

# Unconventional Methods for Fault Diagnostic in Distribution Transformers

María Gabriela Mago<sup>\*,a</sup>, Luis Vallés<sup>b</sup>, Jhon Jairo Olaya<sup>c</sup>, Nestor Escudero<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Potencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo

<sup>b</sup>Área de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

<sup>c</sup>Postgrado en Materiales y Procesos, Doctorado en Ciencias de los Materiales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

<sup>d</sup>Maestría en Matemática Física, Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela

---

## Abstract.-

This research performs 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.

## Metodos no convencionales para el diagnostico de fallas en transformadores de distribución

### Resumen.-

Esta investigación realiza 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 claves:** métodos no convencionales, diagnóstico de fallas, análisis factorial y discriminante, confiabilidad.

Recibido: Noviembre 2014

Aceptado: Marzo 2015.

### 1. Introducción

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

---

\*Autor para correspondencia

Correo-e: mmago@uc.edu.ve (María Gabriela Mago)

transformadores de distribución [1].



Figura 1: Partes constitutivas del núcleo de un transformador de distribución.

Un transformador es una máquina eléctrica, que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo 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 la Figura 1 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 [3] 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 [4], permitiendo el avance hacia mejores programas de mantenimiento en las empresas del sector eléctrico.

## 2. Tipos de fallas en transformadores de distribución

Existe una clasificación de los tipos de fallas que presentan los transformadores de distribución [5, 6], 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. 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 [7].



Figura 2: Imanación por electrodos de la chapa de acero al momento de aplicar corriente magnetizante.

En la Figura 2 se muestra la imantación por electrodos de la chapa de acero al silicio al momento de aplicar corriente magnetizante.

#### 4. 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) [8]. 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).

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

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

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  $\varepsilon$  se define como el cambio instantáneo de longitud de la muestra entre la longitud instantánea. Luego

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

La Ecuación 3 permite la definición de la *deformación verdadera*,  $\sigma$  por

$$\sigma = \frac{F}{A_f} = s \exp \varepsilon. \quad (4)$$

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 siguiente leyenda:

1. Muestra Patrón.
2. Muestra de papel aislante de transformador fallado por humedad.
3. Muestra de papel aislante de transformador fallado por cortocircuito externo.
4. Muestra de papel aislante de transformador fallado por cortocircuito externo en la bobina de alta tensión
5. Muestra de papel aislante de transformador fallado por sobretensión.
6. Muestra de papel aislante de transformador fallado por defecto de operación.
7. Muestra de papel aislante de transformador fallado por sobrecarga.
8. Muestra de papel aislante de transformador de control de casi treinta (30) años.

Tabla 1: Características técnicas del papel aislante

Rtl	Rtt	Alr	Art
70 – 100	50 – 60	3 – 5	7 – 10
Rtl	Resistencia a la tracción longitudinal (N/mm <sup>2</sup> )		
Rtt	Resistencia a la tracción transversal (N/mm <sup>2</sup> )		
Alr	Alargamiento a la rotura longitudinal (%)		
Art	Alargamiento a la rotura transversal (%)		

Fuente: www.c-ursos.ci/ingeniería/

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.

## 5. Análisis metalográfico de los materiales de fabricación



Figura 3: Preparación de las probetas para las muestras de transformadores fallados.

El análisis metalográfico, consiste en observar en el microscopio, probetas pulidas utilizando reactivos apropiados, permiten deducir la historia térmica del metal. La Figura 3 muestra la preparación de las probetas utilizadas en la presente investigación.

## 6. 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  $T(N)$  de la 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 la Ecuación 5

$$PF(t) = \frac{M(N)}{N_{\text{máx}} + 1,0} \quad (5)$$

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  $MTEF$  [9], por la ecuaciones

$$V = \exp \left[ \frac{N \sum_{i=1}^n Z_i b_i - \sum_{i=1}^n Z_i \sum_{i=1}^n b_i}{\left( \sum_{i=1}^n Z_i b_i \sum_{i=1}^n b_i - \sum_{i=1}^n Z_i \sum_{i=1}^n b_i^2 \right)} \right] \quad (6)$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i b_i}{\sum_{i=1}^n b_i - \ln V \times \sum_{i=1}^n b_i^2} \quad (7)$$

$$TPEF = V \times \left( 1 + \left( \frac{1}{K} \right) \right) \quad (8)$$

## 7. Metodología

Tabla 2: Muestra de las empresas y equipos fallados (N°)

Ubicación	Empresa	N°
Venezuela	Corpoelec	111
Colombia	FYR Ingenieros C.A	129

Fuente: Mago, M (2010)

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. [10]. 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. En la Tabla 2 se muestran las empresas que suministraron la información para este estudio.

## 8. Procedimiento experimental y resultados obtenidos

Tabla 3: Características de las probetas de papel aislante de los transformadores fallados.

Forma: plana				
	Espesor	Anchura	Longitud calibrada	
Unidades	mm	mm	mm	
1	0.1580	18.4000	100.0000	
2	0.5380	19.7000	100.0000	
3	0.9500	20.9000	100.0000	
4	0.5200	18.9000	100.0000	
5	0.1450	20.8000	50.0000	
6	0.3630	19.9000	100.0000	
7	0.5380	14.8000	100.0000	
8	0.2090	20.5000	100.0000	

	Max. Carga	Max. Despl.	Max. Esfuer.	Max. Deform.
Unidades	N	mm	kPa	%
1	227.352	2.1910	78211.0	2.1910
2	915.469	3.2700	86376.4	3.2700
3	929.719	3.6420	46825.4	3.6420
4	667.219	2.1030	67889.6	2.1030
5	251.719	1.4990	83461.1	1.4990
6	325.875	1.5300	45111.9	1.5300
7	563.438	2.3280	70762.3	2.3280
8	69.484	4.7865	26301.5	4.7865

Fuente: [11]

En la Tabla 3 se indican características de las probetas utilizadas, así como también, cálculos obtenidos de la máxima carga a soportar, al igual

que el desplazamiento, esfuerzo y la deformación, cuyos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Deformación Plástica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá [11].

### 8.1. 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].

### 8.2. 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.

### 8.3. Análisis metalográfico

Tabla 4: 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: [16]

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 4, se indican los mismos.

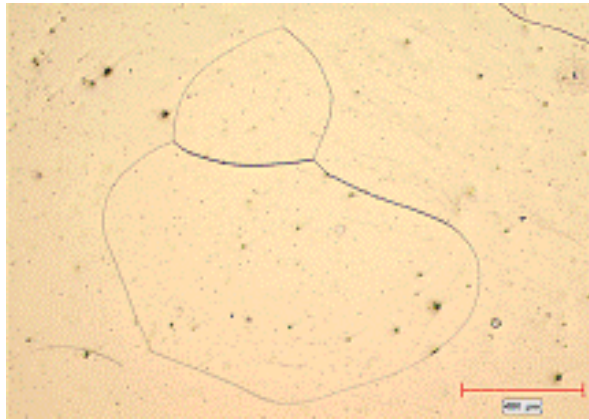


Figura 4: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio 1000X (cara transversal).

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 4) la micro estructura del material es observada bajo aumento y se evidencia la presencia de granos de ferrita e inclusiones/precipitados en la matriz.

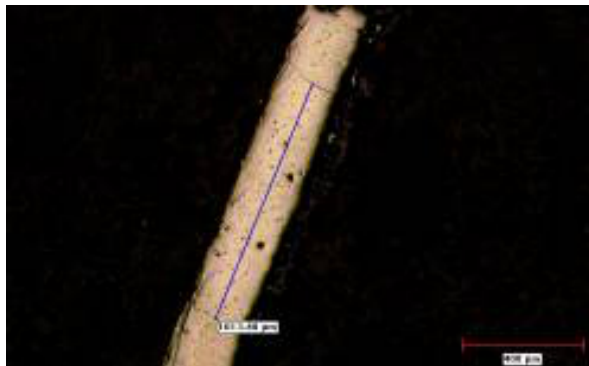


Figura 5: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio (cara longitudinal).

En la cara longitudinal (ver Figura 5) 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 5: 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: Fundición Imes (2011)

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 5 se indican los mismos.

### 8.3.1. Inclusiones e impurezas en la chapas de acero al silicio de los transformadores fallados

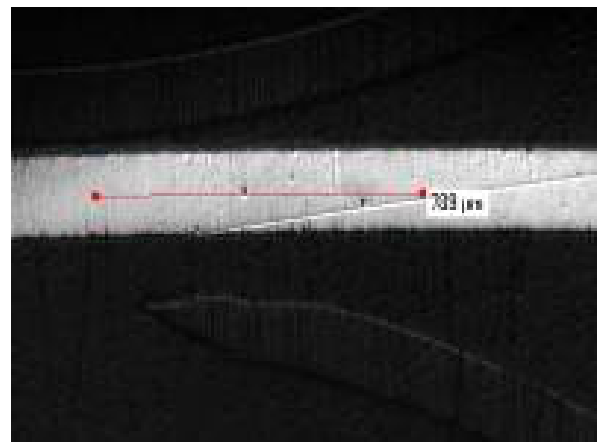


Figura 6: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra de acero al silicio del transformador fallado por Defecto de Operación 100X. (cara longitudinal).

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. En la Figura 6, se muestran los resultados de una de las muestras, que presentan las inclusiones o impurezas de dichos materiales, versus la condición de falla.

### 8.3.2. *Tamaño del grano en las chapas de acero al silicio de los transformadores fallados*

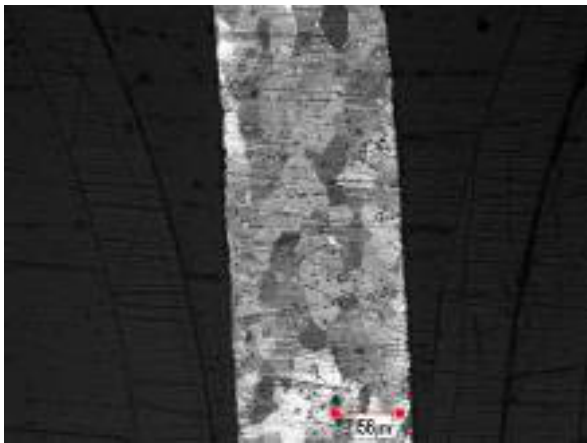


Figura 7: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio (cara longitudinal) del transformador de control 100X.

Las muestras de acero al silicio de los transformadores fallados fueron preparadas metalográficamente y atacadas con 100 cm<sup>3</sup> de ácido clorhídrico (HCL), 3 cm<sup>3</sup> de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y 100 cm<sup>3</sup> 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 se indica en la Figura 7.

Por lo tanto, se preparó otro reactivo que contiene 10 ml (HNO<sub>3</sub>) (ácido nítrico) y 90 ml (CH<sub>3</sub>OH) (etanol), utilizando un algodón y aplicando el mismo por espacio de tres (03) minutos en la

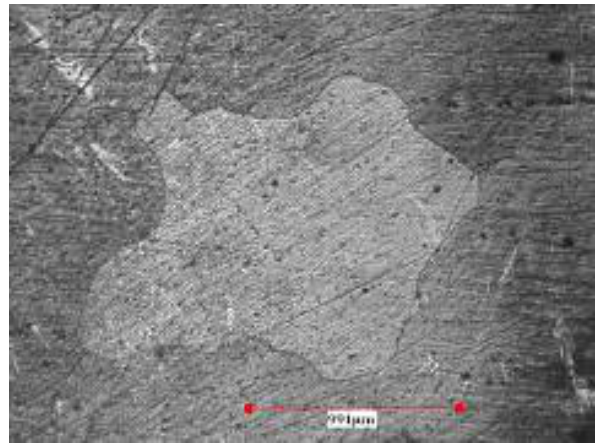


Figura 8: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio fallada por sobrecarga 50X (cara transversal).

probeta, se obtuvo el tamaño de grano 1 indicado en la Figura 8 [17, 18].

### 8.3.3. *Inclusiones o impurezas y tamaño de grano en los devanados de alta y baja tensión de los transformadores fallados*

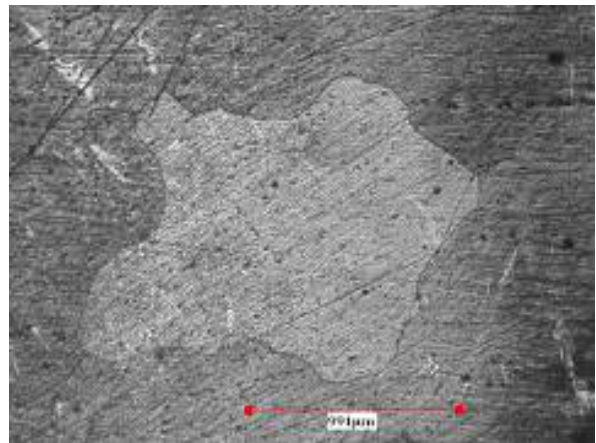


Figura 9: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Sobretensión en la bobina de alta tensión 100X. (cara longitudinal).

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 (Figuras 9 y 10).

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

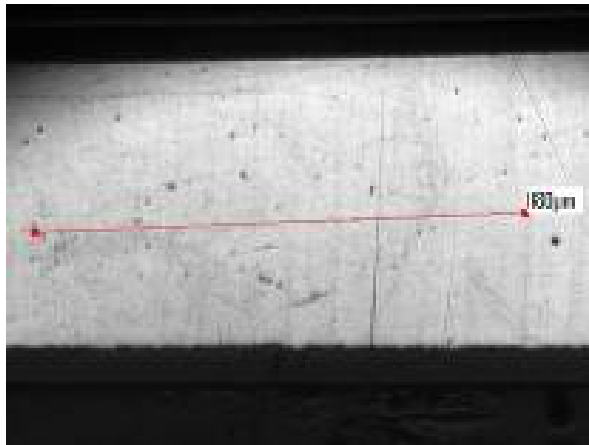


Figura 10: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Sobretensión en la bobina de baja tensión 100X. (cara longitudinal).

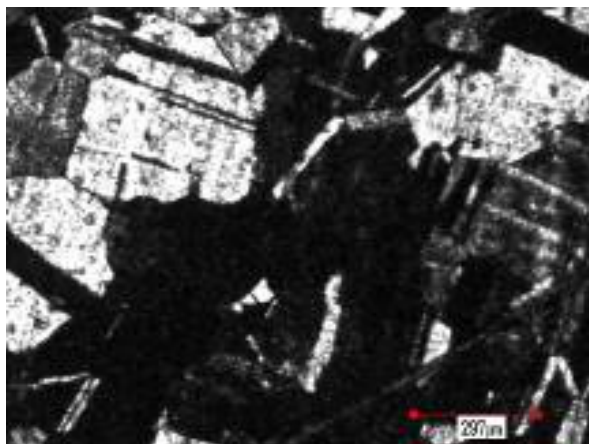


Figura 11: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99% atacada con cloruro férrico 250X de la bobina de baja tensión del transformador fallado por cortocircuito externo.

presentados bajo la condición de falla. En la Figura 11, el tamaño de grano en la bobina de un 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].

#### 8.4. Ensayos de tensión mecánica del papel aislante

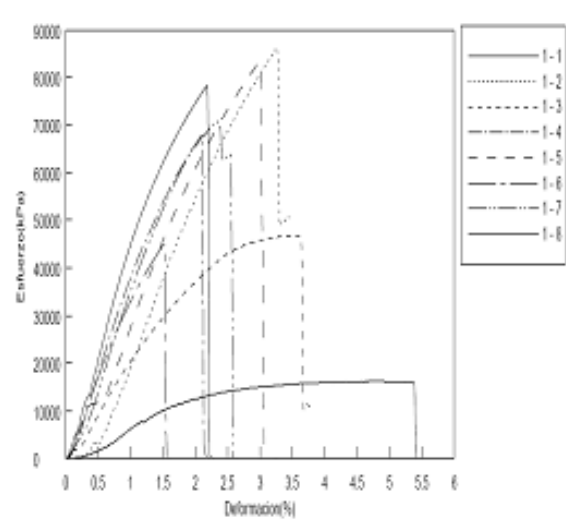


Figura 12: Resultados obtenidos de los ensayos de tensión de todas las muestras de papel aislante.

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 % del porcentaje 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. En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos.

##### • Casos Venezuela y Colombia:

A partir de los resultados estadísticos, en la planilla de análisis de fallas se organiza la información, determinándose: el promedio geométrico, cantidad de unidades falladas, probabilidad de falla y de sobrevivencia. Luego se aplica el método de mínimos cuadrados obteniéndose los valores de  $V$  y  $K$ , y del  $TPEF$  respectivamente. En las Figuras 13 y 12 se muestran las curvas de confiabilidad obtenidas.

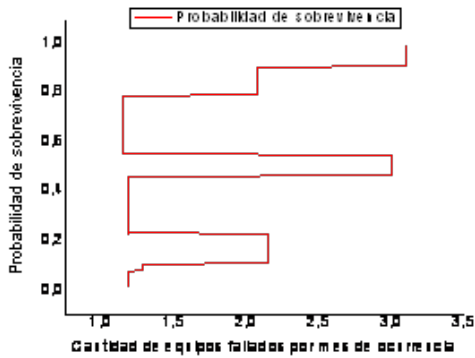


Figura 13: Curva de Confiabilidad caso Venezuela.

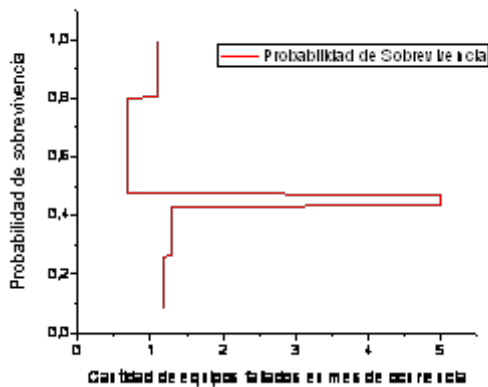


Figura 14: Curva de Confiabilidad caso Colombia.

## 9. 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 investigación suministrados por la empresa colombiana.

### • Caso Venezuela.

**Confiabilidad** Como  $K = B = 0,2353024$ , es decir,  $K < 1$  se puede concluir que los equipos tienen una tasa de falla decreciente o también conocida como “mortalidad infantil”. 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.

Siendo el resultado para el  $TPEF$  de 30,0810927 lo cual muestra que, al menos treinta equipos fallaran en un mes.

### • Caso Colombia.

## Confiabilidad

Como  $K = B = 1,28563392$ , es decir,  $K \approx 1$  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.

Siendo el resultado para el *TPEF* de 6,169198071 lo cual muestra que, al menos seis equipos fallaran en un mes.

## Referencias

- [1] D. Stronconi and J. Tamoy. Plan de mantenimiento correctivo–preventivo de los transformadores de distribución de la empresa elebol c.a, ciudad bolívar – estado bolívar. Trabajo especial de grado, Departamento de Ingeniería Industrial, Escuela de Ciencias de la Tierra, Universidad de Oriente, Núcleo Bolívar, Venezuela., 2010.
- [2] E. Staff. *Circuitos Magnéticos y Transformadores*. Reverté, Argentina, 1981.
- [3] A Bossi. *Operación y Mantenimiento de Transformadores de Potencia. Requerimientos de usuarios y Fabricantes*. Mc Graw Hill, España, 1998.
- [4] J. Shackelford. *Ciencia de Materiales para Ingenieros*. Prentice Hall, México, 3ra edition, 1992.
- [5] CADAPE. Normas para transformadores de distribución, caracas, 1979.
- [6] J Mota y E. 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.
- [7] A. Forero. *Metalografía Práctica*. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia., Bogotá, Colombia, 2003.
- [8] ASTM. Standard test method for tensile properties of paper and paperboard using constant-rate-of-elongation apparatus. Standar method, 2001.
- [9] J. Nava. *Teoría de Mantenimiento. Fiabilidad*. Consejo de Publicaciones. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 2004.
- [10] M. Mago, L. Valles, and J. Olaya. Análisis de fallas en transformadores de distribución utilizando el software estadístico spss (statistical package for the social sciences). *Revista Ingeniería e Investigación*, 32(2):40 – 45, 2012.
- [11] M. Mago. Análisis de fallas de transformadores de distribución utilizando métodos no convencionales. Tesis de maestría, Área de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2011.
- [12] ASTM. Standard test method for liquid penetrant examination (astm e165-95). Standar method, 1995.
- [13] W. Smith. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Mc Graw Hill, España, 3ra edition, 1998.
- [14] ASTM. Standard guide for magnetic particle examination (astm e709-01). Standar method, 2001.
- [15] Metal Handbook. *Atlas of Microstructures of industrial alloys ASM (American Society for Metals)*, volume 7. Mc Graw Hill, USA, 8va edition, 1972.
- [16] Yamile Raffoull and Irvin Leal. Estudio de la factibilidad técnica económica de la fabricación de la chapa de acero al silicio. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2006.
- [17] M. Mago and L. Hurtado. Estudio de la chapa de acero al silicio para núcleo del transformador monofásico. *Revista Ingeniería UC*, 16(2):65 – 69, 2009.
- [18] Reed-Hill, R-. *Principios de Metalurgia Física*. C.E.C.S.A., México, 6ta edition, 1976.
- [19] ASTM. Standard test methods for determining average grain size (astm e112-96). Standar method, 1996.
- [20] M Mago, L Valles, and 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, 2011.
- [21] Hi biao Shi, Yang Li, Yun feng Song, and Tao Yu. Fault diagnosis of transformer based on quantum-behaved particle swarm optimization-based least squares support vector machines. In *Information Engineering and Computer Science*. International Conference on ICIECS, ICIECS, 2009.
- [22] E. A. Klingshirn, H. R. Moore, and E. C Wentz. Detection of faults in power transformers. *Electrical Engineering*, 76(4), 1957.
- [23] An anfis-based transformer insulation fault diagnosis method using emotional learning hongsheng su. In *Third International Conference on Natural Computation*, pages 74 – 78. ICNC, 2007.
- [24] Huimin He and Xiaotian Xu. Study on transformer oil dissolved gas online monitoring and fault diagnosis method. In *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, pages 593 – 596. IEEE Conference Publications, 2012.
- [25] Wei-Chun Chen, P.P.K. Chan, W.W.Y. Ng, and D.S. Yeung. Multiple classifier systems combined with localized generalization error for fault diagnosis of power transformers. In *International Conference*

*on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*, volume 3, pages 1464 – 1469. IEEE Conference Publications, 2010.

- [26] M. MRUGALSKI. State-space gmdh neural networks for actuator robust fault diagnosis. *Web of Science AECE*, 12(3), 2012.
- [27] Seifeddine S, Khmais B, and Abdelkader C. Artificial intelligence tools aided-decision for power transformer fault diagnosis. *International Journal of Computer Applications*, 38(3), 2012.
- [28] Lutao L. and Zujun D. Modeling analysis of power transformer fault diagnosis based on improved relevance vector machine. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.