

Aplicación de pruebas de dureza, SEM y XRD para el diagnóstico de fallas en transformadores de distribución

Hardness testing application, SEM and XRD for fault diagnosis distribution transformer

María Gabriela Mago Ramos¹, Luis Vallés², Jhon Olaya³, Martha Zequera⁴, Mauricio Sierra⁵

¹ Ph.D. Ingeniería, Coordinación de Mecánica, Universidad ECCI, Bogotá, Colombia. mmagor@ecc.edu.co

² Ph.D. Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela. L.vallesd@gmail.com

³ Ingeniero, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia. jjolayaf@unal.edu.co

⁴ Ingeniera, Facultad de Ingeniería, Universidad Pontificia Javeriana de Bogotá, Bogotá, Colombia. mzequera@javeriana.edu.co

⁵ M.Sc. Ingeniería, Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Bogotá, mauricio.sierra@unilibrebog.edu.co

Fecha de recepción: 01/09/2015 Fecha de aceptación del artículo: 15/12/2015

Resumen

La aplicación de métodos no convencionales para el diagnóstico de fallas en la chapa de acero al silicio con la cual se fabrica el núcleo de los transformadores de distribución permite verificar el estado del material versus la condición de falla, utilizando caracterizaciones físicas donde se determina la dureza, la cantidad de inclusiones de óxidos que presentan las muestras mediante análisis de la microestructura y el tamaño de grano en escala nanométrica, utilizando difracción de rayos X. Estas técnicas relacionan las características microestructurales con las propiedades mecánicas del material, sin embargo, es inédita su aplicación en el área eléctrica para estos equipos, dado que, los resultados obtenidos indican cambios importantes en la estructura microestructural del material, pero en los actuales momentos habría que establecer normas para la aplicación de estos métodos no convencionales con mayor frecuencia y obligatoriedad en forma complementaria, a las pruebas que tradicionalmente realizan las empresas que reparan o fabrican transformadores de distribución

Palabras claves

Métodos no convencionales, diagnóstico de fallas, transformadores de distribución, dureza, SEM y XRD.

Abstract

The application of unconventional methods for diagnosing faults in silicon steel sheet with which the core distribution transformers is made to check the status of the material versus the fault condition, using physical characterizations where hardness is determined. The amount of oxide inclusions having samples by analyzing the microstructure and grain size in the nanoscale, using X-ray diffraction techniques. These microstructural characteristics relate to the mechanical properties of the material, however, is unprecedented your application in the electrical field for these teams, since the results show important changes in the microstructural structure of the material, but at the present time would have to establish rules for the implementation of these unconventional methods more frequently and compulsory complementarily to the tests traditionally performed by companies that repair or manufacture distribution transformers.

Keywords

Unconventional methods, troubleshooting, distribution transformers, hardness, SEM and XRD.

1. Introducción

En la presente investigación se utilizaron restos de equipos fallados suministrados por la empresa colombiana FYR Ingenieros C.A, que se encarga de repararlos o fabricarlos. Las tablas 1 y 2 muestran cuarenta y siete (47) transformadores, de los cuales fueron seleccionados dieciséis (16) de acuerdo al tipo de falla, por una parte, y por la otra, por cuestiones de costos para algunas pruebas experimentales, además de uno (01) que sirve de referencia para la muestra patrón. A continuación, lo indicado:

Tabla N 1. Población del Estudio: regiones de procedencia de las muestras. Fuente: [1].

Departamento de Procedencia del Transformador	Cantidad
Caldas	13
Antioquia	9
Pacífico	9
Cundinamarca	1
Bogotá	15
TOTAL	47

Tabla N 2. Población del Estudio: selección definitiva. Fuente: [1].

Departamento de Procedencia del Transformador	Tipo de Falla	Cantidad
Caldas	Térmica	1
	Arco Eléctrico	1
	Descarga Parcial	1
Antioquia	Térmica	1
	Arco Eléctrico	2
	Descarga Parcial	1
Pacífico	Térmica	1
	Arco Eléctrico	1
	Descarga Parcial	1
Cundinamarca	Térmica	1
Bogotá	Térmica	1
	Arco Eléctrico	3
	Descarga Parcial	1
TOTAL		16

En la misma se hace énfasis en la falla de mayor incidencia que es la debida al de arco eléctrico [1], dado que cuando se identifican los modos de falla por condiciones ambientales en los transformadores de distribución, determinando causas reales que originan los mismos, aplicando métodos no convencionales a los materiales de fabricación, se deben caracterizar condiciones físicas que estos presenten [2] realizando pruebas de dureza, SEM y XRD a fin de evaluar el estado de la chapa de acero al silicio de los transformadores de distribución, luego de presentar una falla, como una continuación de las investigaciones que se vienen desarrollando en el área desde el año 2011[3]. Durante el año 2015 se ha publicado un experimento para esta chapa de acero al silicio [4] que indica que el calentamiento rápido tiene un fuerte efecto sobre el comportamiento de recristalización en los aceros eléctricos no orientados, lo que facilita la optimización de la microestructura y la textura, especialmente en la estructura de grano sin perder las propiedades magnéticas [5].

2. Metodología

Al realizar estas pruebas a la chapa de acero al silicio se evaluaron los cambios que sufre el material que evidentemente tienen relación con el experimento anterior, porque orientan las investigaciones futuras a realizar tratamientos térmicos para mejorar el tamaño de grano teniendo cuidado con la presencia de óxidos tipo D tanto finos como gruesos, cuya influencia pudiera deberse a un cambio de fase. Los métodos no convencionales utilizados en la presente investigación se indican a continuación:

2.1 Análisis de la Microestructura

Esta prueba no convencional utiliza las normas ASTM E 112-96 o “Standard test methods for determining average grain size” [6] para determinar tamaño de grano y ASTM E 45 o “Standard test methods for determining quantity and inclusions size” [7], preparando probetas en el equipo indicado en la figura 1, y luego de un proceso de pulido y ataque químico, fueron llevadas al analizador de

imágenes indicado en la figura 2, evaluando cantidad de inclusiones y tamaño de grano.



Figura 1. Equipo para preparación y montaje. Fuente: [3].



Figura 2. Equipo analizador de imágenes de probetas. Fuente: [3].

2.2 Pruebas de Dureza

Esta prueba corresponde a la penetración o rayado. Esta condición del material está íntimamente ligada a la micro estructura y, por lo tanto, con las propiedades mecánicas. Las probetas utilizadas en los ensayos metalográficos fueron utilizadas para medir dureza en un equipo marca Leco Modelo M-400 G2. En la presente investigación se utilizó Knoop, a una carga de 500 g con tiempo de 5 segundos, con réplicas de puntos diferentes.

2.3 Pruebas de Microscopia Electrónica de Barrido

Se utilizó para esta prueba un (01) Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental (ESEM) de última generación que admite el análisis de muestras en

estado natural o bajo condiciones ambientales naturales, sin necesidad de usar técnicas convencionales de preparación de muestras. Este equipo consta de un filamento W que emite electrones los cuales son enfocados en un haz que bombardea la muestra haciendo que esta emita electrones secundarios electrodispersados y con esta información se adquiere una imagen de morfología y aplicando el sensor de rayos X se realizan además análisis elementales y mapeos químicos [8],[9].

2.4 Pruebas de Difracción por Rayos X

Se utilizó para esta prueba un (01) Difractómetro de Rayos X "RIGAKU, MINIFLEX II, operado a temperatura ambiente, equipado con una fuente de radiación de Cu K α ($\lambda= 1.540562 \text{ \AA}$), fuente de rayos X a 30 kV y 15 mA, geometría Bragg-Brentano.

2.5 Resultados Obtenidos

- ✓ **Pruebas de Dureza:** a continuación en la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 3. Mediciones de Dureza. Fuente: [10].

Regiones	Fallas	Medición
Región Antioquia	Térmica	222,2
	Descarga parcial	211,45
	Arco eléctrico	207,8
Región Caldas	Térmica	207,8
	Arco eléctrico	200,4
	Arco eléctrico/térmica	213,2
Región Cundinamarca	Descarga parcial	213,35
	Térmica	212,55
Región Bogotá	Arco eléctrico/térmica	236,25
	Arco eléctrico	272,6
	Descarga parcial	225,35
Región Pacifico	Térmica	212,35
	Térmica/arco eléctrico	209,35
	Arco eléctrico	197,45
Patrón de referencia	Descarga parcial	209,35
		212

2.6 Pruebas de microscopía electrónica de barrido

Se realizaron pruebas de microscopía electrónica de barrido en ambiente (E-SEM) a todas las muestras de transformadores fallados cuyas muestras fueron cortadas en forma transversal, sin embargo, a continuación, se evalúa el elemento o combinación de estos, que producen precipitados por alta temperatura (*inclusiones o impurezas*) en la chapa de acero al silicio para la falla por arco eléctrico. Los que se observan en el espectro, son los que afectan la calidad y durabilidad del material, dado que luego de reparados duran menor tiempo en servicio [10].

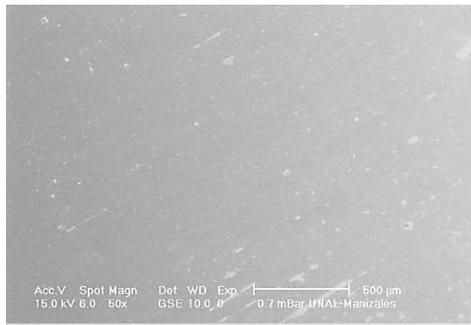


Figura 3. SEM Muestra Región Antioquia. Fuente: R. Ospina, 2012.

En la figura 3 de la muestra procedente de la Región Antioquia, el silicio (Si), oxígeno (O) y fósforo (P), son los elementos que presentan cambios significativos en el espectro e influyen en los precipitados por alta temperatura.

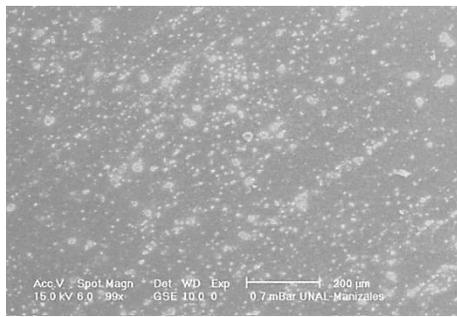


Figura 4. SEM Muestra Región Caldas. Fuente: R. Ospina, 2012.

En la figura 4 de la muestra procedente de la Región Caldas, los elementos que producen cambios significativos son el silicio (Si) y el oxígeno (O), también el magnesio (Mg) y el fósforo (P) como se indicó anteriormente.

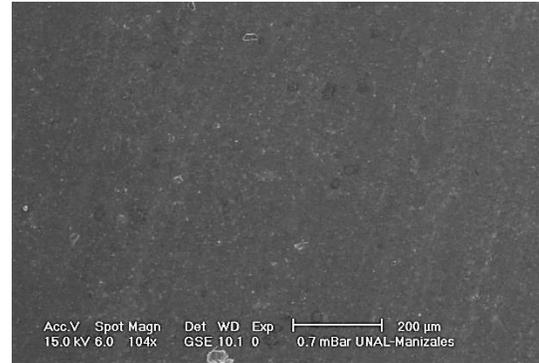


Figura 5. SEM Muestra Región Pacífico. Fuente: R. Ospina, 2012.

En la figura 5 cuya muestra procede de la Región Pacífico, hay bastante similitud a la indicada anteriormente de la Región Caldas, lo que pudiera inferir lo siguiente: “a pesar de los cambios de temperatura debido a las distintas ubicaciones geográficas, la respuesta ante la falla se mantiene”.

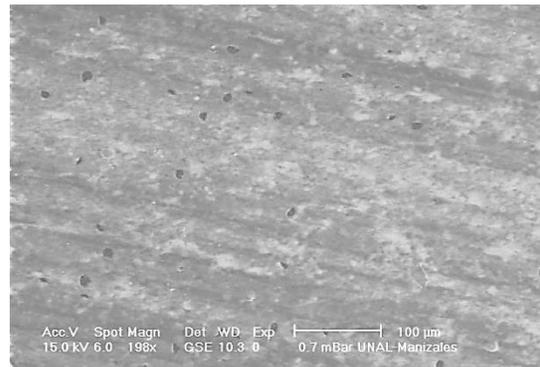


Figura 6. SEM Muestra Región Bogotá. Fuente: R. Ospina, 2012.

En la figura 6 de la muestra procedente de la Región Bogotá presenta el mismo comportamiento que la procedente de la región Antioquia, pero es menor la proporción de oxígeno (O) y fósforo (P). La fotomicrografía no evidencia exceso de óxidos, la muestra está “limpia de precipitados por alta temperatura”.

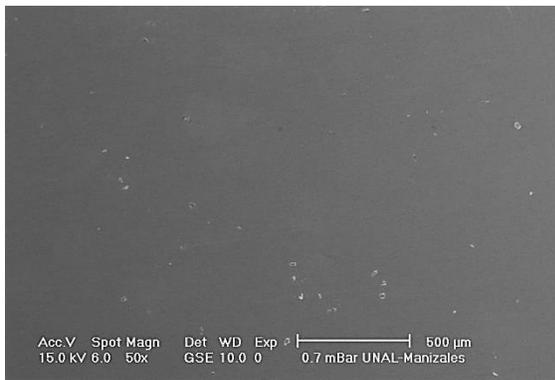


Figura 7. SEM Muestra Patrón. Fuente: R. Ospina, 2012.

En la figura 7 correspondiente a la muestra patrón, el silicio (Si) y el oxígeno (O) son los elementos de mayor incidencia, luego el fosforo (P) y aluminio (Al). La fotomicrografía no muestra alteraciones o presencia de “Inclusiones o impurezas”.

2.7 Pruebas de Difracción por Rayos X

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de acuerdo a la región de procedencia de las muestras de equipos fallados aplicando la ecuación ec. (1) Debye-Scherrer, se determina el tamaño de grano (crystal size) cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.

$$T = \frac{c\lambda}{(FWHM_{m,s})\cos\theta} = \frac{c\lambda}{\sqrt{(FWHM_M^2 - FWHM_S^2)} * \cos\theta} \quad (1)$$

Tabla 4. FWHM, 2 theta y Tamaño del cristal. Fuente: Arias. N (2012).

Muestra en estudio	FWHM	2 theta	Tamaño de grano (cristal) (nm)
Región Antioquia. Falla Térmica	0,651	43,742	13,64
Región Antioquia. Falla Descarga Parcial	0,68	43,583	13,01
Región Antioquia. Falla Arco Eléctrico	1,704	43,672	5,05
Región Caldas. Falla Térmica	0,501	42,871	18,15
Región Caldas. Falla Arco Eléctrico	0,144	43,505	
Región Caldas. Falla Arco Eléctrico/Térmica	0,248	43,892	48,2

Región Caldas. Falla Descarga Parcial	0,248	44,09	48,23
Región Pacífico. Falla Térmica	0,384	44,149	25,01
Región Pacífico. Falla Arco Eléctrico	0,271	43,875	41,06
Región Pacífico. Falla Descarga Parcial	0,573	44,464	15,71
Región Cundinamarca. Falla Térmica	0,228	43,938	57,68
Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico/Térmica	0,296	43,318	35,59
Región Bogotá. Falla Arco Eléctrico	0,234	43,888	54,36
Región Bogotá. Falla Descarga Parcial	0,553	44,045	16,31
Región Bogotá. Falla Térmica	0,293	44,009	36,23
Patrón	0,652	43,459	13,6

3. Resultados y análisis

3.1 Pruebas de Dureza

“El cambio más significativo se evidencia en la muestra procedente de la Región Bogotá de la muestra correspondiente a las fallas por arco eléctrico”. Ver figura 8:

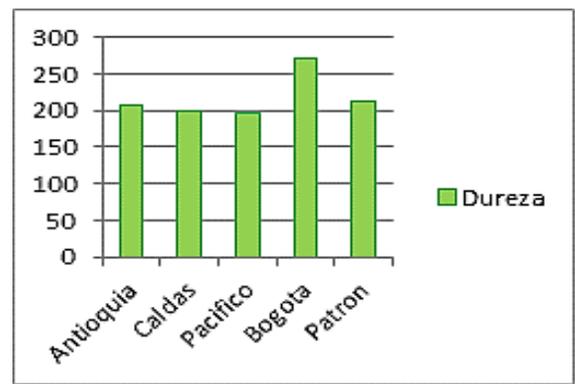


Figura 8. Resultados obtenidos de las mediciones de dureza. Fuente: [2].

3.2 Pruebas de Microscopia electrónica de barrido

Las imágenes muestran los cambios de fase, inclusiones, y otros de la estructura física a fin de compararlas con las fotomicrografías, además de incorporar el espectro con los elementos químicos,

que afectan cambios en la aleación e influyen en su “deterioro térmico como evidencia significativa”.

3.3 Difracción de rayos X

Todos los tamaños de cristal evaluados en la presente investigación procedentes de distintas regiones de Colombia, están fuera de los rangos establecidos, es decir, la falla por arco eléctrico “afecta esta condición del material”, independiente de la ubicación geográfica del transformador en estudio. La relación con el tamaño del cristal indicada en la figura 9 es de suma importancia, porque las muestras procedentes de las Regiones de Bogotá y el Pacífico, presentan un tamaño muy grande en comparación con la muestra patrón, no siendo el caso de las procedentes de las Regiones de Antioquia y Caldas, cuyos tamaños son bastante reducidos, lo cual permite establecer que “la temperatura ambiente influye en los cambios que presenta la microestructura del material”.

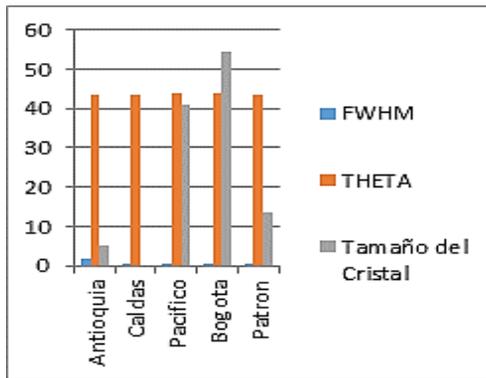


Figura 9. Tamaño de cristal en la falla por arco eléctrico. Fuente: [2.]

Las pérdidas totales en el núcleo de los transformadores de distribución debido a las Corrientes de Foucault e Histéresis Magnética [11], [12], se encontraron realizando análisis químico de la chapa de acero al silicio para determinar el porcentaje de carbono, cuyo referente es utilizado en las propiedades físicas de las aleaciones de acero al silicio entre las cuales se encuentran: resistencia eléctrica, fuerza coercitiva, conductibilidad térmica, inducción remanente y permeabilidad magnética [2].

Estas propiedades físicas se determinan aplicando métodos numéricos con el programa Matlab®, obteniendo funciones y gráficos tal y como, se indica a continuación [2],[13],14]:

- Polinomio interpolador de Newton de grado menor o igual que N que pasa por los puntos $(X_k, Y_k) = (X_k, f(X_k))$ para $K=0,1,\dots,N$:

$$P(x) = d_{0,0} + d_{1,1}(x-x_0) + d_{2,2}(x-x_0)(x-x_1) + \dots + d_{n,n}(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{n-1})$$
- Recta de regresión $y=Ax+B$ que mejor se ajusta en el sentido de los mínimos cuadrados a los N datos $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$.
- Construcción del polinomio de grado M dado por $P_m(x) = c_1 + c_2x + c_3x^2 + \dots + c_mx^{(m-1)} + c_{m+1}x^m$ que mejor se ajusta en el sentido de los mínimos cuadrados a las N parejas de datos $\{(x_k, y_k)\}^N_{k=1}$.

3.4 Cálculo de Pérdidas Totales: Pérdidas por Corrientes de Foucault y Pérdidas por Histéresis Magnética

En un transformador se producen las pérdidas por corrientes de Foucault (Pf), pérdidas por histéresis (Ph) y en el cobre del bobinado (Pcu) [15].

3.5 Pérdidas por Corrientes de Foucault

Se producen en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación de flujo magnético. A continuación, en la tabla 5 se muestran las características para la determinación de las pérdidas de potencia (W/kg).

Tabla 5. Características para la determinación de las pérdidas de potencia. Fuente: [10].

Espesor	Tolerancia	Aleación % SI	1 Tesla (10^4 Gauss) W/kg
0,5	0,10	0,5 – 1	2,90
0,5	0,10	2,5	2,3
0,35	0,10	2,5	1,7
0,35	0,10	4	1,3
0,35	0,10	4,5	1,2
0,35	0,10	4,5	0,9

Se obtienen a partir de la siguiente expresión, ecuación (2):

$$P_f = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \cdot \Delta^2}{10^{11}} \quad (2)$$

dónde:

P_f = pérdidas por corriente de Foucault (W/kg).

f = frecuencia en Hz.

B_{\max} = inducción máxima en Gauss.

Δ = espesor de la chapa en mm.

3.6 Pérdidas por Histéresis Magnética

La histéresis magnética es el fenómeno que se produce cuando la imantación de los materiales ferromagnéticos no solo depende del valor del flujo sino también de los estados magnéticos anteriores, la inducción magnética dependerá del tipo de chapa [16]. Se obtiene aplicando la fórmula de Steinmetz indicada a continuación, ec. (3):

$$P_h = K_F \cdot f \cdot B_{\max}^n \quad (3)$$

Dónde:

P_h = pérdidas por Histéresis Magnética (W/kg).

K_h = coeficiente de cada material.

f = frecuencia en Hz.

B_{\max} = inducción máxima en Tesla.

$n = 2$ para $\beta > 1$ Tesla y $1,6$ para $\beta < 1$ Tesla

3.7 Pérdidas Totales

Las pérdidas de potencia en el hierro (P_{FE}) o en el núcleo magnético son la suma correspondiente a las pérdidas por Foucault (P_f) y por histéresis (P_h) tal y como, se indica a continuación, ec. (4):

$$P_{\text{Totales}} = (P_f) + (P_h) \quad (4)$$

La ecuación final utilizada ec. (5) corresponde a la siguiente expresión [17]:

$$B_{\max} = \sqrt{\left(\frac{10^{11} P_t}{10^{11} K_h f + 2,2 f^2 \Delta^2} \right)} \quad (5)$$

Los resultados obtenidos del análisis químico realizado con el Equipo Spectrovac, Marca Baird. El porcentaje de carbono obtenido y comparado con el valor promedio, se muestra en la tabla 6:

Tabla 6. Análisis químico. Fuente: [10].

Regiones	Fallas	% Carbono
Región Antioquia	Térmica	0,193
	Descarga parcial	0,069
	Arco eléctrico	0,010
Región Caldas	Térmica	0,067
	Arco eléctrico	0,040
	Arco eléctrico/térmica	0,019
	Descarga parcial	0,014
Región Cundinamarca	Térmica	0,031
Región Bogotá	Arco eléctrico/térmica	0,105
	Arco eléctrico	0,093
	Descarga parcial	0,101
Región Pacífico	Térmica	0,1735
	Térmica/arco eléctrico	0,131
	Arco eléctrico	0,002
Patrón de referencia	Descarga parcial	0,033
		0,033

En la tabla 7, se muestra resultados obtenidos [17], los cuales han sido comparados con las pruebas magnéticas:

Tabla 7. Pérdidas Totales. Fuente: [10].

Región Antioquia	Tipo de falla	% de Carbono	Pruebas magnéticas
Muestra 1	Térmica	114,688596	85,8702465
Muestra 2	Descarga parcial	117,877042	85,8702465
Muestra 3	Arco eléctrico	119,368088	85,8702465
Región Caldas			
Muestra 5	Térmica	117,880969	85,8702465
Muestra 6	Arco eléctrico	118,586927	86,020789
Muestra 7	Arco eléctrico	119,133076	85,8702465
Muestra 8	Descarga parcial	119,25154	86,173507
Región Pacífico			
Muestra 9	Térmica	158,569707	122,932067
Muestra 10	Arco eléctrico	119,555869	86,1714773
Muestra 11	Descarga parcial	118,732706	86,1735068
Región Cundinamarca			

Muestra 12	Térmica	139,324676	103,242098
Región Bogotá			
Muestra 13	Arco eléctrico/Térmica	235,265044	191,182617
Muestra 14	Arco eléctrico	117,257369	86,020789
Muestra 15	Arco eléctrico	118,116709	86,020789
Muestra 16	Descarga parcial	116,557365	86,018759
Muestra 17	Térmica	115,111196	86,020789
Patrón			
Muestra 18		131,828066	98,5467465

En la Tabla 8 se determinan las diferencias del tamaño de grano en nanómetros, luego en la Tabla 9 complementando con la figura 10, la relación entre las pérdidas totales: debido al efecto Foucault e histéresis magnética versus tamaño de grano.

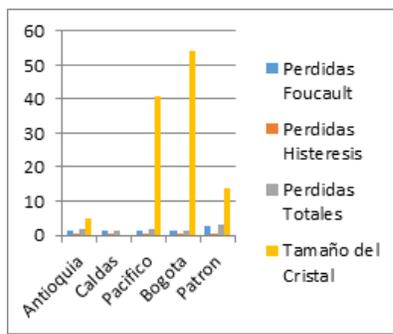


Figura 10. Tamaño de grano versus relación de pérdidas en la falla por arco eléctrico de acuerdo al porcentaje de carbono. Fuente: [2]

Tabla N° 8. Tamaño del grano versus el error obtenido. Fuente: [2].

Región	FWHM	THETA	Tamaño del Cristal	Error	Observaciones
	M	A			
Antioquia	1,704	43,672	5,05	0,3	Valor por debajo del patrón
Caldas	0,144	43,505	0	0,00	Valor que no puede apreciarse
Pacífico	0,271	43,875	41,06	3,02	Valor por encima del patrón
Bogotá	0,234	43,888	54,36	4,00	Valor por encima del patrón
Patrón	0,652	43,459	13,6	1	Valor patrón

Todos los tamaños de grano están fuera de los rangos establecidos, es decir, la falla por arco

eléctrico “*afecta esta condición del material*”, independiente de la ubicación geográfica del transformador en estudio.

Tabla N° 9. Pérdidas versus tamaño del cristal de acuerdo al porcentaje de Carbono. Fuente: [2].

Región	Pérdidas totales	Tamaño del Cristal	Error aproximado
Antioquia	1,59157447	5,05	1,421048634
Caldas	1,58115902	0	1,411749125
Pacífico	1,59407866	41,06	1,423284518
Bogotá	1,563432	54,36	1,395921429
Patrón	3,16938739	13,6	2,829810170

Las aproximaciones para obtener las pérdidas totales a partir del porcentaje de carbono de las muestras de equipos fallados traen consigo, errores en la medición, de tal manera que; al calcular las pérdidas totales los resultados obtenidos están por encima de los establecidos por el fabricante, sin embargo, por razones de inmediatez para las empresas que reparan o fabrican estos equipos este método resulta bastante útil, siempre y cuando, “*se considere dicho error*”.

La relación con el tamaño de grano que se muestra en la figura 10 es importante, porque las muestras procedentes de las Regiones de Bogotá y el Pacífico, presentan un tamaño muy grande en comparación con la muestra patrón, no siendo el caso de las procedentes de las Regiones de Antioquia y Caldas, cuyos tamaños son bastante reducidos. “La temperatura ambiente influye de manera importante, en los cambios que presenta la microestructura del material”.

Conclusiones

Con los resultados obtenidos en la presente investigación se ha generado un nuevo conocimiento que permitirá la continuación de trabajos similares en el área de tal forma que, mejoren las condiciones en la calidad del material

luego de producirse alguna falla. Las condiciones ambientales afectan la calidad térmica de la chapa de acero al silicio y su reutilización, originando precipitados por alta temperatura (óxidos Tipo D entre 4 y 12 μ), al igual que disminución del tamaño de grano 2 (estándar ASTM o 5.05 nm), afectando estas condiciones entre 33,33 y 61,15 +/- 10 % respectivamente. Las pérdidas totales del núcleo se deben a presencia de óxidos tipo D y cambios en el tamaño de grano por variación de la temperatura ambiente.

Recomendaciones

Determinar cambios de fase en la chapa de acero al silicio, por efecto de las condiciones ambientales en transformadores de distribución.

Agradecimientos.

A la empresa FYR Ingenieros C.A, a los Laboratorios de Materiales Nanoestructurados y Funcionales y Física del Plasma de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, de manera especial a los ingenieros Nayda Arias y Rogelio Ospina, también al Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Referencias

1. Mago, M. (2011) *Análisis de fallas en transformadores de distribución utilizando métodos no convencionales*. Universidad de Carabobo, Área de Estudios de Postgrado. Valencia, Venezuela.
2. Mago, M. (2014) *Sistema Estocástico Unificado para la predicción confiable de fallas por condiciones ambientales en transformadores de distribución*. Universidad de Carabobo, Área de Estudios de Postgrado. Valencia, Venezuela.
3. Mago, M; Valles, L; Olaya, J. (2011) Evaluación Metalográfica de la chapa de acero al silicio y de los devanados del núcleo del transformador monofásico Bajo Condición de Falla. *Revista INGENIERIA UC*. Volumen 18, N° 3, pp 51-63.
4. Fang, F., Xu, Y.-B., Zhang, Y.-X., Misra, R.D.K., Wang, G.-D. (2015). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* .381, pp. 433-439. http://en.ustc.findplus.cn/n_index_findplus_en.php?h=search_list&query=recrystallization+texture&action=„addexpander%28fulltext%29
5. Wang, Y., Xu, Y.-B., Zhang, Y.-X., Liu, H.-T., Wang, G.-D. (2014). *Journal of magnetism and magnetic materials* .379, pp. 161-166. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/.../379>
6. ASTM E 112-96. Standard test methods for determinig average grain size.
7. ASTM E-45. Standard test methods for determinig the inclusion content of steel. <http://www.astm.org/Standards/E45.htm>
8. Shackelford, J. (1998). *Ciencia de materiales para ingenieros*. Editorial Prentice Hall. Cuarta edición. México.
9. Smith, W. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Mc Graw Hill. Cuartaedición. España.
10. Mago, M; Valles, L; Olaya, J. (2012). Análisis de fallas en transformadores de distribución utilizando el software estadístico SPSS (Statistical Package for The Social Sciences). *Revista Ingeniería e Investigación Universidad Nacional de Colombia*. Volumen 32. Número 2. Pp 40-45. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/ingeninv/article/view/31938/34558>
11. Raffoul, Y; Leal Irvin. (2006) *Determinación de la factibilidad técnica y económica de la chapa de acero al silicio para transformador monofásico*. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería. Valencia, Venezuela.
12. Santofimia, M. (2006). *La transformación Bainítica sin formación de carburos en aceros*. Universidad

Complutense de Madrid, Departamento de Metalurgia Física. Madrid, España.

13. Lajtin, Y. (1983). *Metalografía y tratamiento térmico de los Metales*. Tercera edición. Editorial MIR. Moscú. URSS.
14. Mathews, J; Fink, K. (2005). *Métodos Numéricos con Matlab*. Editorial Prentice Hall. Tercera Edición. Madrid, España.
15. E. Staff del M.I.T. (1981). *Circuitos Magnéticos y Transformadores*. Editorial Reverte. Argentina.
16. Reed-Hill, Robert. (1976). *Principios de Metalurgia Física*. Editorial C.E.C.S.A. Sexta Edición, México.
17. Norma RA7-60. Valores de Pérdidas Equipos Bajo Condición de Carga. <http://www.epm.com.co/site/Portals/0/Users/001/01/1/RA7-060.pdf>. Consultado: 20-06-12 hora: 10:30 am.