

Unconventional methods for fault diagnosis in distribution transformers

María Gabriela Mago^a, Luis Vallés^b, Jhon Jairo Olaya^{*,c}, Nestor Escudero^d

^a*Departamento de Ponencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela*

^b*Doctorado en Ingeniería, Área de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela*

^c*Postgrado en Materiales y Procesos, Doctorado en Ciencias de los Materiales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia*

^d*Maestría en Matemática Física, Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela*

Abstract.-

The purpose of this research is to perform troubleshooting of equipment as part of the distribution network, among which are single phase transformers pole through special methods. Diagnosis was supported such experimental tests for evaluating the lifetime of these devices have, so that, increase the qualification expertise probable failures. The information for the development of this research was provided by companies whose areas served belong to CORPOELEC (Valencia–Venezuela) and Codensa (Bogota–Colombia). It was concluded that the required investments in this sector are postponed, therefore, we recommend the implementation of maintenance programs in the short, medium and long term immediately.

Keywords: unconventional methods; fault diagnosis; factor and discriminant analysis; reliability

Métodos no convencionales para el diagnostico de fallas en transformadores de distribución

Resumen.-

El propósito de esta investigación es realizar el diagnóstico de fallas de los equipos que forman parte de las redes de distribución, entre los cuales se encuentran, los transformadores de monofásicos de poste a través de métodos especiales. Tal diagnóstico se apoyó en ensayos experimentales, para evaluar el tiempo de vida útil que tienen estos equipos, de tal manera que, aumente la experticia de calificación de fallas probables. La información para el desarrollo de esta investigación fue suministrada por empresas cuyas áreas servidas pertenecen a Corpoelec (Valencia-Venezuela) y Codensa (Bogotá-Colombia). Se concluyó que las inversiones requeridas por este sector son impostergables, por lo tanto, se recomienda la implementación de programas de mantenimiento a corto, mediano y largo plazo de manera inmediata.

Palabras clave: métodos no convencionales; diagnóstico de fallas; análisis factorial y discriminante; confiabilidad

Recibido: diciembre 2014

Aceptado: diciembre 2015

1. Introducción

Las redes de distribución de energía eléctrica son de vital importancia para los usuarios resi-

denciales e industriales, las condiciones de calidad y eficiencia energética son fundamentales para el desarrollo del sector eléctrico nacional, además de ser una de las líneas estratégicas del país. Dentro de esas redes de distribución, se encuentran los transformadores de distribución [1].

Untransformador es una máquina eléctrica, que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo

*Autor para correspondencia

Correo-e: jjojayaf@unal.edu.co (Jhon Jairo Olaya)

la frecuencia. Está constituido básicamente por una parte activa, la cual es el corazón del transformador. En esta sección es donde se transforman las tensiones y corrientes, está conformada por el núcleo y las bobinas (estas se devanan sobre el núcleo). El núcleo se construye con láminas de acero al silicio (3.15 %) de granos orientados, lo que permite una densidad mayor de flujo magnético. El espesor usual de la chapa de acero al silicio es de 0.35 mm. Las bobinas o devanados se denominan primarios y secundarios, según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión [2]. Se consideran transformadores monofásicos de distribución aquellos con capacidad nominal de 10 a 167.5 kVA de acuerdo a la norma venezolana. Si la capacidad es mayor de 500 kVA, se consideran transformadores de potencia. En el trabajo de Mago y colaboradores [3] se muestran algunas partes constitutivas del núcleo del transformador de distribución.

Como todo equipo, los transformadores están sujetos a diferentes fenómenos que pueden causar deterioro en los mismos, ocasionando así, numerosas fallas en los sistemas [4] y a pesar de su importancia en la red, son escasas las políticas de mantenimiento que reciben, solo son tomados en cuenta cuando se dañan por completo, y ameritan reemplazo inmediato para solventar la suspensión del servicio eléctrico, que se convirtió en una emergencia. No existe una evaluación de la vida útil o remanente, por lo tanto esta investigación se orienta hacia la aplicación de métodos no convencionales para el diagnóstico de fallas en transformadores, que complementaran las técnicas utilizadas hasta ahora [5], permitiendo el avance hacia mejores programas de mantenimiento en las empresas del sector eléctrico.

2. Tipo de fallas en transformadores de distribución

Existe una clasificación de los tipos de fallas que presentan los transformadores de distribución [6, 7], las cuales se indican a continuación:

- **Térmicas:** ocurren cuando la temperatura de trabajo excede la establecida por el fabricante,

ocasionando degradación del aceite dieléctrico de manera progresiva, lo que trae como consecuencia; el deterioro del equipo por efecto de una sobrecarga.

- **Arco Eléctrico:** ocurren, cuando fallan las protecciones del transformador, lo que trae como consecuencia, cortocircuitos internos que dañan el equipo, dejando esa parte de la red eléctrica fuera de servicio.
- **Descargas Parciales:** son pequeñas descargas eléctricas, que se producen en el seno de cavidades con gas presente en un medio aislante sólido o líquido. En los transformadores de distribución están asociadas a condiciones de sobretensión ocasionando daños en el aislamiento del equipo.

3. Relacionadas con métodos no convencionales

3.1. Ensayos no destructivos

Los Ensayos No Destructivos (también llamados END, o en inglés NDT (*nondestructive testing*)) son un campo de la ingeniería que se desarrolla rápidamente. Dentro de los tipos de ensayos no destructivos que fueron realizados a los transformadores de distribución se encuentran los indicados a continuación, los cuales permiten detectar en los materiales de fabricación (chapa de acero al silicio específicamente), posibles discontinuidades superficiales y subsuperficiales [8].



Figura 1: Imanación por electrodos de la chapa de acero al momento de aplicar corriente magnetizante

En la Figura 1 se muestra la imantación por electrodos de la chapa de acero al silicio al momento de aplicar corriente magnetizante.

3.2. Pruebas de tensión Mecánica

Las propiedades mecánicas son aquellas que para su determinación y medida, requieren de la aplicación de una fuerza exterior. El papel aislante utilizado en la fabricación de estos equipos, posee características técnicas bastante específicas, sin embargo, cuando es sometido a un proceso de falla por distintas causas es significativo evaluar el cambio en algunas de sus propiedades entre las cuales se encuentra la “Resistencia a la tensión”, que consiste en una prueba de estiramiento del papel que sirve de muestra, cuya probeta ha sido preparada previamente según indica el Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus o método (ASTM D-828) [9]. Mediante el ensayo de tensión mecánica, se caracteriza la respuesta del material ante una deformación continua unidireccional. La muestra, de dimensiones preestablecidas, es tensionada hasta llegar al punto de fractura. Durante todo el proceso, se realiza un registro de la carga aplicada, F , y la deformación sufrida instantánea, A . A partir de estos datos, se realiza la representación de la denominada tensión mecánica, s , frente a la deformación e , donde ambos parámetros se calculan como se indica en las Ecuaciones 1 y 2.

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0}, \quad (1)$$

$$f = \frac{F}{A_0}, \quad (2)$$

donde l_0 es la longitud inicial de la muestra, l_f es la longitud final tras la aplicación de la deformación y A_0 es el área inicial de la sección, la deformación verdadera ε está definida como el cambio instantáneo de longitud de la muestra dl entre la longitud instantánea l ,

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l_f} d\varepsilon = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l} = \log 1 + e. \quad (3)$$

La Ecuación 3 permite la definición de la deformación verdadera, σ

$$\sigma = \frac{F}{A_f} = s \exp(\varepsilon).$$

A partir del registro y representación de estos datos, se obtienen los siguientes parámetros de caracterización mecánica del material que fueron marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda:

1-1 Muestra Patrón.

1-2 Muestra de papel aislante de transformador fallado por humedad.

1-3 Muestra de papel aislante de transformador fallado por cortocircuito externo.

1-4 Muestra de papel aislante de transformador fallado por cortocircuito externo en la bobina de alta tensión.

1-5 Muestra de papel aislante de transformador fallado por sobretensión.

1-6 Muestra de papel aislante de transformador fallado por defecto de operación.

1-7 Muestra de papel aislante de transformador fallado por sobrecarga.

1-8 Muestra de papel aislante de transformador de control de casi treinta (30) años.

Tabla 1: Características técnicas del papel aislante

Resistencia a la tracción longitudinal (N/mm ²)	Resistencia a la tracción transversal (N/mm ²)	Alargamiento a la rotura longitudinal (%)	Alargamiento a la rotura transversal (%)
70-100	50-60	3-5	7-10

Fuente: www.c-ursosos.ci

La Tabla 1 muestra las características técnicas de este papel aislante tipo presspan clase térmica B (130°C) aportadas por el fabricante, que permiten comparar los resultados gráficos de los ensayos realizados a los mismos.

3.3. Análisis metalográfico de los materiales de fabricación

El análisis metalográfico, consiste en observar en el microscopio, probetas pulidas utilizando reactivos apropiados, permiten deducir la historia

térmica del metal. La Figura 2 muestra la preparación de las probetas utilizadas en la presente investigación.



Figura 2: Preparación de las probetas para las muestras de transformadores fallados

4. Cálculo de confiabilidad

Las fallas están clasificadas según los meses de ocurrencia de las mismas. Los tiempos entre fallas (TEF) deben ser ordenados en orden ascendente (de menor a mayor) y listado en forma consecutiva en la columna T(N) (ver planilla de análisis de fallas).

En el caso de dos observaciones con el mismo valor, se debe determinar la medida geométrica de los números de igual orden

$T(N)$ = tiempo de sobrevivencia,

entonces $M(N) = N$,

donde $M = \sqrt{N_i - N_j}$,

N_i y N_j indican rangos menores y mayores respectivamente.

El rango $M(n)$ se usa para determinar la probabilidad de falla $PF(t)$, de acuerdo a

$$PF(t) = \frac{M(n)}{N_{\text{máx}} + 1,0}.$$

Para cada rango se calcula la probabilidad de supervivencia. Con el método de mínimos cuadrados, a partir de esta función de sobrevivencia se pueden estimar los valores teóricos de V y K , el $TPEF$ (tiempo promedio entre fallas) o $MTEF$ [10]

$$V = \exp \left(\frac{N \sum_{i=1}^n Z_i b_i - \sum_{i=1}^n Z_i \sum_{i=1}^n b_i}{\sum_{i=1}^n Z_i b_i \sum_{i=1}^n b_i - \sum_{i=1}^n Z_i \sum_{i=1}^n b_i^2} \right)$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i b_i}{\sum_{i=1}^n b_i - \log V \times \sum_{i=1}^n b_i^2}$$

$$TPEF = V * \left(1 + \frac{1}{K} \right).$$

5. Metodología

Se diseñó un instrumento de recolección de datos para la empresa venezolana, que busca obtener referencias generales de las unidades falladas tales como: marca, capacidad, nivel de tensión, fecha de fabricación, carga probable, causa por la cual fue cambiado, aspecto exterior, descripción de posibles causas de fallas, etc [11]. La empresa colombiana que proporcionó la información, utiliza un instrumento similar dentro de sus normas y procedimientos de calidad, que sirvió también para esta recolección de datos. La Tabla 2 muestra las empresas que suministraron la información para este estudio.

Tabla 2: Muestra de las empresas y equipos fallados

Ubicación	Empresa	Nº de equipos fallados
Venezuela	Corpoelec	111
Colombia	FYR Ingenieros C.A	129

6. Procedimiento experimental y resultados obtenidos

6.1. Ensayos con líquidos penetrantes

Las muestras de chapas de acero al silicio de equipos fallados fueron preparadas para realizarles ensayos no destructivos, de acuerdo al Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination o método (ASTM E165-95) [12], para la aplicación del ensayo utilizando líquidos penetrantes, se realizó el procedimiento establecido para tal fin, no apreciándose en las muestras analizadas ninguna discontinuidad superficial [13].

6.2. Ensayos con partículas magnéticas

Luego de llevar a cabo lo indicado anteriormente a las muestras de las chapas de acero al silicio de los equipos fallados, se les realizó otro END utilizando el Standard Guide for Magnetic Particle Examination o método (ASTM E709-01) [14], aplicando el procedimiento establecido para evaluar discontinuidades superficiales y subsuperficiales con partículas magnéticas, no encontrándose en los materiales evaluados ninguna alteración o cambios en los mismos [15].

Este procedimiento experimental fue realizado en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

6.3. Análisis Metalográfico

A través del método de análisis “Espectrofotometría de Absorción Atómica”, a una muestra patrón de chapa magnética, utilizada en la construcción del núcleo para transformadores, suministrada por la empresa venezolana Transformadores del Centro C.A, se identificó de una manera cuantitativa la composición química de los elementos presentes, en la Tabla 3, se indican los mismos.

Tabla 3: Composición química de la chapa magnética de silicio venezolana (muestra patrón)

% C	% Mn	% P	% S	% Si
0,08	0,012	0,015	0,002	2,90

Fuente: Y. Raffoul y I. Leal [16]

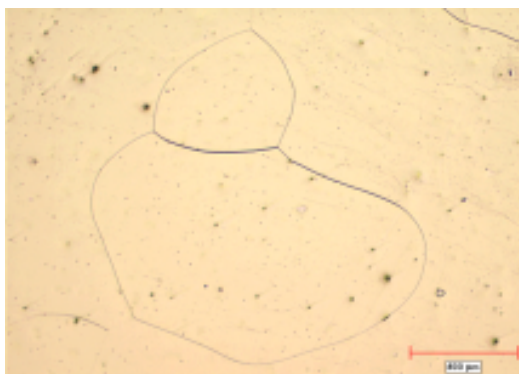


Figura 3: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio 1000X (cara transversal)

Esta muestra del acero al silicio fue preparada metalográficamente y atacada con Nital al 3 % (3 % de ácido nítrico diluido en 97 % de alcohol etílico) donde, en la cara transversal (Figura 3) la micro estructura del material es observada bajo aumento y se evidencia la presencia de granos de ferrita e inclusiones/precipitados en la matriz.

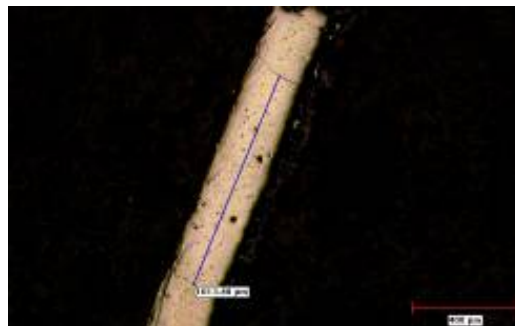


Figura 4: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio (cara longitudinal)

En la cara longitudinal (ver Figura 4) al igual que en el corte transversal, se observan granos de gran tamaño y mucha porosidad (se estima que ésta es consecuencia del ataque químico realizado al material).

El Silicio por estar en porcentaje superior a 2,5 % hace que el acero estudiado sea ferrítico. Esta circunstancia es favorable, ya que estos aceros son de grano grosero con tendencia a que el grano aumente en los sucesivos calentamientos a que se somete el material, lo cual es una ventaja, ya que con ello se reducen las pérdidas por histéresis [16]. Estos ensayos fueron realizados en la Escuela de Química y Mecánica respectivamente, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de Carabobo en Venezuela.

Tabla 4: Composición química de la chapa magnética de silicio colombiana (muestra patrón)

% C	% Mn	% P	% S	% Si
0,1472	0,0773	0,0391	0,0686	2,547

Fuente: Y. Raffoul y I. Leal [16]

Luego, se repite el procedimiento anterior identificándose de una manera cuantitativa, la composición química de los elementos presentes, a una

aleación suministrada por la empresa colombiana, FYR Ingenieros C.A , en la Tabla 4 se indican los mismos

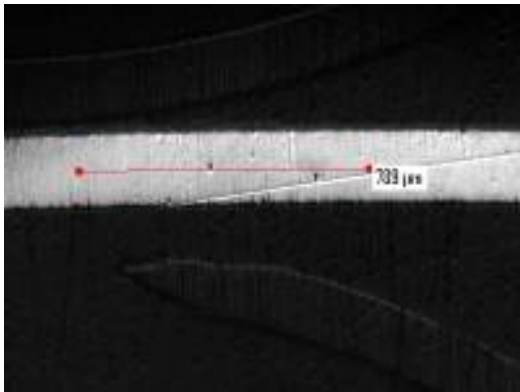


Figura 5: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra de acero al silicio del transformador fallado por Defecto de Operacion 100X. (cara longitudinal).

Los ensayos para evaluar impurezas y tamaño de grano, fueron realizados a las muestras correspondientes de chapas de acero al silicio de equipos fallados, (utilizados de referencia en la presente investigación), en los laboratorios de metalografía, de la Facultad de Ingeniería, Postgrado en Materiales y Procesos de Fabricación, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. La Figura 5 muestra los resultados de una de las muestras, que presentan las inclusiones o impurezas de dichos materiales, versus la condición de falla.

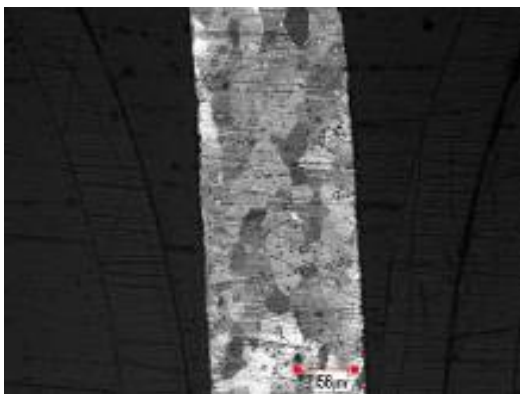


Figura 6: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio (cara longitudinal) del transformador de control 100X

Las muestras de acero al silicio de los transformadores fallados fueron preparadas metalográficamente y atacadas con 100 cm³ de ácido clorhídrico

(HCL), 3 cm³ de ácido nítrico (HNO₃) y 100 cm³ de agua regia en alcohol, dado que el reactivo utilizado con Nital al 3 %, no produjo ningún cambio en los materiales de los transformadores suministrados por las empresas colombianas. Este ataque químico se realizó en distintas oportunidades, logrando respuesta a la reacción solamente, en la chapa de acero al silicio del transformador de control, suministrado por la Empresa venezolana Transformadores del Centro, C.A, como muestra la Figura 6.

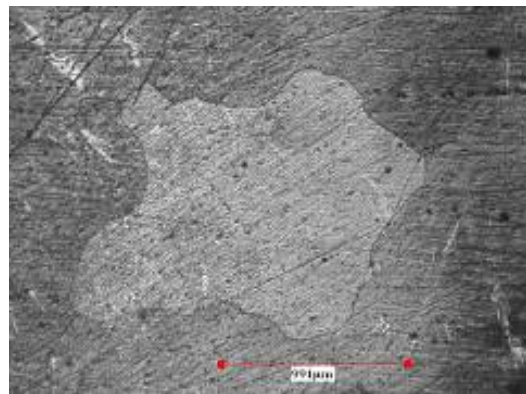


Figura 7: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio fallada por sobrecarga 50X (cara transversal)

Por lo tanto, se preparó otro reactivo que contiene 10 ml (HNO₃) (ácido nítrico) y 90 ml (CH₃OH) (etanol), utilizando un algodón y aplicando el mismo por espacio de tres (03) minutos en la probeta, se obtuvo el tamaño de grano 1 indicado en la Figura 7 [17, 18].

Inclusión o impurezas y tamaño de grano en los devanados de alta y baja tensión de los transformadores fallados. (ver Figuras 8 y 9)

Las muestras de bobinas tanto de alta como de baja tensión de equipos fallados, están “limpias” y no muestran mayores inclusiones o impurezas en las mismas.

El ataque químico realizado a las probetas preparadas de bobinas de alta y bobinas de baja tensión de muestras de equipos fallados, permite apreciar el tamaño de grano y los cambios presentados bajo la condición de falla. En la Figura 10, el tamaño de grano en la bobina de un transformador fallado por cortocircuito externo.



Figura 8: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Sobretensión en la bobina de alta tensión 100X. (cara longitudinal)

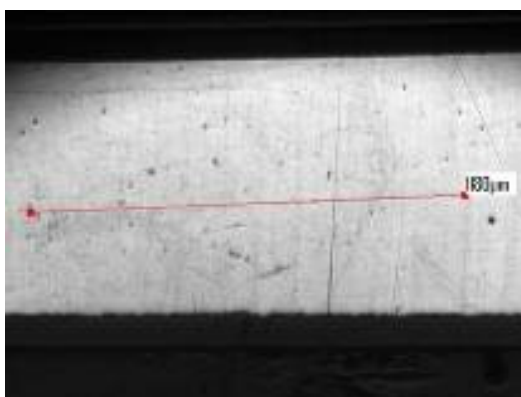


Figura 9: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Sobretensión en la bobina de baja tensión 100X. (cara longitudinal)

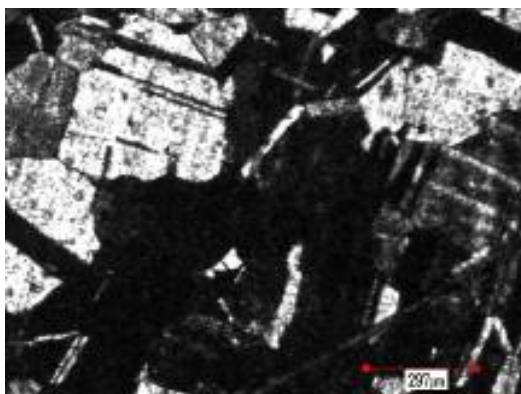


Figura 10: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99 % atacada con cloruro férrico 250X de la bobina de baja tensión del transformador fallado por cortocircuito externo

Se observan tamaños de grano “finos”, a pesar de que no se puede comparar el tamaño en referencia con la norma ASTM E112-96 o

Standard Test Methods for Determining Average Grain Size [19], porque la fotomicrografía se hizo a 250X (aumentos), pero lo que corresponde a los resultados obtenidos, permite evaluar que las condiciones de alta temperatura como es el caso de los equipos utilizados en la presente investigación, producen difusión, y si hay difusión, el grano crece y por consiguiente; son menores las pérdidas, lo cual se cumple, para este tipo de material [20].

6.4. Ensayos de tensión mecánica del papel aislante

De los resultados obtenidos se observa, que las muestras de papel aislante de los transformadores fallados por sobretensión (1-5) y humedad (1-2) se encuentran dentro de los niveles que indica el fabricante en cuanto a las características de la norma que establece entre 3–5 % de deformación, aunque el nivel de carga máximo es alto para el fallado por humedad, no así, para el fallado por sobretensión. Los transformadores fallados por defecto de operación (1-6), sobrecarga (1-7), cortocircuito externo en alta tensión (1-4) e incluso la muestra de papel aislante del transformador de control (1-8), no están dentro de los niveles anteriores, pero en algunos casos es muy baja o sobrepasa la relación del nivel de carga máxima. La Figura 11 muestra los resultados obtenidos.

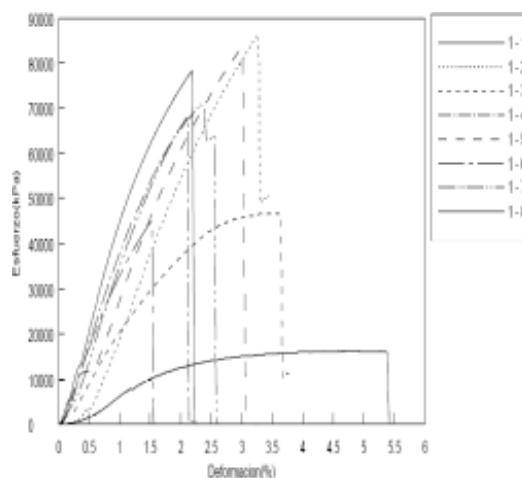


Figura 11: Resultados obtenidos de los ensayos de tensión de todas las muestras de papel aislante

7. Conclusiones

Esta investigación contribuye con el desarrollo tecnológico de Venezuela y Colombia, abriendo paso a una nueva área de especialización donde, ingenieros eléctricos, mecánicos y de materiales, se apoyarán en sus experticias y análisis técnicos, a fin de comprender los fenómenos eléctricos, magnéticos y mecánicos que definen el comportamiento de los transformadores de distribución, lo cual permitirá evaluar la vida remanente o útil aumentando la experticia en el análisis de fallas. A continuación se indican las conclusiones obtenidas en la presente investigación:

Los ensayos no destructivos o END practicados a las muestras de equipos fallados, no revelaron en las chapas de acero al silicio que forman el núcleo del transformador monofásico, ninguna discontinuidad superficial y subsuperficial, que indique deterioro en la calidad del material, producto de alguna causa de falla.

Las pruebas de tensión mecánicas indican envejecimiento o deterioro del papel aislante del equipo en estudio por tiempo de servicio, lo cual permitiría establecer la vida remanente o útil de los transformadores de distribución, es sin duda, una técnica importante en el diagnóstico de fallas de estos equipos. Se recomienda su aplicación en modelos estocásticos para predicción de fallas.

De las imágenes observadas cuando se evalúa impurezas en las chapas de acero al silicio se puede concluir, que ninguna falla modifica la microestructura del material de los transformadores utilizados de referencia en la presente investigación. De la microscopía tanto transversal como longitudinalmente, se observó el tamaño del grano de acuerdo a la norma ASTM E112-96 o Standard Test Methods for Determining Average Grain Size es de aproximadamente 2 en la chapa de acero al silicio del transformador de control suministrado por la empresa venezolana.

De la microscopía transversal se observó que el tamaño del grano de acuerdo a la norma ASTM E112-96 o Standard Test Methods for Determining Average Grain Size es de aproximadamente 1 para las chapas de acero de los transformadores fallados utilizados de referencia en la presente investiga-

ción suministrados por la empresa colombiana.

En el caso de Venezuela se recomienda revisar toda la red eléctrica, ya que esta condición indica, que los programas de mantenimiento preventivo y correctivo, deben aplicarse de inmediato. Hay alteraciones en el suministro de energía eléctrica de forma imprevista. Las inversiones que requiere el sistema eléctrico, son impostergables. Es muy baja la confiabilidad de los equipos.

En el caso de Colombia se puede concluir que los equipos tienen una tasa de falla constante o también conocida como “operación normal”. Esta condición indica, que se están cumpliendo los programas de mantenimiento preventivo, sin embargo, se podría presumir, que algunos factores ambientales, inciden en las condiciones de funcionamiento, incrementando la probabilidad de ocurrencia de falla. Los costos indirectos para los usuarios de estas redes de distribución eléctrica, son elevados. Debe mejorarse la frecuencia de inspección en los programas de mantenimiento preventivo.

Referencias

- [1] Diego Stronconi y José Tamoy. Plan de mantenimiento correctivo-preventivo de los transformadores de distribución de la empresa elebol c.a, bolívar-estado bolívar. Trabajo final de grado, Escuela de Ciencias de la Tierra, Departamento de Ingeniería Industrial. Núcleo Bolívar, Universidad de Orientes, Ciudad Bolívar, Bolívar, Venezuela, octubre 2010.
- [2] EE Staff del MIT, editor. *Circuitos Magnéticos y Transformadores*. Reverté, Buenos Aires, Argentina, 1982.
- [3] MG Mago, Luis Vallés, Jhon-Jairo Olaya y Martha Zequera. Análisis de fallas en transformadores de distribución utilizando ensayos no destructivos y pruebas de tensión mecánicas. *Revista INGENIERÍA UC*, 18(2):15-26, agosto 2011.
- [4] A. Bossi. *Operación y Mantenimiento de Transformadores de Potencia. Requerimientos de usuarios y Fabricantes*. Mc Graw Hill, Madrid, España, 1998.
- [5] James F Shackelford. *Ciencia de Materiales para Ingenieros*. Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 3ra edición, 1992.
- [6] CADAPE. Normas para transformadores de distribución. Technical report, CADAPE, 1979.
- [7] Juan Mota y Ely Contreras. Problemática de los transformadores sumergidos en aceite. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Eléctrica,

Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 1985.

- [8] A. Forero. *Metalografía Práctica*. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2003.
- [9] ASTM International. *Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus (ASTM D-828)*.
- [10] José Domingo Nava. *Teoría de mantenimiento: fiabilidad*. Consejo de Publicaciones, Universidad Los Andes, Mérida, Venezuela, 2002.
- [11] María Gabriela Mago Ramos, Luis Valles Defendine, Jhon Jairo Olaya Florez, *et al*. Análisis de fallas en transformadores de distribución utilizando el software estadístico spss (statistical package for the social sciences). *Ingeniería e Investigación*, 32(2):40–45, 2012.
- [12] ASTM International. *Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination (ASTM E165-95)*.
- [13] William Smith. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Mc Graw Hill, Madrid, España, 3ra edition, 1998.
- [14] ASTM International. *Standard Guide for Magnetic Particle Examination (ASTM E165-95)*.
- [15] (American Society for Metals). *Metal Handbook. "Atlas of Microstructures of industrial alloys ASM"*, 8va edition, 1972.
- [16] Yamile Raffoull y Irvin Leal. Estudio de la factibilidad técnica económica de la fabricación de la chapa de acero al silicio. Trabajo especial de grado, Escuelas de Eléctrica y Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2006.
- [17] MG Mago, L. Hurtado, Y. Raffoul y I. Leal. Estudio de la chapa de acero al silicio para el núcleo del transformador monofásico. *Revista Ingeniería UC*, 16(2):65–69, agosto 2009.
- [18] Robert Reed-Hill. *Principios de metalurgia física*. C.E.C.S.A., México, 6ta edition, 1976.
- [19] ASTM International. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size (ASTM E112-96)*.
- [20] MG Mago, L. Valles y J. Olaya. Evaluación metalográfica de la chapa de acero al silicio y de los devanados del núcleo del transformador monofásico bajo condición de falla. *Revista Ingeniería UC*, 18(3):51–63, diciembre 2011.