEGO DE FIGURAS

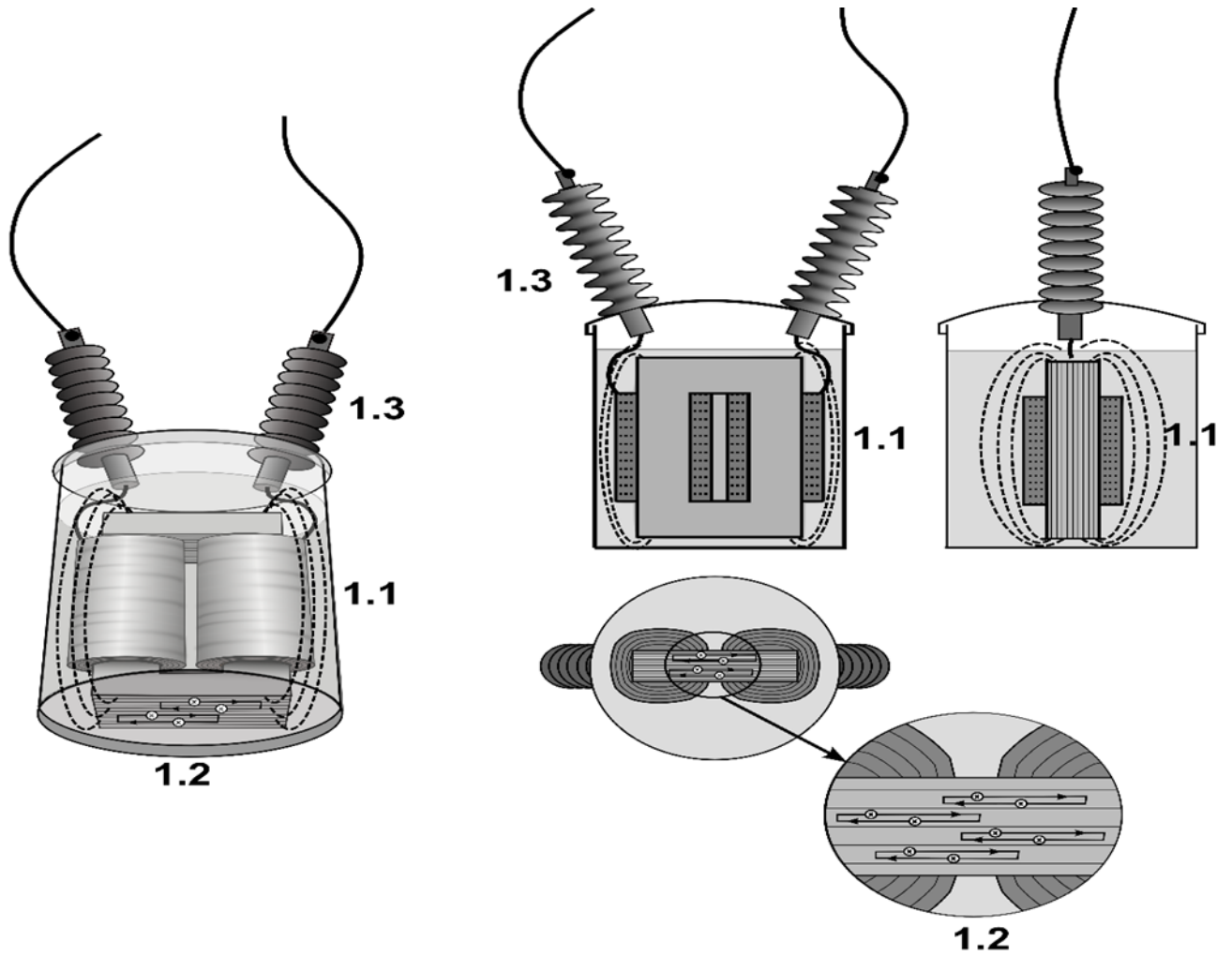


Figura 1

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

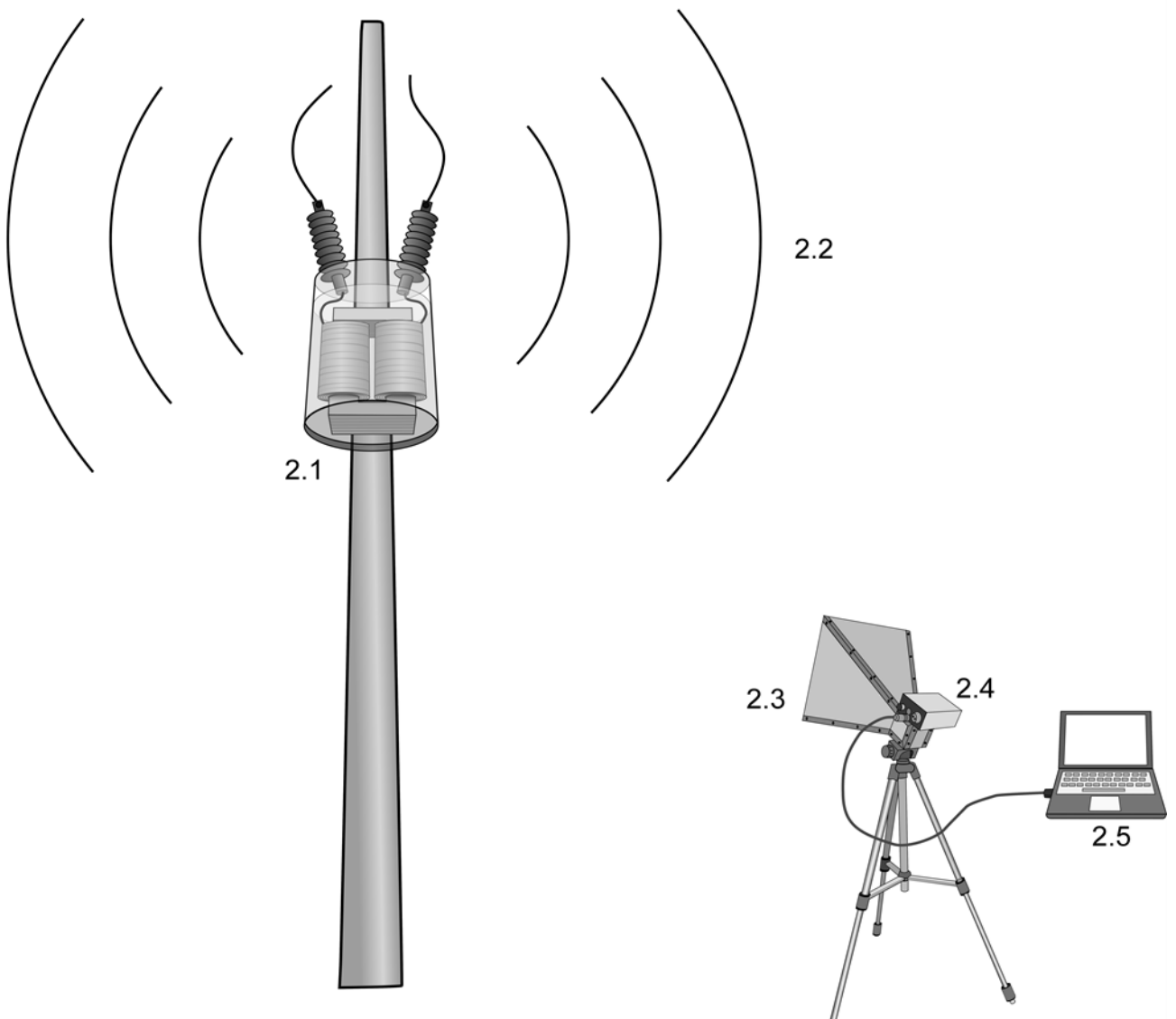


Figura 2

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

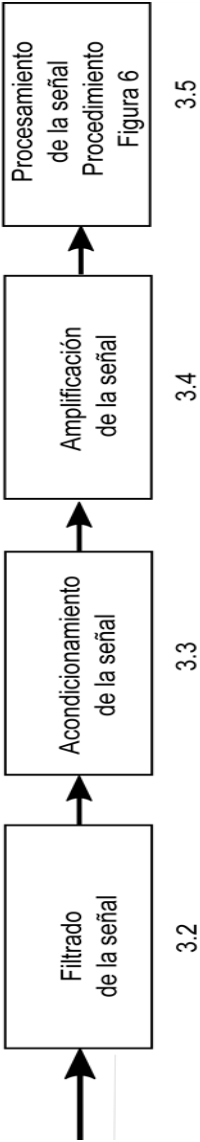


Figura 3.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

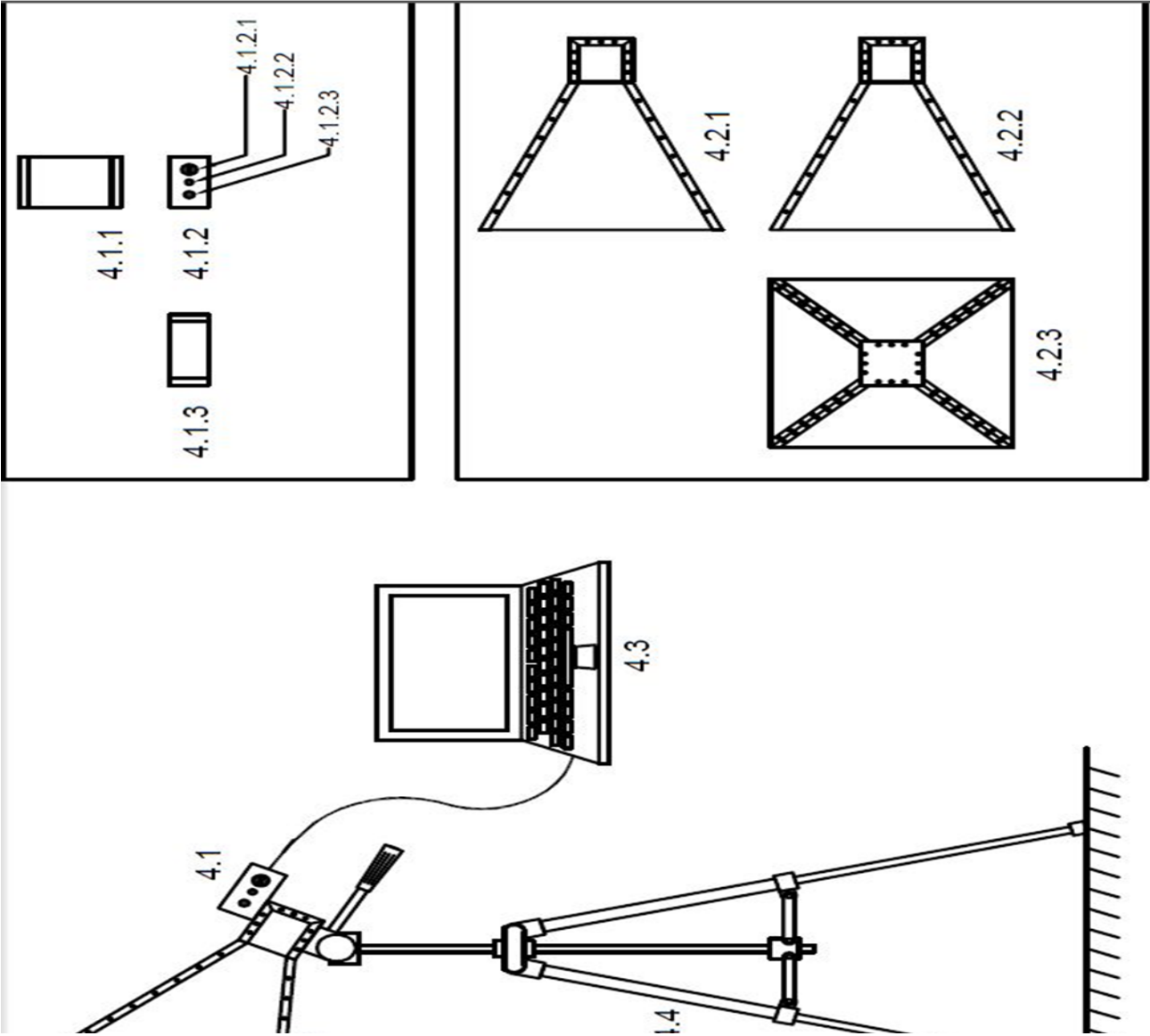
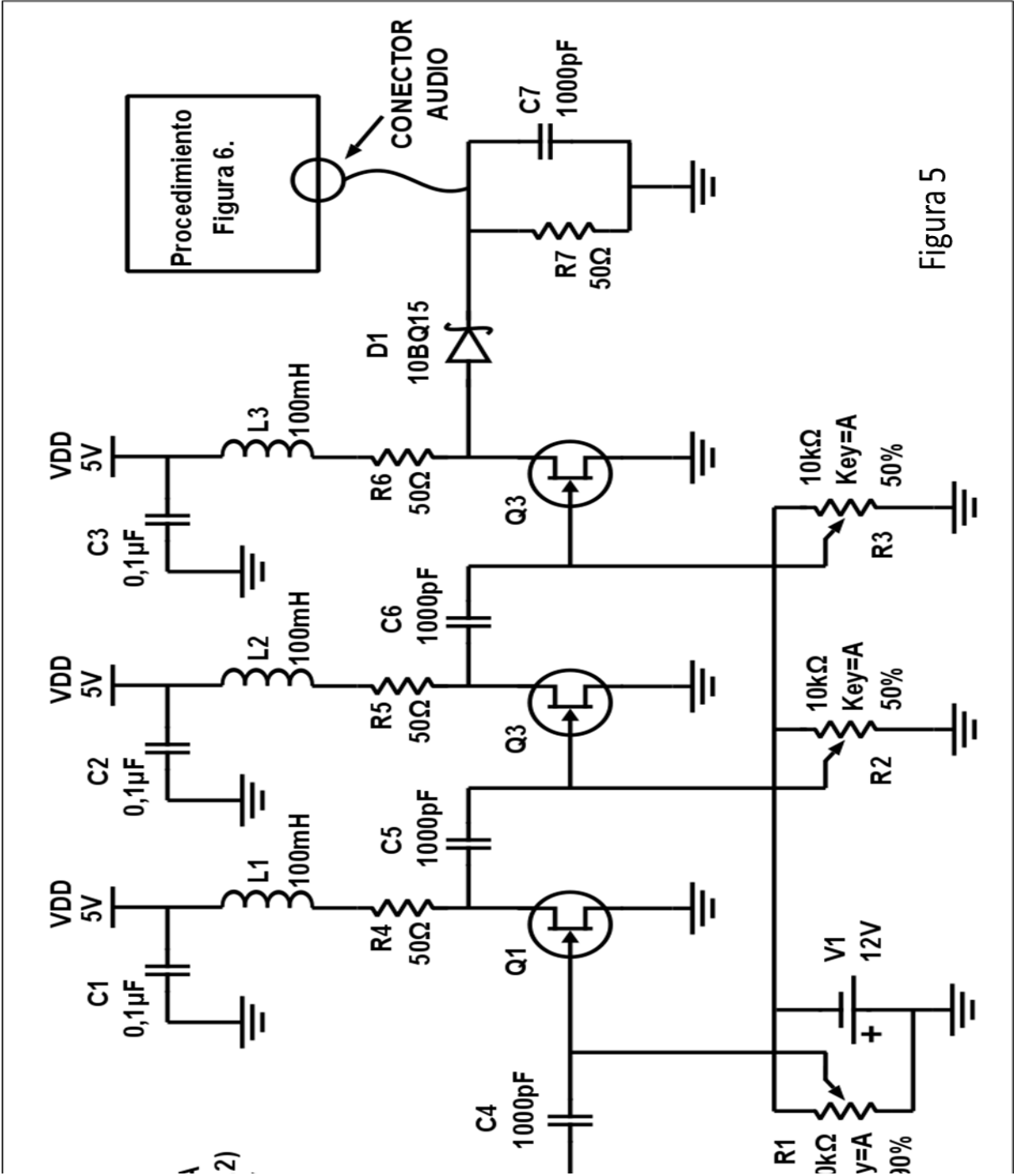


Figura 4.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS



PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

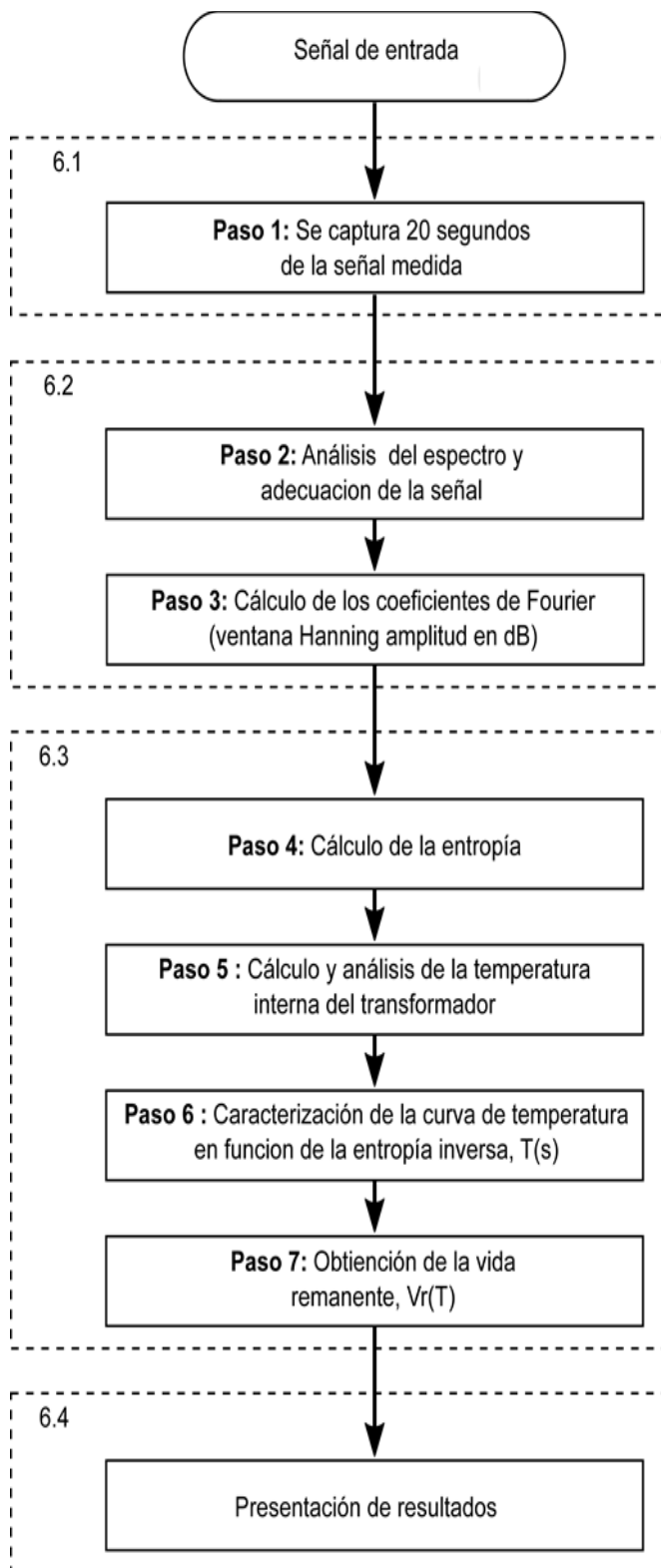


Figura 6.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES
ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

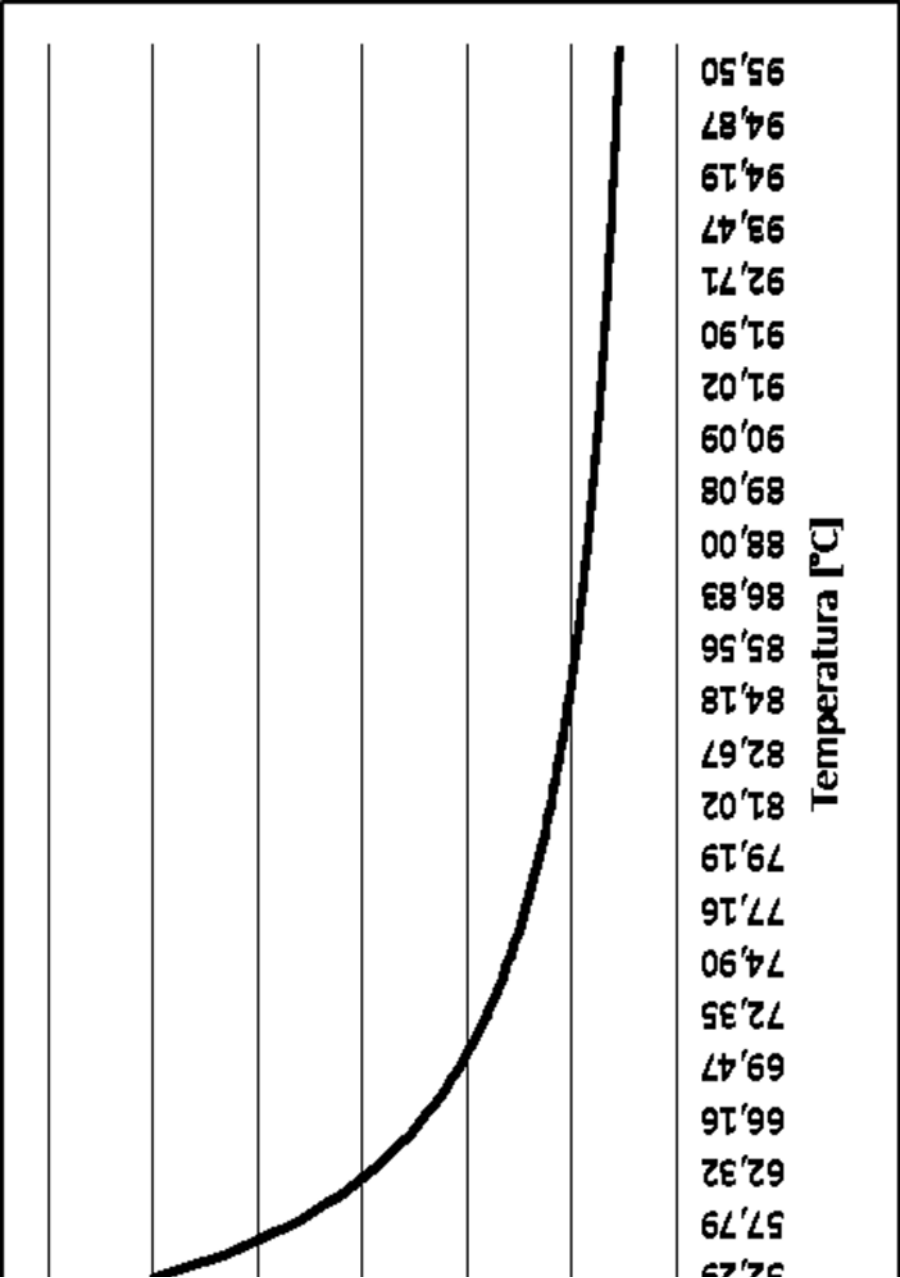


Figura 7.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

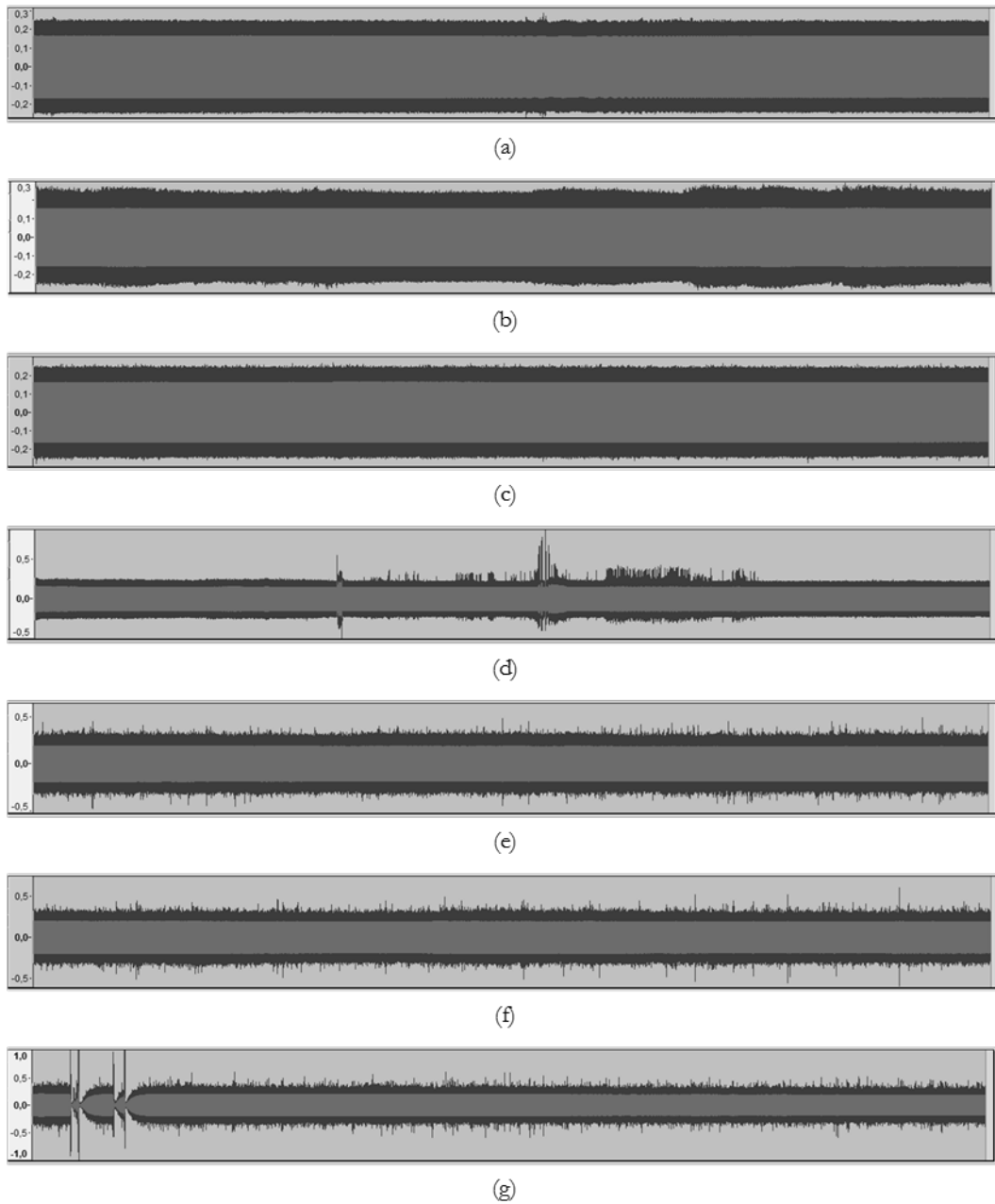


Figura 8

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

ARMONICOS IMPARES:
Propios de la saturación
magnética

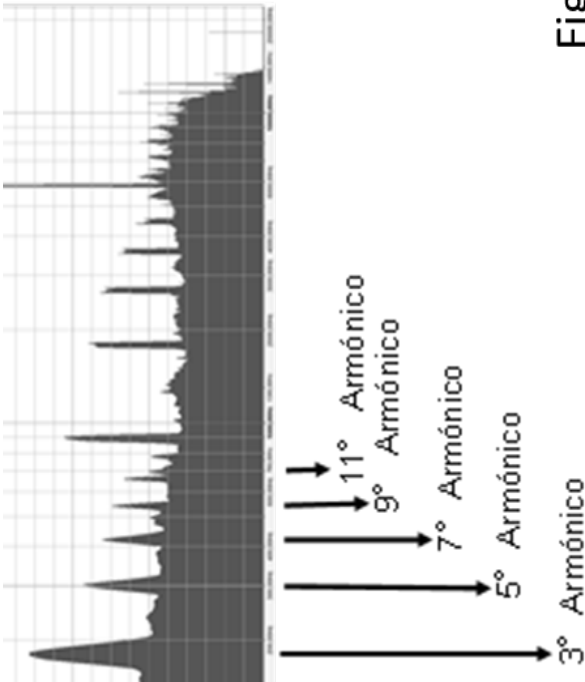
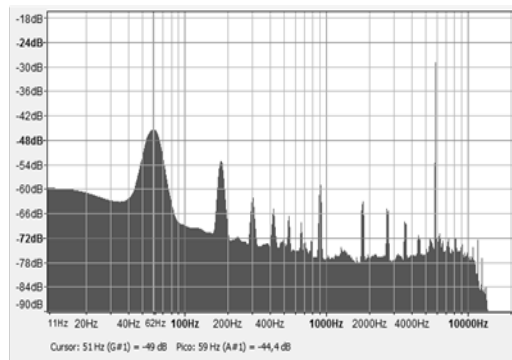
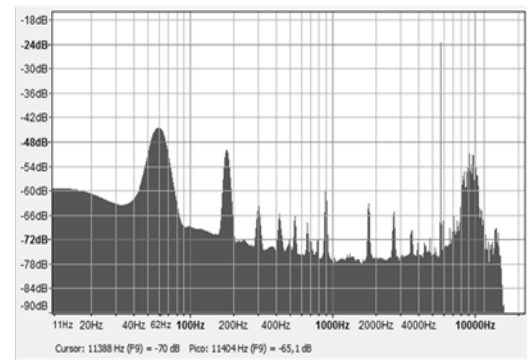


Figura 9

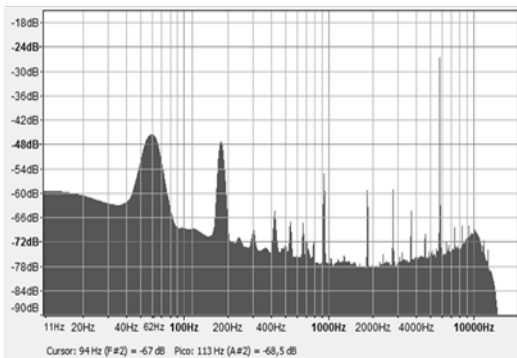
PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS



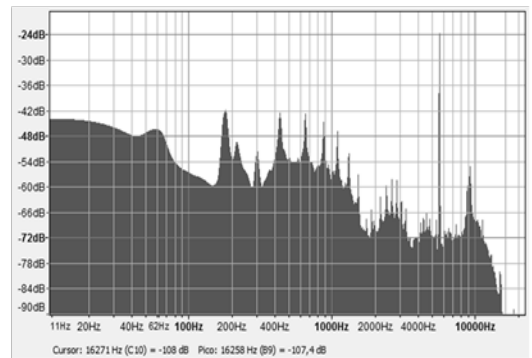
(a)



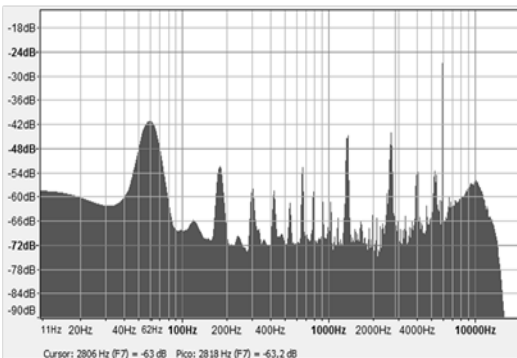
(b)



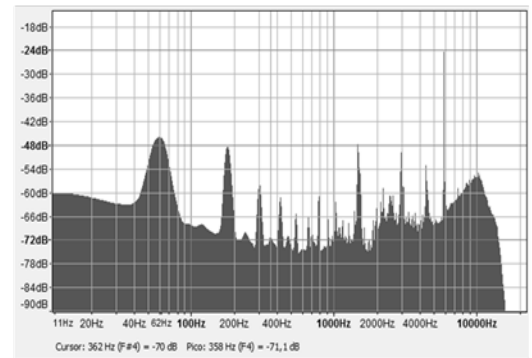
(c)



(d)



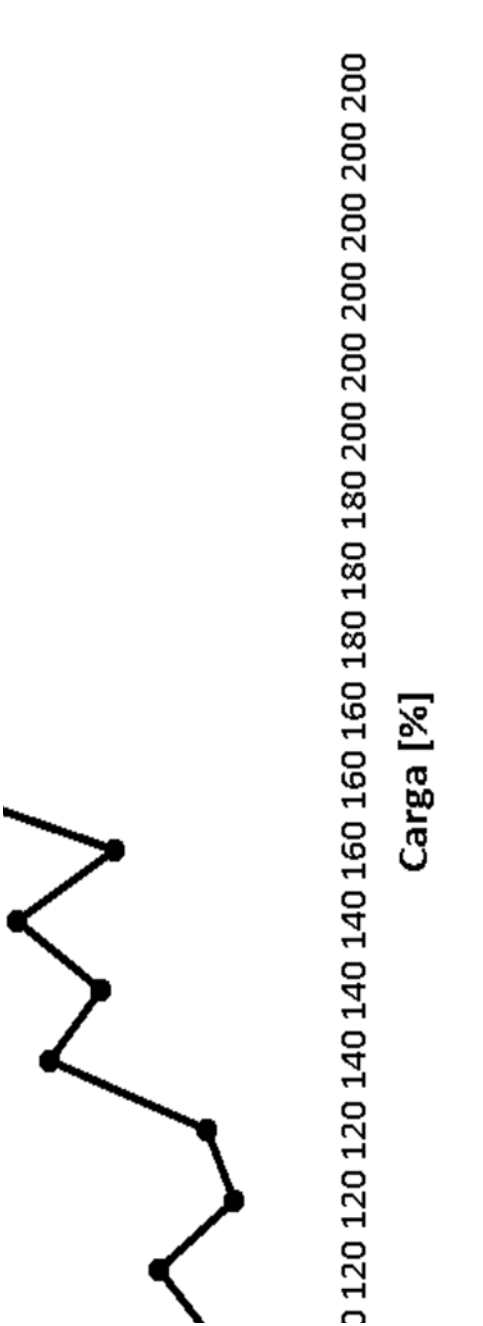
(e)



(f)

Figura 10

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS



PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

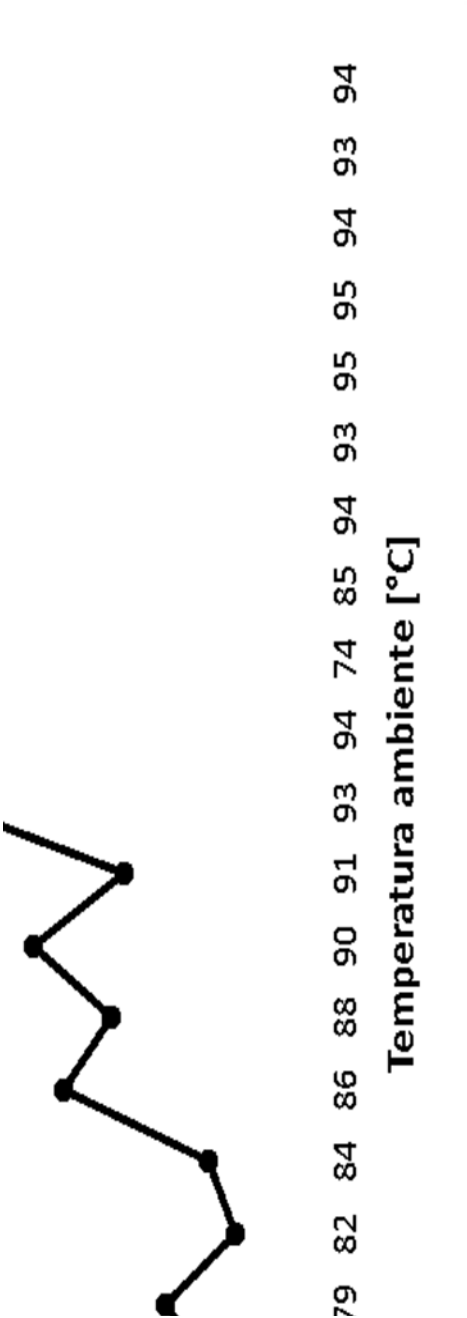


figura 12

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES
ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS



Figura 13

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

La figura 1, detalla la producción de microondas en un transformador. El dibujo isométrico de la figura 2, muestra en su conjunto el sistema. La figura sirve para esquematizar el lazo de unión entre la antena emisora de $\lambda/4$ configurada a través del núcleo del transformador y el tramo del conductor que va desde el devanado primario, pasa por el interior del buje y se conecta con la línea de transmisión y el receptor. La figura 2.1 muestra el transformador objeto de la medida como el elemento emisor de la onda electromagnética que se produce según la descripción desarrollada con la ayuda de la figura 1. La figura 2.2 muestra la onda electromagnética radiada, con la numeración 2.3, esta onda por la característica de la antena emisora es del orden de los 2.5GHz. Para lograr el lazo de conexión se destaca la antena directiva tipo corneta, esta antena tiene una cavidad de 7cm^3 con el objeto de hacer resonancia en la frecuencia radiada, en esta cavidad se ubica el dipolo lambda cuartos. En la figura 2, la numeración 2.4 hace referencia al sistema que acondiciona la señal. El anterior sistema está vinculado a un procedimiento enumerado como 2.4. La realización física de esta etapa está caracterizada por consistir en el uso de una antena directiva con polo de cuarto de onda y ganancia de 40 db, como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3. La cavidad de resonancia es de 7cm^3 donde se ubica el polo de la antena. Un receptor de radio descrito por los bloques 3.2 para el filtrado de la señal. La figura con la etiqueta de numeración 3.3 muestra el bloque destinado al acondicionamiento de la señal. La numeración 3.4 hace la amplificación de la señal y finalmente el bloque 3.5 donde se hace el procesamiento de la señal. La figura 4, muestra la vista lateral del equipo en su conjunto, con las tres vistas para la caja que guarda el circuito electrónico, el LED que hace las veces de piloto de energía es descrito por la figura 4.1.2.2, y la antena tipo corneta se apoya con un trípode, enumerado 4.4 en la figura 4. En la figura 5 se detalla el radio receptor y amplificador de microondas. A partir de la señal electromagnética adecuada se establece el procedimiento a través del diagrama de flujo de la figura 6 que procesa paso a paso hasta la obtención de la vida remanente del transformador bajo prueba. La figura 7 muestra la curva sobre la cual se demarca la vida útil del transformador a través de la relación entropía - temperatura. En la figura 8 se muestra los diversos estados de un transformador que se puso a prueba en un sistema de carga detallado en apartado del ejemplo. La figura 9, muestra las componentes espectrales del sistema medido. En la figura 10 se lleva a cabo la muestra de todas las componentes espectrales de las series de tiempo de la figura 8. La figura 11 muestra la relación de carga del transformador contra la entropía. La figura 12 muestra la relación de entropía contra la temperatura ambiente controlada. La figura 13 muestra la relación de entropía contra temperatura de punto caliente.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

DESCRIPCIÓN EXTENSA DE LA INVENCIÓN

Como se dijo anteriormente, pero ya en un sentido técnico más amplio, la presente invención se refiere a un procedimiento para la medición de la vida útil y el funcionamiento de transformadores eléctricos basado en la entropía de campos electromagnéticos radiados. La producción y radiación de la energía electromagnética en el transformador se muestra a través de la figura 1. En ella, se destaca la primera fase 1.1 que equivale a la producción y aceleración de un haz de electrones con la velocidad de modulación del haz se llega a una segunda fase, representada por la figura 1.2, que muestra la acción acumulativa de muchos electrones entre las placas del núcleo del transformador girando a una velocidad angular y alimentado por las corrientes parasitas del núcleo. Al entrar a los devanados estos electrones, producto de las corrientes parasitas del núcleo o de descargas parciales en el aislante del devanado o del aceite, se encuentran con el campo eléctrico del primario del transformador, que acelerará el movimiento en la misma dirección del campo, entregando así su energía a la guía de onda que se presenta a través del buje, mostrándose éste (el buje) en combinación con el conductor que va a la conexión con el sistema de transporte de energía, como un antena $\lambda/4$, esto se muestra en la figura 1.3. Así se produce la onda electromagnética radiada. Siendo esto, se tiene una frecuencia de radiación de microonda del orden de los 2.5 Ghz. Con ello, se procede al diseño de una antena tipo corneta para generar el radio enlace. Ésta como se describe en la figura 4, presenta una cavidad de corte frontal de tipo rectangular, de tal forma que maneje los dos planos tanto para el campo magnético como para el eléctrico, la cavidad final de los laterales termina con una profundidad de 7 cm; lugar donde se ubica el polo, quien captará la frecuencia de resonancia, la antena en su conjunto produce una ganancia de 40db (decibeles), es decir, se tiene una antena directiva de media onda.

Los anteriores elementos actúan captando las ondas que son producidas por las descargas parciales o la vibración granular magnética en el núcleo del transformador (conocidas en Estados Unidos como corrientes de “Eddy” y en Europa como corrientes de “Foucault”) que se va a diagnosticar (en esta invención son llamadas “corrientes parasitas del núcleo”), las cuales viajan hasta el receptor.

El receptor descrito por la figura 5, consta de la conexión en cable coaxial desde la antena de la figura 4 con la compuerta de un transistor Q1 basado en un transistor FET (de sus siglas en inglés – Transistor de efecto de campo) de arseniuro de galio; La antena transfiere la onda emitida por el transformador a examinar, a través del condensador C4 a la compuerta del transistor Q1. Como se muestra en el esquemático de circuito de la figura 5.

La onda así recibida y seleccionada en frecuencia por la frecuencia de corte formada por C4 y la resistencia de entrada de Q1 es amplificada por un valor aproximado de 11 decibeles.

Las etapas formadas por Q1, Q2 y Q3 son idénticas (todos los transistores son de arseniuro de galio), lo cual arroja una ganancia total de 33 decibeles aproximadamente.

La polarización de los tres transistores Q1, Q2 y Q3 se realiza por medio de los circuitos formados por la fuente de 12 voltios y tres potenciómetros de 10kohm. Ahora bien, un

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

potencial negativo es aplicado en la compuerta de tal forma que se establezca una tensión aproximada de -1 Voltio entre compuerta y surtidor para cada uno de los transistores. Las cargas en colector de los tres transistores están formados por tres resistores de 50 ohmios para cada transistor con el fin de crear un acople con las resistencias de entrada de cada uno de ellos, adicionalmente, aparece un inductor de 100 μH el cual esta derivado por los capacitores C1, C2 y C3 (todos capacitores de polipropileno) los cuales evitan que la señal se pueda entrar a la fuente de alimentación ocasionando perturbaciones indeseables. Lo anterior con el fin de evitar que potenciales de interferencia presentes en la fuente de alimentación ingresen a los tres transistores.

Una vez que la señal es amplificada a 33 decibels por las 3 etapas, es demodulada por el diodo D1 en unión con R7 y C7 (R7 Resistor de limitación y C7 Capacitor de acople, recuperándose la envolvente de la onda modulada por las descargas parciales, en el caso de que estas ocurriesen, o por el campo magnético de las corrientes parasitas en el núcleo del interior del transformador.

La salida tomada en el cátodo del diodo Shottky es aproximadamente de 1 mili voltio. La conexión entre la salida del receptor y el dispositivo de cómputo o hardware, se realiza mediante un cable de micrófono.

La señal es adquirida por el DSP del dispositivo de computo o hardware, figura 4 enumeración 4.3 y sometida al procedimiento que se muestra en la figura 6, Luego es mostrada en la pantalla del dispositivo, entregando los datos relativos a la edad estimada y estado del dispositivo que se está diagnosticando como lo muestra el diagrama de flujo de la figura 6.

Para la realización del presente procedimiento, se utilizan los elementos antes descritos, ensamblados en un objeto como el que se muestra en la figura 4.

En el dibujo presentado en la figura 5, se muestra el plano eléctrico y electrónico de los elementos que se utilizan para lograr el “PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL de transformadores eléctricos BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS”

CADA UNO DE LOS PASOS DEL PROCEDIMIENTO SE DESCRIBE A CONTINUACIÓN:

La figura 6 es el flujo grama del procedimiento.

Bloque de la Figura 6.1 (captura de datos): Captura de 20 segundos de la señal proveniente del radio receptor descrito y representado por la figura 5 a través del puesto de sonido de una tableta, celular o computador.

Antes de calcular la entropía de la señal de campo magnético, es necesario obtener un intervalo de tiempo que contenga suficientes muestras para poder realizar un análisis de espectro. Este proceso permite la extracción de las frecuencias de interés.

Para esto, es necesario:

Paso 1: Extraer un intervalo de tiempo de 20 segundos de la señal medida. La frecuencia de muestreo debe ser de 44.1 kHz.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Posteriormente, la selección es exportada filtrada y tenemos así una serie de tiempo

$$\text{señal} = \{x_1, x_2, x_3, \dots\} \quad (1)$$

Logrando el mejor ajuste con la envoltura del evento oscilante que caracteriza la señal de campo magnético radiado y que pone en evidencia el efecto de descarga parcial o deterioro del transformador por pérdidas en el núcleo.

Bloque de la Figura 6.2 (Pre-procesamiento): Pre-procesamiento de la señal de campo magnético.

Paso 2: Análisis del espectro y adecuación de la señal.

Para realizar el análisis de espectro, es importante destacar lo siguiente:

El espectro de la señal medida es obtenido a partir del promedio de las componentes de frecuencia de bloques de la señal. Para esto, la señal es dividida en bloques con una cantidad de muestras de 32768 datos.

La resolución en frecuencia (f_r) está definida directamente por la frecuencia de muestreo ($f_s = 44.1$ kHz) y el tamaño de los bloques utilizados en la transformada rápida de Fourier ($N = 32768$), tal como se describe en la ecuación (2).

$$f_r = (f_s/2)/(N/2) \quad (2)$$

La resolución en frecuencia es de 1.34 Hz. Esta resolución, permite analizar desde la frecuencia fundamental (60 Hz) hasta altas frecuencias.

Paso 3: cálculo de los coeficientes de Fourier:

Posteriormente, se genera un ventaneo a cada bloque de la señal antes de calcular su espectro. La selección de la ventana Hanning, se ha definido ya que proporciona una atenuación de discontinuidades en los límites de los bloques, lo cual permite que el espectro obtenido no se vea afectado por ruido en la señal.

Para obtener las componentes de frecuencia de cada bloque, se utiliza el algoritmo de transformada rápida de Fourier (FFT).

El resultado es el vector o serie de frecuencias:

$$\text{Componentes en frecuencia } X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_N\} \quad (3)$$

Se ha limitado el análisis a un ancho de banda que revele el deterioro del transformador. Se ha decidido analizar el espectro entre 30Hz y 5000 Hz para campo magnético dentro de la onda electromagnética radiada. Para limitar el análisis a estas frecuencias, se aplica un filtro pasa bandas con estas frecuencias de corte.

Bloque de la Figura 6.3 (Aplicación de las ecuaciones):

Paso 4: Cálculo de la entropía: fundamentado en los estudios de Madalena Costa

Luego, es calculada la entropía a la magnitud de las frecuencias del ancho de banda de interés (30 a 5000 Hz). El cálculo de la entropía se realiza como se explica a continuación:

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Dada una serie discreta $X=\{X_1, \dots, X_i, \dots, X_N\}$ resultado del paso anterior, con N el número natural que cuenta los elementos de la serie, se construyen nuevas series $y^{(j)}$ cuyos términos son promedios de elementos consecutivos de la serie original, sin que haya solapamientos; τ corresponde a un factor de escala. Cada elemento generado de la serie es calculado mediante la ecuación 4. Así, para una escala temporal igual a 1 ($\tau=1$), la serie $y^{(1)}$ será igual a la serie original; para una escala 2 la nueva serie estará formada por el promedio de los elementos tomados de dos en dos y así con cada escala.

$$y_j^\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} X_i, \quad 1 \leq j \leq \frac{N}{\tau} \quad (4)$$

La longitud de cada nueva serie generada es igual a la longitud de la serie original dividida por el factor τ . Finalmente, cada nueva serie representa una nueva función de escala de factor τ . Cada serie, es entonces procesada de la siguiente forma, para el caso de un vector de longitud 2:

$$\begin{aligned} &\text{Serie de componentes de Fourier } X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_N \\ &\text{creando los vectores } u_m(i), \dots, u_m(N-m+1) \\ &\text{de longitud } m = 2 \\ \text{vectores} = &\begin{cases} u_2(1) = X_1, X_2 \\ u_2(2) = X_2, X_3 \\ \vdots \\ u_2(i) = X_i, X_{i+m-1} \\ \vdots \\ u_2(N-m+1) = X_{N-m+1}, X_N \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

En la ecuación 5, se muestra la construcción de vectores de 2 dimensiones para una serie de N datos; de forma que, el primer vector contiene los dos primeros elementos de la serie; el siguiente vector, contiene el último elemento del vector anterior y el siguiente elemento de la serie hasta obtener $N-m+1$ vectores. Posteriormente, se define la distancia entre los vectores $u_m(i)$ y $u_m(j)$ como el máximo del valor absoluto de la diferencia entre las componentes de los vectores:

$$d[u_m(i), u_m(j)] = \max_{k=1, \dots, m} (|u(i+k) - u(j+k)|) \quad (6)$$

A partir de dicha distancia, ecuación (6), se considera a $C_i^m(r)$ como la probabilidad de que un vector $u_m(j)$ se encuentre cercano a un vector $u_m(i)$, es decir, el número de $j(1 \leq j \leq N-m+1)$ tales que: sea $d[u_m(i), u_m(j)] \leq r$ dividido por el número de vectores extraídos de la serie de tiempo. Por lo tanto, para $(1 \leq j \leq N-m+1)$.

$$C_i^m(r) = \frac{\text{número de } j \text{ tales que } d[u_m(i), u_m(j)] \leq r}{N-m+1} \quad (7)$$

Los valores de $C_i^m(r)$ en la ecuación (7), miden la regularidad o frecuencia de valores similares dada la longitud “ m ” dentro de la tolerancia “ r ” estase define por el valor de la

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

amplitud que da la ganancia de la onda radiada. A partir de los valores de $C_i^m(r)$, se calculan los elementos de S (la entropía multiescala) como:

$$U^m(r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} C_i^m(r) \quad (8)$$

$$U^{m+1}(r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} C_i^{m+1}(r) \quad (9)$$

A partir de estas ecuaciones (8) y (9), se define S a partir del número de parejas $u_m(i)$, $u_m(j)$ que cumplen con el parámetro r , tal que $d[u_m(i), u_m(j)] \leq r$ y que $i \neq j$, es decir, no se tiene en cuenta el emparejamiento de un vector consigo mismo.

Las diferencias entre $U^{m+1}(r)$ y $C^{m+1}(r)$, $U^m(r)$ y $C^m(r)$, se centra en la exclusión de los emparejamientos o relaciones mutuas, es decir, los vectores no son comparados consigo mismos y de la serie de N puntos a evaluar sólo son considerados los vectores $u_m(i)$ de longitud m para $1 \leq i \leq N-m$. Los vectores $u_m(i)$ de longitud $m+1$ se define de igual forma.

Este es el vector de elementos calculado para la determinación y evaluación de la estadística de la entropía multi-escala (m) de la serie resultante de aplicar la FFT a una señal medida con N elementos y un factor de regularidad r como se muestra en la ecuación (10):

$$S = -\ln \frac{U^{m+1}(r)}{U^m(r)} \quad (10)$$

S corresponde al negativo del logaritmo natural de la probabilidad condicional de las secuencias cercanas para m puntos consecutivos en una serie de N elementos. La unidad de medida de S es el nat.

A partir de este proceso, se obtiene la entropía a diferentes múltiples escalas; para cada señal de campo magnético registrada por la invención. Con este método, se puede verificar la variación que presenta una señal; en condiciones de alta variabilidad, se presentaran valores de entropía mayores.

Paso 5: Cálculo y análisis de la temperatura interna del transformador:

Tras calcular los valores de entropía de cada señal de campo magnético del transformador, se genera la relación entre la entropía de las señales de campo magnético con relación a la temperatura ambiente y temperatura de punto caliente interno dentro del transformador bajo prueba. Este proceso, se realiza para identificar la relación de la entropía con el envejecimiento del transformador de la siguiente forma:

Se hace un ajuste de las curvas de envejecimiento de los transformadores y determinación de la inercia térmica:

Los valores de edades cronológicas bajas (0 – 5 años) en transformadores de distribución, tienen valores de entropía entre 0.2 y 0.6 nats. Estos valores confirman que los transformadores en buen estado tienen valores bajos de entropía. Por otra parte, es notoria una tendencia a incrementar los valores de entropía a medida que el transformador

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

envejece. En el caso de los transformadores de una edad superior a 10 años, aumenta a valores de entropía superiores a 0.8 nats. Como se puede verificar en la figura 7.

El proceso utilizado para el cálculo de la vida útil (V.U.) de los transformadores, es adoptado del modelo de Arrhenius – Dakin mostrado en la ecuación (11), la cual relaciona la vida útil (V.U.) con el aumento de temperatura.

$$V.U. = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (11)$$

Este modelo, relaciona la vida del aislamiento eléctrico con la fatiga simple (temperatura) del transformador. Como lo describe la ecuación, un aumento de temperatura durante la operación normal del transformador corresponde a la disminución en su vida útil. El modelo asume que el deterioro causado por esfuerzos eléctricos, mecánicos o factores medioambientales no tiene un impacto notable en la vida del aislamiento durante operación normal. En esta ecuación, “A” representa la vida inicial para una condición de temperatura dada, “B” corresponde a la energía de activación la cual es la causante de la rotura de los enlaces en las cadenas poliméricas y “T” es la temperatura de punto caliente del transformador.

Proyectado una temperatura de punto caliente de 98°C cuando se parte de 20°C de temperatura ambiente, equivale a una degradación aceptable del transformador, manejando como límite una temperatura de punto caliente de 140°C. Para efectos de esta invención, un transformador a temperaturas ambiente de 95°C y sobrecargas de 200% de la potencia nominal, implica superar el límite de 140°C.

Gracias a estos resultados, en la ecuación (11) se enfatiza entonces cual es el desgaste típico (diario nominal), diferenciándolo de un desgaste total del transformador.

Ahora bien, para poder generar una aplicación con el proceso del cálculo de la vida remanente, es necesario llevar el valor medido (de entropía y temperatura) a la forma de la ecuación (11). Por ello, se concluye que la entropía inversa (S^{-1}) en función de la temperatura es la disminución de la vida útil. Es claro que la representación de la ecuación (11) a una temperatura dada implica una frecuencia de giro del fasor que representa, que es la misma ecuación (11). Además, es justo la amplitud de la componente de Fourier que se evalúa desde la onda electromagnética radiada por el buje.

Es decir: una evaluación de la entropía de la información de las señales de campo magnético, sirve para determinar la vida remanente del transformador pues caracteriza al modelo térmico de los transformadores.

Para cuantificar el envejecimiento de los transformadores debe realizarse una equivalencia entre la temperatura ambiente y la entropía calculada. Por ejemplo, para un valor de S^{-1} superior a 1.8 [1/nats] la temperatura equivalente (T_{Seq}) es menor a 55°C y el transformador está en condiciones óptimas; por otra parte, para un valor de S^{-1} de 0.8 [1/nats] T_{Seq} es superior a 95°C y se considera un envejecimiento máximo.

Con estos valores, se puede realizar una escala, esto es: una temperatura ambiente menor a 55°C no alcanza a superar los límites de degradación considerados normales (140°C de temperatura de punto caliente), por otra parte, una temperatura ambiente de 95°C

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

puede representar valores de temperatura de punto caliente superiores a 140°C, e incluso, si la sobrecarga es muy alta, puede ser superior a 300°C.

Debido a que los transformadores tienen una inercia térmica es necesario ajustar los valores de los transformadores que se evalúen para que coincidan con la observación del inverso de la entropía.

Se considera a “ k ” como el inverso del valor de entropía de inercia térmica y se calcula tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$k = \frac{1}{|S_{25^\circ} - S_{95^\circ}|} = \frac{1}{|0.2 - 0.6081|} = \frac{1}{0.4081} = 2.45 \quad (12)$$

Con la ecuación 12, se considera la forma de medir un valor de entropía menor a 0.6 y tener una aproximación con el comportamiento registrado en su inercia térmica que se fundamenta en la constante de Boltzmann, es decir, la teoría de la mecánica estadística, conceptualiza la medida de la serie por la entropía numérica de sus coeficientes de Fourier, que es la entropía reajustada por Calude Elwood Shannon. Aquí el cambio de 2.45 es la energía necesaria para cambiar la entropía de la onda electromagnética radiada en un [nat] por la agitación interna del transformador que la irradia. Que se presenta en el proceso de degradación térmica cuando las pérdidas en el núcleo o las descargas parciales son tales que mueven en un valor incremental la entropía.

Paso 6: Caracterización de la curva de temperatura en función de la entropía inversa

A partir de esto, es necesario relacionar el resultado de la temperatura equivalente para generar una nueva ecuación cuantitativa del estado de envejecimiento de los transformadores para su gestión de activos. Teniendo en cuenta esto, se ha designado el parámetro “ A ”, equivalente a la vida útil del transformador en condiciones óptimas (35 años según las normas y especificaciones de los fabricantes de tomado a nuevo el transformador). Así, se proporciona un estimativo de la vida útil del transformador a largo plazo, tal como es requerido.

Esta invención ha generado la nueva ecuación (13); que relaciona, la temperatura ambiente equivalente con la entropía de la información de la señal de campo magnético.

$$T_{Seq} = \frac{3A}{\ln(S^{-1} + k)} \quad (13)$$

Mediante la ecuación (13), para un valor de S^{-1} de 5[1/nats] se obtiene una temperatura ambiente equivalente de 52.29°C y para S^{-1} de 1,8[1/nats] una temperatura de 72°C; en la figura 7, se muestra la nueva forma de la entropía inversa en función de la temperatura ambiente.

Bloque de la Figura 6.4: presentación de resultados

Paso 7: Obtención de la vida remanente.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Tomando como base la ecuación (13) con los valores de temperatura equivalente, el siguiente paso es mapear estos valores a vida remanente en años; para lo cual, se utiliza una relación inversamente proporcional que corresponde a una temperatura equivalente de 95°C equivale a 0 años de vida remanente en el transformador; mientras que, una temperatura de 58°C corresponde a una vida remanente de 35 años. Utilizando los valores de T_{Seq} , la ecuación de la vida remanente (V.R.) se describe en (14).

$$V.R = aT_{Seq} + b \quad (14)$$

Donde, el valor de pendiente a es -0.9189 y el valor independiente b es de 88.29 en la ecuación (14).

De los resultados de las deducciones previas, se han generado las dos nuevas ecuaciones (13) y (14) que son implementadas en el procedimiento de la invención. Con esto, se proporciona una forma de cuantificar la vida remanente de los transformadores a través de un método no invasivo.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Ejemplo

Se utiliza el Procedimiento y la realización física para la medición de las señales de campo electromagnético radiadas por un proceso de envejecimiento acelerado de un transformador de 10kVA, 13.2kV/220V.

En el desarrollo del ejemplo, se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Elevar la temperatura de punto caliente a niveles superiores a 300°C, para generar un deterioro acelerado de los componentes del aislamiento del transformador.

Objetivos específicos:

- Generar temperaturas ambiente promedio entre 60°C y 90°C.
- El transformador que se somete al ensayo genera un registro con los siguientes parámetros:
 - Tiempo de exposición.
 - Temperatura ambiente en el momento de cada medición.
 - Porcentaje de sobrecarga aplicado.
 - Temperatura de punto caliente esperada

Un detalle del registro del transformador se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Registro del Transformador bajo prueba

Características del transformador a ensayar							
Hora inicio:	12:09 pm	Monofásico Trifásico	Monofásico	Potencia nominal	15 kVA	Corriente nominal BT	62,5 A
Hora final:	05:00 pm	Código Transformador	17640TR1	Tensión nominal AT	13,2 kV		
Rural/Urbano	Rural	Fecha [dd/mm/aaaa]:	09/12/2015	Tensión nominal BT	120/240 V	Método de carga	Simulada Espalda-Espalda
Temperatura mínima [°C]		68,00	Temperatura máxima [°C]	95,70	Temperatura promedio [°C]		88,50
Registro de las mediciones							
Prueba realizada	Señales medidas	Hora de medición	Corriente BT [A]	Temperatura [°C]			Porcentaje de carga [%]
				Ambiente	De punto caliente	Promedio	
1	Micro Ondas	12:09 p. m.	62,5	68,00	145,2	149,7	100
	Micro Ondas	12:19 p. m.	62,5	73,00	150,2		
	Micro Ondas	12:29 p. m.	62,5	76,50	153,7		
	Micro Ondas	12:40 p. m.	75	78,80	179,7952	182,26	120
	Micro Ondas	12:50 p. m.	75	81,50	182,4952		

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

	Micro Ondas	01:00 p. m.	75	83,50	184,4952	216,68	140
	Micro Ondas	01:11 p. m.	87,5	85,60	214,7168		
	Micro Ondas	01:21 p. m.	87,5	87,60	216,7168		
	Micro Ondas	01:31 p. m.	87,5	89,50	218,6168		
1	Micro Ondas	01:41 p. m.	100	91,20	252,7648	254,26	160
	Micro Ondas	01:51 p. m.	100	92,70	254,2648		
	Micro Ondas	02:01 p. m.	100	94,20	255,7648		
	Micro Ondas	02:39 p. m.	112,5	73,70	272,0392	282,60	180
	Micro Ondas	02:50 p. m.	112,5	85,00	283,3392		
	Micro Ondas	03:00 p. m.	112,5	94,10	292,4392		
	Micro Ondas	03:10 p. m.	125	92,60	332,04	333,30	200
	Micro Ondas	03:20 p. m.	125	94,50	333,94		
	Micro Ondas	03:30 p. m.	125	94,50	333,94		
2	Micro Ondas	03:40 p. m.	125	93,50	332,94	334,20	200
	Micro Ondas	03:50 p. m.	125	92,80	332,24		
	Micro Ondas	04:00 p. m.	125	93,70	333,14		
	Micro Ondas	04:10 p. m.	125	95,50	334,94		
2	Micro Ondas	04:20 p. m.	125	95,40	334,84	334,20	200
	Micro Ondas	04:30 p. m.	125	95,50	334,94		
	Micro Ondas	04:40 p. m.	125	95,40	334,84		
	Micro Ondas	04:50 p. m.	125	95,40	334,84		
	Micro Ondas	05:00 p. m.	125	95,70	335,14		

Tal como se ve en la tabla 1, el transformador reporta por cada ensayo una cantidad de mediciones con las que se generan las relaciones según su tiempo de exposición en función de la sobrecarga y la temperatura de exposición. Para el transformador de la tabla 1 del ejemplo, se adquiere un total de 27 mediciones, con los incrementos de carga hasta llegar al 200%.

En el desarrollo del ensayo se generan temperaturas ambiente máximas controladas en una recámara térmica de 94,77°C y temperaturas de punto caliente superiores a 300°C.

Como se puede ver en la Tabla 1 el transformador se ve sometido a temperaturas ambiente de 94°C en los intervalos de mayor esfuerzo eléctrico (200% de sobrecarga).

Con estos resultados, se logra alcanzar la energía de activación y romper los enlaces químicos de los elementos aislantes del transformador.

Tras generar un envejecimiento acelerado al transformador en laboratorio, se realiza un análisis de las señales de campo magnético a través del procedimiento objeto de esta

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

invención.

Análisis de las señales de campo magnético medidas en laboratorio

La evidencia del envejecimiento del transformador bajo la prueba en laboratorio, se detecta estudiando las señales medidas con el equipo objeto de la invención. En este proceso, las señales del transformador, se muestra en la figura 8 que registra los veinte minutos de cada incremento de carga, siendo: (a) 100% de carga, (b) 120% de carga, (c) 140% de carga, (d) 160% de carga, (e) 180% de carga, (f) 200% de carga y (g) 200% de carga con cortocircuito inducido.

Tal como se aprecia en la figura 8, existe un aumento progresivo del ruido visible en las señales de campo magnético.

Se destaca la figura 8 (d) relacionada al 160% de carga, ya que muestra una distorsión de la señal. Posterior a este instante de tiempo, las señales registradas aumentan la presencia de ruido.

Para visualizar que frecuencias se presentan en la condición nominal del transformador y se compara con el envejecimiento, se extrae su espectro tal como se muestra en la figura 9, las componentes que surgen son armónicos impares correspondientes a la saturación magnética.

Para visualizar las frecuencias que se presentan con el envejecimiento del transformador, se obtienen los espectros de estas señales, véase la Figura 10, siendo: (a) 100% de carga, (b) 120% de carga, (c) 140% de carga, (d) 160% de carga, (e) 180% de carga, y (f) 200% de carga.

Se destaca que al 160% de carga (Figura 10.d) surgen componentes de alta frecuencia en el espectro; específicamente, en el ancho de banda entre los 900 y 5000 Hz. Para el 180% y 200% de carga se repite este fenómeno.

Estos resultados, permiten mostrar el comportamiento en la señal de campo magnético donde incrementa la magnitud del espectro en las altas frecuencias a medida que se somete al transformador a un mayor esfuerzo térmico.

Ahora bien, al haber identificado los parámetros que revelan el envejecimiento del transformador, se describe a continuación el cálculo de la entropía de las señales de campo magnético radiadas por el transformador.

Calculo de la entropía de las señales de campo magnético radiadas para el ejemplo:

El cálculo de la entropía de las señales de campo magnético medidas con el procedimiento objeto de esta invención se realizaron a partir de cada uno de los pasos del método de la Figura 6.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Cada uno de los pasos del método tal como se describió en el detalle de la invención, arroja los siguientes resultados:

Para el transformador del ejemplo se muestra la relación de la entropía respecto al escalón de carga en la figura 11, la relación de la entropía respecto a la temperatura ambiente en la figura 12, la relación de la entropía respecto a la temperatura de punto caliente en la figura 13.

Las relaciones obtenidas en estas figuras, muestran un comportamiento ascendiente que toma un mayor valor al finalizar el 160% de la potencia nominal y al alcanzar 90°C de temperatura ambiente.

Adicionalmente, se aprecia el cambio de la entropía entre el inicio de la prueba con 0.6 nats y el final con 1.2 nats. Este cambio, permite diferenciar el estado óptimo del transformador con su envejecimiento.

Al llegar al 180% de carga, el valor de entropía se mantiene en valores constantes. Estos porcentajes de carga, están relacionados con la presencia de las frecuencias en el intervalo de 900 hasta 5000 Hz. Por ende, el valor de 1.2 nats denota un punto de no retorno del transformador.

A medida que la temperatura ambiente y la sobrecarga del transformador aumentan, incrementa el valor de temperatura de punto caliente. Con un mayor tiempo de exposición a una alta temperatura de punto caliente, se genera una degradación de los componentes aislantes del transformador por la ruptura de las cadenas de hidrocarburos que componen el aceite dieléctrico u otras componentes aislantes, como lo son el papel de los devanados o el barniz entre láminas del núcleo.

El desgaste generado en los componentes aislantes del transformador, causa una distorsión de las señales de componente magnético que el transformador emite. Estos resultados pueden ser interpretados como un aumento en la entropía de la información de la señal de campo magnético.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

REIVINDICACIONES

Habiéndose descrito la invención, se reclama como propiedad lo contenido en las siguientes reivindicaciones:

1. **“PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS”** Donde el procedimiento comprende:

- La captura de datos;
- El cálculo de los coeficientes de Fourier;
- El cálculo de la entropía;
- La determinación de la temperatura interna del transformador;
- El cálculo de la vida útil o remanente del transformador.

2. Método de acuerdo con el procedimiento de la reivindicación 1, que comprende la etapa de captura de datos, que permite extraer un intervalo de tiempo de 20 segundos de la señal medida con una frecuencia de muestreo de 44,1kHz conformándose una serie de tiempo $señal = \{x_1, x_2, x_3, \dots\}$. Logrando el mejor ajuste con la envoltura del evento oscilante que caracteriza la señal de campo magnético radiado y que pone en evidencia el efecto de descarga parcial o deterioro del transformador por pérdidas en el núcleo.
3. Método de acuerdo con el procedimiento de la reivindicación 1, caracterizado por desarrollar la etapa del cálculo de los coeficientes de Fourier, que hace un ventaneo en cada bloque de la señal con la ventana Hanning y se aplica el algoritmo de la FFT obteniéndose los coeficientes *Componentes en frecuencia* $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_N\}$.
4. Método de acuerdo con el procedimiento de la reivindicación 1, se caracteriza por desarrollar el procedimiento para el cálculo de la entropía, donde el procedimiento comprende:
 - Determinar una serie a partir de los coeficientes de Fourier, tomando el promedio de cada diez puntos vecinos;
 - Ordenar vectores “u” a partir de los elementos de la nueva serie;
 - Determinar la distancia entre elementos;
 - Calcular la probabilidad de encontrar un punto de la serie en el intervalo de los elementos “u” ordenados;
 - Calcular la probabilidad del punto vecino;
 - Determinar la entropía como el negativo del logaritmo neperiano del cociente de la probabilidad del punto vecino sobre la probabilidad del punto;
5. Método de acuerdo con el procedimiento de la reivindicación 1 y 4 caracterizado por desarrollar la etapa del cálculo de la temperatura interna del transformador, calculando primero la constante de inicio del inverso de la entropía

$$k = \frac{1}{|s_{25^\circ} - s_{95^\circ}|} = \frac{1}{|0.2 - 0.6081|} = \frac{1}{0.4081} = 2.45$$

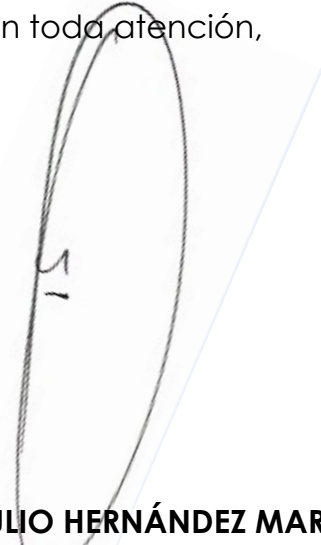
PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

$$T_{Seq} = \frac{3A}{\ln(S^{-1} + k)}$$

Para determinar la temperatura

6. Método de acuerdo con el procedimiento de la reivindicación 1 y 5 caracterizado porque determina la vida útil o remanente del transformador $V.R = aT_{Seq} + b$ en donde, el valor de pendiente a es -0.9189 y el valor independiente b es de 88.29.
 7. Un sistema físico para capturar señales del tipo de ondas electromagnéticas radiadas que entregan la señal para la primera etapa del procedimiento de la reivindicación 1 y descrito en la reivindicación 2. El cual consta de:
 - Una antena directiva;
 - Un radio receptor;
 - Un trípode.
 8. Dispositivo físico de acuerdo con la reivindicación 7, se caracteriza por una antena directiva con resonancia a 2.5GHz (4.2), con polo de media onda y ganancia de 40 db, que capta la señal emitida por el transformador a examinar.
 9. Dispositivo físico de acuerdo con la reivindicación 7 y 8, se caracteriza por un receptor de radio (5), con sus respectivas etapas de filtrado y amplificación, la conexión entre la salida del receptor y el dispositivo de cómputo o hardware por medio del cual se accede al **PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS BASADO EN LA ENTROPÍA DE CAMPOS MAGNÉTICOS**, se realiza mediante un cable de micrófono, en donde, la señal es adquirida por el DSP del dispositivo de cómputo o hardware, mostrando los datos del diagnóstico en la pantalla del dispositivo, entregando los datos relativos a la edad estimada y estado del dispositivo que se está diagnosticando (7).
 10. Dispositivo físico de acuerdo con la reivindicación 9, se caracteriza por un trípode que sirve de base para sostener la antena directiva y el radio receptor (4).
-

En los anteriores términos, doy respuesta al oficio de la referencia y me suscribo con toda atención,



PABLO JULIO HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

C.C. 10.017.555

T.P. 125309 C.S. de la J.