

Evaluación metalográfica de la chapa de acero al silicio y de los devanados del núcleo del transformador monofásico bajo condición de falla.

María Gabriela Mago^{*,a}, Luis Vallés^a, Jhon Jairo Olaya^b, Edgar Espejo^b, Martha Lucia Zequera^c

^aÁrea de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

^bPostgrado en Materiales y Procesos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. ^cDoctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Pontificia Javeriana de Bogotá, Bogotá, Colombia.

Resumen.-

Esta investigación plantea realizar pruebas en transformadores de distribución monofásicos de poste bajo condición de falla, efectuando una evaluación metalogràfica de la chapa de acero al silicio y de los devanados, como una continuación de las investigaciones sobre métodos no convencionales para el análisis de máquinas con componentes metálicos de la industria eléctrica. Aplicando estas técnicas, fueron preparadas probetas de materiales de varios transformadores fallados por distintas causas, con la finalidad de evaluar la relación entre los efectos de la condición de falla, y el deterioro en la calidad de los materiales utilizados en la fabricación de los mismos. El trabajo se apoyó en ensayos experimentales realizados en Venezuela y Colombia respectivamente. De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación se considera necesario, aplicar técnicas de microscopia electrónica de barrido y difracción por rayos X, a fin de ampliar el análisis de fallas, debido a que no se percibe con estos resultados modificaciones en la micro estructura del material.

Palabras clave: Aceros al Silicio, bobinas, transformador monofásico, micro estructura.

Metallographic evaluation of the silicon steel sheet and the windings of the transformer core phase fault condition

Abstract.-

This research focuses on testing single phase distribution transformers under fault condition pole, making a metallographic evaluation of the silicon steel sheet and coils, as a continuation of research on unconventional methods to the analysis of machines with components metallic electrical industry. Applying these techniques, materials were prepared specimens of several transformers failed for various reasons, in order to assess the relationship between the effects of the fault condition, and deterioration in the quality of materials used in manufacturing them. The work is supported by experimental tests conducted in Venezuela and Colombia respectively. According to the results obtained in this investigation is deemed necessary, to apply techniques of scanning electron microscopy and X-ray diffraction in order to extend the analysis of failures, because that is not perceived by these results changes in the microstructure of the material.

Keywords: Silicon steel, coil, transformer single-phase, microstructure.

Recibido: junio 2011 Aceptado: diciembre 2011

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio trata acerca de la evaluación de la chapa de acero al silicio y de los devanados de un transformador monofásico reductor de poste bajo condición de falla aplicando análisis

^{*}Autor para correspondencia

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

metalogràficos. Ya en el año 2006 [1] se hicieron las primeras pruebas de este tipo, sin embargo; no era en transformadores bajo condición de falla.

La investigación considera los datos determinados en un transformador venezolano sin condición de falla, realizándose nuevos ensayos a transformadores colombianos en condición de falla debido a la disponibilidad de los mismos. De manera especifica, se evalúa la calidad de los materiales de fabricación, aumentando la experticia de calificación y complementando los métodos para el diagnóstico.

2. RELACIONADAS CON EL TRANSFOR-MADOR DE DISTRIBUCION

El transformador está constituido básicamente, por los devanados y el núcleo, los cuales corresponden a la parte activa o son conocidos como el corazón del transformador. En esta sección es donde se transforman las tensiones y corrientes.

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. En la Figura 1 indicada a continuación muestran algunas partes constitutivas.



Figura 1: Partes constitutivas del transformador de distribución.

3. RELACIONADAS CON ANALISIS ME-TALOGRAFICO DE LOS MATERIALES DE FABRICACION

El análisis metalogràfico, consiste en observar en el microscopio, probetas pulidas y atacadas químicamente con reactivos apropiados, permitiendo deducir la historia térmica del metal. El procedimiento de aplicación comprende los pasos indicados a continuación [2]

- Selección del sitio de extracción: la determinación del lugar donde se va a obtener una probeta. Su orientación y tamaño, es de suma importancia si se quiere que esta revele los detalles que interesan.
- Preparación de la probeta: una vez decidido el lugar de extracción de la probeta se siguen los pasos de corte, desbaste grueso y montaje, desbaste fino y pulido
- Corte: durante esta preparación se da el tamaño a la probeta, el cual debe ser apropiado para su manipulación.



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

En la Figura 2 indicada a continuación, se muestra la preparación de las probetas utilizadas en la presente investigación.

- Desbaste y montaje: la primera operación se efectúa en una serie de papeles de lija de finura de grano cada vez mayor; se divide en desbaste grueso y desbaste fino de acuerdo con las lijas usadas.
- Pulido: se efectúa sobre discos giratorios, cubiertos con paños especiales sobre los cuales se adiciona abrasivo en polvo y lubricante.
- Ataque: la superficie pulida tiene el aspecto de un espejo; en estos casos es necesario atacar la superficie con un reactivo para distinguir los límites de grano, diferenciar las fases, hacer resaltar las inclusiones.

Tabla 1: Propiedades típicas de las aleaciones de las chapas de acero al silicio.

F	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
Fuerza Coercitiva	Hc = 32 A/m (0,4 Oe)		
Permeabilidad magnética inicial	$\mu_0 = 0,00075 - 0,0010 \text{ H/m} (600-800 \text{ Gs/Oe})$		
Resistencia eléctrica máxima	$\rho \max = 0.010 - 0.025 \text{ H/m} (80000-20000 \text{ Gs/Oe})$		
Fuente: [4].			

 Visualización a través de microscopio: en la presente investigación se utilizan probetas transparentes (montaje al frio) que son visualizadas con luz transmitida cuya información se proyecta sobre una pantalla computarizada.

3.1. Aceros y aleaciones magnéticas utilizadas en la fabricación de materiales eléctricos

Se deben distinguir dos grupos de aceros y aleaciones magnéticas:

- a) Aceros y aleaciones magnéticas duras: estos aceros se emplean para los imanes permanentes: estos deben poseer una alta fuerza coercitiva Hc, y suficiente inducción residual Br, y; conservarlas durante largo tiempo y
- b) Aceros magnéticos blandos: estos aceros se emplean para la fabricación de núcleos de instalaciones magnéticas que trabajan en campos alternos.

En la actualidad, el material más empleado en la fabricación de transformadores de distribución, es el acero (magnético blando) al silicio, de bajo contenido de carbono con 2 a 4,5 % de silicio [3] que forma con el hierro una solución sólida, aumentando la resistencia eléctrica, y la permeabilidad magnética, disminuyendo levemente la fuerza coercitiva y las pérdidas en las histéresis, trayendo como resultado el aumento del grano, la acción de grafitación y mejor desoxidación del acero, sin embargo, la presencia de silicio baja la inducción en los campos potentes y eleva la fragilidad, sobre todo con un contenido de un 3-4 % [4]. En la Tabla 1 se muestran las propiedades típicas de las aleaciones de las chapas de acero al silicio.

3.2. Las bobinas del transformador de distribución

La sección que corresponde a la bobina está constituida por dos devanados: uno de alta tensión y otro de baja tensión. El devanado de alta tensión (primario) consta de un solo arrollado formado por varias espiras, las cuales son construidas con alambre colocado en forma continua. El alambre utilizado es de cobre y la sección puede ser rectangular o circular dependiendo del diseño. Este alambre viene recubierto con un material aislante resistente a altas temperaturas. El devanado de baja tensión (secundario) consta de dos arrollados, los cuales están conformados por espiras que se construyen con cintas de aluminio y con un diseño resistente a las fuerzas que ejercen los cortocircuitos externos.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Tabla 2: 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: [1].					

A través del método de análisis "*Espectrofotometría de Absorción Atómica*" realizado en los laboratorios de la Escuela de Química de la Universidad de Carabobo (UC) en Venezuela, 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 2 se indican los mismos.

Acesita Espesor (mm)	Espesor (mm)	Pérdidas Magnéticas Máximas (W/Kg)		Indu	Inducción Magnética Minima (T)		Eavej. Mag. Máx.	Densidad (g/cm²)	Factor Min. Launin. (%)
	1,	ST.	B 800	8	B				
		50 Hz	60 Hz	300	2300	10000			
E004	0,27	0,85	1,12	1,75	1,87	1,97	5	7,65	.94,5

Tabla 3: Propiedades características de la chapa.



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 fué 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 a bajo aumento y se evidencia la presencia de granos de ferrita e inclusiones/precipitados en la matriz.

En la cara longitudinal (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). Estos ensayos fueron realizados en la Escuela Ingeniería de Mecánica de la Universidad de Carabobo (UC) [5].

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



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

por histéresis [6]. Se muestran en la Tabla 3 las propiedades características de la chapa de acero al silicio, suministrados por el proveedor de la empresa venezolana, Acesita de Brasil.

De acuerdo al procedimiento descrito anteriormente, se identificó de una manera cuantitativa la composición química de los elementos presentes, a dos aleaciones suministradas por la empresa colombiana FYR Ingenieros C.A , En las Tablas 4 y 5 se indican los mismos.

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: Fundición Imes.					

Los ensayos para evaluar impurezas y tamaño de grano fueron realizados a las muestras correspondientes de chapas de acero al silicio, bobinas de alta tensión y bobinas de baja tensión de equipos fallados utilizados de referencia en la presente investigación, en los laboratorios del Doctorado en Ciencia y Tecnología de los de Materiales

Tabla 5: Composición química de la chapa magnética de silicio colombiana (falla por cortocircuito externo).

% C	% Mn	% P	% S	% Si		
0,005	0,0852	0,0376	0,0299	2,598		
Fuente: [1].						

de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá [7].

4.1. Inclusión o impuresas en la chapa de acero al silicio de los transformadores fallados

En las Figuras 5 a la 12 se muestran los resultados que presentan las inclusiones o impurezas de dichos materiales, versus la condición de falla.



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



Figura 7: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra de acero al silicio del transformador fallado por Sobretensión 100X. (cara longitudinal).



Figura 8: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra de acero al silicio del transformador de control 100X. (cara longitudinal).



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).



Figura 9: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra de acero al silicio del transformador fallado por Cortocircuito Externo 100X. (cara longitudinal).



Figura 10: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra de acero al silicio del transformador fallado por Cortocircuito Externo en alta tensión 100X.(cara longitudinal).



Figura 11: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra de acero al silicio del transformador fallado por Humedad 100X. (cara longitudinal).

4.2. Inclusiones o impuresas en las bobinas de alta y baja tensión de los transformadores fallados

En las Figuras 13 a la 26 se muestran los resultados que presentan las inclusiones o impurezas de dichos materiales, versus la condición de falla.



Figura 13: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Cortocircuito Externo en la bobina de alta tensión 100X. (cara longitudinal).





Figura 12: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra de acero al silicio del transformador muestra patrón 100X. (cara longitudinal).

De las imagenes observadas anteriormente, se puede concluir; que ninguna falla modifica la microestructura del material de la chapa de acero al silicio de los transformadores utilizados de referencia en la presente investigacion. Figura 14: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Cortocircuito Externo en la bobina de baja tensión 100X. (cara longitudinal).



Figura 15: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Sobretensión en la bobina de alta tensión 100X. (cara longitudinal).



Figura 16: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Sobretensión en la bobina de baja tensión 100X. (cara longitudinal).



Figura 17: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Humedad en la bobina de alta tensión 100X. (cara longitudinal).



Figura 18: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Humedad en la bobina de baja tensión 100X. (cara longitudinal).



Figura 19: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Defecto de Operación en la bobina de alta tensión 100X. (cara longitudinal).



Figura 20: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Defecto de Operación en la bobina de baja tensión 100X. (cara longitudinal).

MAC		1777 C		
		(a)	e" 95	ļm.
			And and And And And And And And And And And And And And And And And And And And	in.

Figura 21: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Sobrecarga en la bobina de alta tensión 100X. (cara longitudinal).



Figura 22: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas del transformador fallado por Sobrecarga en la bobina de baja tensión 100X. (cara longitudinal).



Figura 23: Disposicion, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra patrón en la bobina de alta tension 100X. (cara longitudinal).



Figura 24: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtendida de la muestra patron en la bobina de baja tensión 100X. (cara longitudinal).



Figura 25: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra del transformador de control bobina de alta tensión 100X. (cara longitudinal).



Figura 26: Disposición, forma y tamaño de inclusiones obtenidas de la muestra del transformador de control bobina de baja tensión 100X. (cara longitudinal).

De las imagenes observadas anteriormente, se puede concluir que la bobina de alta tension del transformador fallado por cortocircuito externo y la de baja tension del fallado a causa de la humedad, presentan precipitados por alta temperatura, aumento de la cantidad de discontinuidades de la matriz, con presencia de inclusiones no metálicas [8]. Las demas muestras de bobinas tanto de alta como de baja tension de equipos fallados, estan "limpias" y no muestran mayores inclusiones o impurezas en las mismas.

4.3. Tamaño de grano en la bobinas de alta tensión y baja tensión de los transformadores fallados

El ataque químico realizado a las probetas preparadas de las 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 las Figuras 27 a 40 se muestran los resultados obtenidos de este procedimiento experimental.



Figura 27: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99% atacada con cloruro férrico1000X de la bobina de baja tensión del transformador de control.



Figura 28: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99% atacada con cloruro férrico1000X de la bobina de alta tensión del transformador de control.



Figura 29: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99 % atacada con cloruro férrico1000X de la bobina de alta tensión del transformador fallado por cortocircuito externo.



Figura 30: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99 % atacada con cloruro férrico 250X de la bobina de baja tensión del transformador fallado por cortocircuito externo.



Figura 31: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99% atacada con cloruro férrico 1000X de la bobina de alta tensión del transformador fallado por humedad.



Figura 32: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99 % atacada con cloruro férrico 1000X de la bobina de baja tensión del transformador fallado por humedad.



Figura 33: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99% atacada con cloruro férrico 250X de la bobina de alta tensión del transformador fallado por defecto de operación.



Figura 34: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99% atacada con cloruro férrico 1000X de la bobina de baja tensión del transformador fallado por defecto de operación.



Figura 35: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99% atacada con cloruro férrico 1000X de la bobina de alta tensión del transformador fallado por sobrecarga.



Figura 36: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99% atacada con cloruro férrico 1000X de la bobina de baja tensión del transformador fallado por sobrecarga.



Figura 37: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99% atacada con cloruro férrico 1000X de la bobina de alta tensión del transformador fallado por sobretensión.



Figura 38: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99% atacada con cloruro férrico 250X de la bobina de baja tensión del transformador fallado por sobretensión.



Figura 39: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99 % atacada con cloruro férrico 1000X de la bobina de alta tensión del transformador patrón.

De las figura indicadas anteriormente 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, porque la fotomicrografía se hizo a 1000X (aumentos), pero lo que corresponde a los resultados obtenidos, sin embargo, permite evaluar que las condiciones de alta temperatura como es el caso de los equipos utilizados en la presente investigación, producen



Figura 40: Fotomicrografía de una muestra de cobre 99% atacada con cloruro férrico 1000X de la bobina de baja tensión del transformador patrón.

difusión, y si hay difusión, el grano crece y por consiguiente; son menores las pérdidas, lo cual se cumple, para este tipo de material [9].

4.4. Tamaño del grano en las chapas de acero al silicio de los transformadores fallados

Las muestras de acero al silicio de los transformadores fallados fueron preparadas metalográficamente y atacadas con 100 cm³ de acido clorhídrico (HCL), 3 cm³ de acido 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 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 Figuras 41 y 42.



Figura 41: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio (cara longitudinal) del transformador de control 100X.

Del resultado obtenido anteriormente se puede concluir que el tamaño del grano de acuerdo a la norma ASTM E112–96 o Standard Test



Figura 42: Disposición, forma y tamaño de grano obtenidos de la muestra de acero al silicio del transformador de control 50X (cara transversal).

Methods for Determining Average Grain Size es de aproximadamente 2 [10].

Por lo tanto, se preparó otro reactivo que contiene 10 ml (HNO₃) (acido nítrico) y 90 ml (CH₃OH) (etanol), para realizar ataque químico a las muestras de equipos fallados (chapas de acero al silicio) suministradas por la empresa colombiana, utilizando un algodón y aplicando el mismo por espacio de tres (03) minutos en cada probeta, se obtuvo el tamaño de grano 1, indicado en las Figuras 43 a 49.



Figura 43: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio fallada por corcircuito externo en alta tensión 50X (cara transversal).



Figura 44: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio fallada por corcircuito externo 50X (cara transversal).



Figura 45: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio fallada por defecto de operación 50X (cara transversal).



Figura 46: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio fallada por humedad 50X (cara transversal).



Figura 47: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio utilizada como patrón 50X (cara transversal).



Figura 48: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio fallada por sobrecarga 50X (cara transversal).



Figura 49: Disposición, forma y tamaño de los granos obtenidos de la muestra de acero al silicio fallada por sobretensión 50X (cara transversal).

Del resultado obtenido anteriormente se puede concluir 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 [11] y [12].

5. CONCLUSIONES

Con la realización de esta investigación, se concluyó lo siguiente-

A través del ensayo de espectrofotometría de absorción atómica la chapa utilizada en Venezuela *tiene un contenido de 0,08 % de Carbono, 0,012 % de Manganeso, 0,015 % de Fósforo, 0,002 % de Azufre y 2,90 % de Silicio* siendo, éste último, el elemento más importante que le confiere propiedades magnéticas a la chapa. Según lo indicado en la Tabla 2. Para esta investigación, a través del ensayo de espectrofotometría de absorción atómica la chapa utilizada en Colombia tiene un contenido de 0,1472 % de Carbono, 0,077 % de Manganeso, 0,039 % de Fósforo, 0,0686 % de Azufre y 2,54 % de Silicio, siendo éste último; el elemento más importante que le confiere propiedades magnéticas a la chapa. Según lo indicado en la Tabla 4.

De las imagenes observadas cuando se evalúan 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 investigacion.

De las imagenes observadas cuando las impurezas son evaluadas en los devanados o bobinas de alta y baja tension, permiten concluir; que la bobina de alta tension del transformador fallado por cortocircuito externo y la de baja tension del fallado a causa de la humedad presentan precipitados por alta temperatura, aumento de la cantidad de discontinuidades de la matriz, con presencia de inclusiones no metàlicas. Las demas muestras de bobinas tanto de alta como de baja tensiòn de equipos fallados, estan *"limpias"* y no muestran mayores inclusiones o impurezas en las mismas.

De las imágenes observadas cuando se evalúa el tamaño de grano en los devanados o bobinas de alta y baja tensión, se puede concluir; que 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*, porque la fotomicrografía se hizo a 1000X (aumentos), pero lo que corresponde a los resultados obtenidos, sin embargo, 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 perdidas, lo cual se cumple, para este tipo de material.

De la microscopia 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 microscopia 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 investigacion suministrados por la empresa colombiana.

El tamaño de grano grosero, indica menores pérdidas por histéresis magnética y además, comparando la norma española UNE-EN 10107 que regula las condiciones de uso de las chapas magnéticas de granos orientados, las mismas cumplen en base a certificados de calidad provenientes de las empresas extranjeras que distribuyen este material.

De acuerdo a los resultados de los ensayos realizados en esta investigación, no se observan modificaciones en la micro estructura del material. En este sentido, para investigaciones futuras, se considera necesario aplicar técnicas de microscopia electrónica de barrido y difracción por rayos X, a fin de ampliar el análisis de fallas.

AGRADECIMIENTOS

A las empresas Transformadores del Centro, C.A de Venezuela y FYR Ingenieros, C.A de Colombia. Al Centro de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH), a la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, por el apoyo brindado a la presente investigación.

Referencias

- RAFFOULL, Yamile; LEAL, Irvin. "Estudio de la Factibilidad Técnica Económica de la Fabricación de la Chapa de Acero al Silicio". Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuelas de Eléctrica y Mecánica. Universidad de Carabobo, Valencia, 2006.
- [2] FORERO, Álvaro. "Metalurgia Práctica". Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Febrero 2011.
- [3] BARREIRO, José Apraiz. "Aceros Especiales". 5ta Edición. Madrid, 1975. Editorial DOSSAT.
- [4] LAJTIN, Yu. "Metalografía y Tratamiento Térmico de los Metales". Editorial Mir. 2da Edición Rev. 1977. Moscú, URSS.
- [5] E. STAFF DEL M.I.T. Circuitos Magnéticos y Transformadores. Editorial Reverte. Argentina, Noviembre de 1981.
- [6] SMITH, William. "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales". 3era Edición, España, 1998. Editorial Mc Graw Hill.

- [7] MAGO, María. "Diagnóstico de Fallas en Transformadores de Distribución utilizando Métodos No Convencionales". Tesis de Maestría. Área de Estudios de Postgrado. Facultad de Ingeniería, Valencia, 2011.
- [8] SHACKELFORD, James. "Ciencia de Materiales para Ingenieros". 3era Edición, México, 1992. Editorial Prentice Hall.
- [9] REED-HILL, Robert. "Principios de Metalurgia Física". 6ta Edición, México, 1976. Editorial C.E.C.S.A.
- [10] ALLOY. "Metals Handbook. ASTM International Properties and Selection Irons, Steels and High Performance". Volumen 1, 5ta. Edition. Año 1990.
- [11] METAL HANDBOOK. "Atlas of Microstructures of industrial alloys ASM (American Society for Metals)". Volumen 7, 8va edition, USA, 1972.
- [12] MAGO, María; HURTADO, Lin. "Estudio de la Chapa de Acero al Silicio para Núcleo del Transformador Monofásico". Revista Ingeniería Universidad de Carabobo, Valencia, 2009.