

Análisis de fallas en transformadores de distribución utilizando ensayos no destructivos y pruebas de tensión mecánicas

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

^a*Departamento de Potencia y de Materiales y Procesos de Fabricación, Escuela de Eléctrica y Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.*

^b*Escuela de Mecánica, Postgrado en Materiales y Procesos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.*

^c*Departamento de Electrónica, 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 ensayos no destructivos: partículas magnéticas y líquidos penetrantes a la chapa de acero al silicio, así como también, pruebas de tensión mecánicas al papel aislante, como una continuación de las investigaciones sobre métodos no convencionales para predecir tiempos de vida útil en transformadores de distribución en Venezuela y Colombia respectivamente, que establezcan en el futuro acciones de mejora en los estándares de calidad. Con la aplicación de estas técnicas, se pretende desarrollar simulaciones para determinar la vida remanente en los transformadores de distribución. El trabajo se apoyó en ensayos experimentales realizados en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. De acuerdo a los resultados obtenidos se recomienda utilizar estas pruebas de tensión mecánica como método predictivo en los sistemas de detección y análisis de fallas para estos equipos, ya que el desarrollo de sistemas para mantenimiento preventivo estarán orientados hacia estos métodos no convencionales, de acuerdo a la propuesta de investigación doctoral que se está desarrollando actualmente en el Doctorado en Ingeniería de la Universidad de Carabobo, y cuyos resultados servirán de referencia a estudios posteriores en el área.

Palabras clave: transformador monofásico, análisis de fallas, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, tensión mecánica.

Failure analysis of distribution transformers using non-destructive testing and mechanical tension tests

Abstract.-

This research focuses on testing single phase distribution transformers under fault condition pole, making non-destructive testing: magnetic particle and liquid penetrant to the silicon steel sheet, as well as, mechanical stress testing the insulating paper as a continuation research on non-conventional methods for the analysis of machines with metal components of the electrical industry. With the application of these techniques is to develop simulations to determine the remaining life of the transformers. The work was supported by experimental trials conducted in Colombia. According to the results of these tests is recommended as a method of mechanical stress predictive detection systems and failure analysis for these teams, as the development of preventive maintenance based on these unconventional methods, will soon a reality.

Keywords: single-phase transformer, liquid penetrant, magnetic particles, mechanical stress.

* Autor para correspondencia

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

Recibido: junio 2011

Aceptado: agosto 2011

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio trata acerca de la aplicación de técnicas de ensayos no destructivos a la chapa de acero al silicio de un transformador monofásico reductor de poste (transformador monofásico en aceite) bajo condición de falla, aplicando pruebas con líquidos penetrantes y partículas magnéticas, además de pruebas de tensión mecánicas al papel aislante. De manera específica, se evalúa la calidad de los materiales de fabricación, aumentando la experticia de calificación y complementando los métodos para el diagnóstico con la finalidad de desarrollar técnicas novedosas que faciliten la determinación de la vida remanente en estos equipos al igual que se realiza en reactores, calderas, hornos y tanques de almacenamiento, aplicando estudios de vida restante e integridad estructural con el criterio de gestión de riesgos de ingeniería [1].

Los ensayos no destructivos y las pruebas de tensión mecánicas se aplican a equipos mecánicos y de otras especialidades, verificando, a través de estas técnicas; si pueden continuar en operación, manteniendo un nivel de riesgo aceptable por un periodo de tiempo, o si deben repararse y salir de servicio, de inmediato.

Se consideran transformadores monofásicos de distribución aquellos con capacidad nominal de 10 a 167.5 kVA de acuerdo a la norma venezolana. En Colombia existen transformadores monofásicos de distribución con capacidad nominal desde 3 kVA. 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.

2. TIPOS DE FALLAS EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION

Existe una clasificación de los tipos de fallas que presentan los transformadores de distribución [2], las cuales se indican a continuación:

Térmicas: las mismas ocurren, cuando la temperatura de trabajo sobrepasa la establecida por el fabricante, ocasionando degradación del aceite dieléctrico de manera progresiva, lo que trae como

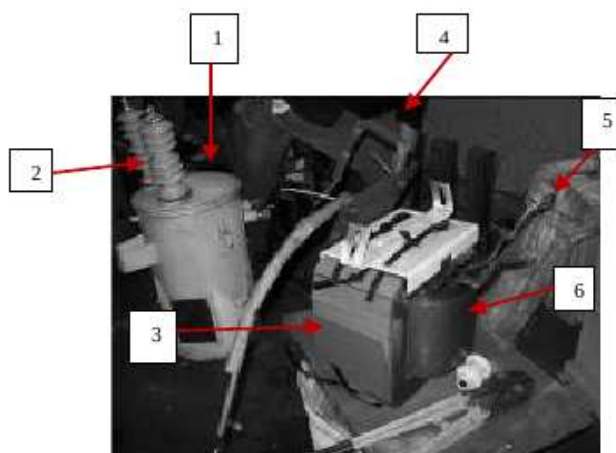


Figura 1: Partes constitutivas del núcleo de un transformador de distribución

1. Recipiente metálico o cuba del transformador
2. Aisladores
3. Chapa de acero al silicio
4. Bobina de baja tensión
5. Bobina de alta tensión
6. Papel aislante

consecuencia a mediano plazo, el deterioro del equipo, por efecto de una sobrecarga.

Arco Eléctrico: las mismas ocurren, cuando fallan las protecciones del transformador, lo que trae como consecuencia, cortocircuitos externos que dañan internamente el equipo, dejando esa parte de la red eléctrica fuera de servicio en forma imprevista.

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.

En la Tabla 1 se indican algunas características de los transformadores fallados cuyas muestras fueron utilizadas en las pruebas experimentales de la presente investigación.

2.1. Otras causas de fallas en transformadores de distribución

Existen otras causas de fallas que se pueden presentar en los transformadores de distribución, para lo cual, se presentan una serie de recomendaciones a fin de evitar la ocurrencia de las mismas [3,4 y 5].

Tabla 1: Muestras de transformadores utilizados

Marca	Nivel de Tensión	Año de fabricación	kVA	Falla presentada
Magnetron	7620/246	2004	10	Sobrecarga
Magnetron	13200/240	2009	15	Humedad
Magnetron	13200/240	2007	10	Cortocircuito Externo
ABB	7620/240	2001	25	Defecto Operación
Siemens	13200/240	2007	15	Sobretensión
Siemens	7620/240	2006	10	Defecto Fabricación
TPL	13200/240	1991	15	Conexión errada en Baja tensión

Fuente: M. Mago (2011).

2.1.1. Especificaciones Técnicas

Existen características nominales indicadas por los fabricantes, que deben corresponder a la carga requerida por la red de distribución eléctrica, dentro de las cuales es importante considerar lo siguiente:

- Nivel básico de aislamiento (BIL) (del valor requerido).
- Impedancia de cortocircuito del valor nominal: si la misma es demasiado alta, afecta la regulación del sistema; y si es demasiado baja, da lugar a elevadas corrientes de corto circuito.
- El conmutador de derivaciones debe ser de accionamiento interno.

2.1.2. Defectos de Fabricación

Aunque hay formas de construcción preestablecidas, las mismas no están exentas de errores que pudieran presentarse, ocasionando fallas en los transformadores de distribución, por lo tanto, se recomienda tener en cuenta lo indicado a continuación, a fin de evitar estos defectos:

- No es recomendable trabajar a niveles de inducción demasiados altos, porque dan lugar a la magnetostricción o deformación del núcleo y producen efectos vibratorios en la parte activa.
- En la fabricación del núcleo se debe evitar la reducción de las distancias internas a niveles críticos.

- Seleccionar materiales que satisfagan las normas y/o valores exigidos para operar a determinados niveles de esfuerzos dieléctricos.
- Seleccionar láminas, pinturas, refuerzos, aisladores, herrajes, empaques de caucho, etc. que soporten condiciones del medio ambiente u otros esfuerzos internos, originados en el transformador.

2.1.3. Defectos de Operación

Los errores humanos que se presentan en la operación de equipos son inevitables, a pesar de la preparación que reciben los operadores del sistema eléctrico. Se recomienda tener en cuenta lo indicado a continuación, a fin de minimizar la ocurrencia de estos efectos:

- Realizar adecuado sistema de selección y montaje utilizando sistemas de movilización y almacenaje apropiados.
- Evaluar el sistema de protecciones existente, a fin de disminuir la condición de falla que pudiera presentarse motivado a: sobretensiones (directas: por rayos y/o de maniobra), sobrecargas y/o fallas en la red (líneas a tierra, cortocircuitos en la red, desbalances de carga).
- Implementar rutinas de inspección que eviten el vandalismo hacia los transformadores de distribución.

3. EFECTOS QUE OCASIONAN LAS FALLAS EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION

Utilizando las definiciones indicadas en el manual de CORPOELEC (CADAPE) [6], que fueron desarrolladas por el Ing. Raúl Cabrera actual Gerente General de la Empresa Transformadores del Centro (Valencia, Venezuela), de las causas y efectos que originan los diferentes tipos de fallas sobre el transformador y que sirven de referencia al personal que realiza labores de reparación y/o mantenimiento para apoyar los diagnósticos, a continuación se indican las mismas.

3.1. Sobrecarga

Cuando un transformador falla debido a una sobrecarga se presentan los siguientes efectos:

- En la conexión de baja tensión hay salidas de cobre descoloridas.
- El papel aislante de la bobina y salidas es quebradizo.
- Aceite dieléctrico ennegrecido o quemado con gran formación de lodo.
- Paredes del tanque descoloridas.
- Formaleta con gran contenido de lodo.



Figura 2: Transformador fallado por Sobrecarga

En caso de ser por error de conexión, en las bobinas de baja tensión se podrá observar una dañada y otra en buen estado. En la Figura 2, se muestra un transformador fallado bajo esa condición, y en la Figura 3; la apariencia del aceite dieléctrico.



Figura 3: Apariencia del aceite dieléctrico de este transformador fallado

3.2. Sobre tensiones de origen atmosférico

Cuando un transformador falla debido a sobretensiones se pueden observar algunos de los siguientes daños:

- Cortocircuito entre las espiras pertenecientes a las dos primeras o dos últimas capas o más.
- A veces se observa también, ennegrecimiento de uno de los aisladores de alta tensión.
- A menudo la bobina descarga la sobretensión sobre el núcleo, o sobre el tanque, pudiendo estar los mismos parcialmente fundidos.
- Evidencia de descarga entre los devanados de alta tensión y baja tensión.



Figura 4: Transformador fallado por Sobre tensión Atmosférica

En la Figura 4, se muestra imagen de un equipo fallado por esta condición y en la Figura 5, la apariencia del aceite dieléctrico.



Figura 5: Apariencia del aceite dieléctrico de este transformador fallado



Figura 6: Transformador fallado por Cortocircuito Externo en alta tensión



Figura 7: Apariencia del aceite dieléctrico de este transformador fallado

3.3. Cortocircuito externo

Cuando ocurre un cortocircuito externo se observa que las bobinas presentan algunos devanados deformados o desplazados el uno con respecto al otro. En la Figura 6, se muestra un equipo fallado por cortocircuito externo en alta tensión y en la

Figura 7 la apariencia del aceite dieléctrico.

3.4. Conexión errada en baja tensión

Las bobinas se presentan con devanados deformados o desplazados el uno con respecto al otro y el transformador puede quedar en buen estado de funcionamiento.

3.5. Defecto de operación

Cuando un transformador falla por defecto de operación se pueden observar los siguientes daños:

- Rotura del conmutador.
- Conexiones erradas en baja tensión.
- Aceite con buena apariencia.
- Puede encontrarse bien la parte activa del transformador.



Figura 8: Transformador fallado por Defecto de Operación



Figura 9: Apariencia del aceite dieléctrico de este transformador fallado

En la Figura 8, se muestra un transformador fallado por defecto de operación y en la Figura 9, la apariencia del aceite dieléctrico:

3.6. Humedad

Cuando un transformador falla por humedad se presentan los siguientes efectos:

- Presencia de agua en el fondo del tanque, en la parte superior de la estructura de soporte apreciables manchas de óxido en algunas piezas metálicas.
- Puntos de oxidación en las partes que no se encuentran sumergidas en el aceite.
- Cortocircuito entre capas de la bobina en su parte superior.



Figura 10: Transformador fallado por Humedad



Figura 11: Apariencia del aceite dieléctrico de este transformador fallado

En la Figura 10 se muestra un transformador fallado bajo esta condición, y en la Figura 11, la apariencia del aceite dieléctrico.

3.7. Saturación magnética

Cuando un transformador falla debido saturación magnética se presentan los siguientes efectos:

- Aceite ennegrecido.
- Papel aislante quebradizo.
- Núcleo quemado.

3.8. Defecto de fabricación

Cuando un transformador falla por defectos de fabricación se presentan los siguientes efectos:

- Cortocircuito en el devanado de alta tensión por efecto en el aislamiento.
- Aceite deteriorado o algo turbio, a veces se deteriora sin quemarse.
- Signos de recalentamiento.
- Señales de descarga eléctrica.
- Fusión de conductores.



Figura 12: Transformador fallado por Defecto de Fabricación

En la Figura 12 se muestra un transformador fallado bajo esta condición y en la figura 13 la apariencia del aceite dieléctrico.

4. TECNICAS DE 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 en el sector industrial



Figura 13: Apariencia del aceite dieléctrico de este transformador fallado

y en recientes investigaciones académicas para el área de equipos de distribución de energía eléctrica [7]. Las técnicas como la digitalización de imágenes, la radiografía por neutrones, el electromagnetismo o la emisión acústica, que eran relativamente desconocidas hasta hace pocos años, se han convertido en herramientas de uso cotidiano en las industrias que desean mantenerse en la vanguardia del mercado ofreciendo calidad en sus productos, por lo tanto, en la presente investigación se utilizan estas novedosas técnicas, ya que las mismas permiten evaluar defectos que presenten los materiales de fabricación verificando además la vida útil o remanente comparando los estándares que establece el fabricante.

4.1. Ensayo por partículas magnéticas



Figura 14: Imanación por electrodos de la chapa de acero al momento de aplicar corriente magnetizante

Evaluar los defectos en las chapas de acero al silicio que sean invisibles, continuos y críticos.

Se magnetiza el material en estudio utilizando electrodos o puntas de contacto de tal forma, que las posibles grietas produzcan un escape de flujo magnético; al aplicar partículas con propiedades magnéticas, se produce acumulación en esas zonas, delatando la presencia de defectos. Es ideal que las líneas de flujo magnético crucen perpendicularmente las fisuras en forma perpendicular. En la figura 14, se muestra la imantación por electrodos de la chapa de acero al silicio al momento de aplicar corriente magnetizante.

4.2. Ensayo por líquidos penetrantes

Otro método para evaluar control de defectos se realiza limpiando la chapa de acero, aplicando líquido penetrante, luego, limpiando de nuevo la superficie, y por último colocando revelador que extrae el líquido de las grietas permitiendo inspeccionar posibles defectos.

La efectividad del ensayo se basa en las características humectantes del líquido penetrante con respecto al material en estudio, es decir, en la capacidad de formar una película continua y de penetrar en pequeñas cavidades. La “mojabilidad” es el índice de la capacidad del líquido para penetrar vasos capilares; el líquido penetra en las grietas por capilaridad, y después es extraído hacia el revelador también por capilaridad. El fenómeno de capilaridad es gobernado por la *Tensión superficial (Tgs)*: una molécula dentro del líquido se interrelaciona con las que la rodean por las fuerzas gravitacionales, eléctricas y químicas esto se conoce como *Cohesión (Tlg)* y cuando la molécula está completamente sumergida presenta sus fuerzas en total equilibrio y se muestra la *Adhesión (Tgl)* que origina en las superficies planas comportamientos como los indicados en la Ecuación (1).

$$Tgs = Tlg + Tgl \cos\theta. \quad (1)$$

El ángulo pequeño indica que el líquido “moja” el sólido [8], y es lo ideal para un buen comportamiento del penetrante. Se puede establecer en el material a evaluar, que la fuerza hacia arriba está dada por la Ecuación (2)

$$F\alpha = T \cos 2\theta \pi r \quad (2)$$

y la fuerza hacia abajo está dada por la Ecuación (3)

$$F\beta = \pi r \rho g h. \quad (3)$$

Es decir, que la altura es directamente proporcional a la tensión superficial y al coseno del ángulo de contacto, e inversamente proporcional, a la densidad del líquido y al radio del tubo capilar.

Lo anterior es fundamental en el material en estudio, dado que el acero magnético blando (chapa de acero al silicio) de 0,35 mm de espesor, debe ser revisado muy detalladamente, a fin de observar discontinuidades importantes que evidencien deterioro en el mismo y que indiquen fallas en su funcionamiento.

5. PRUEBAS DE TENSION MECANICA

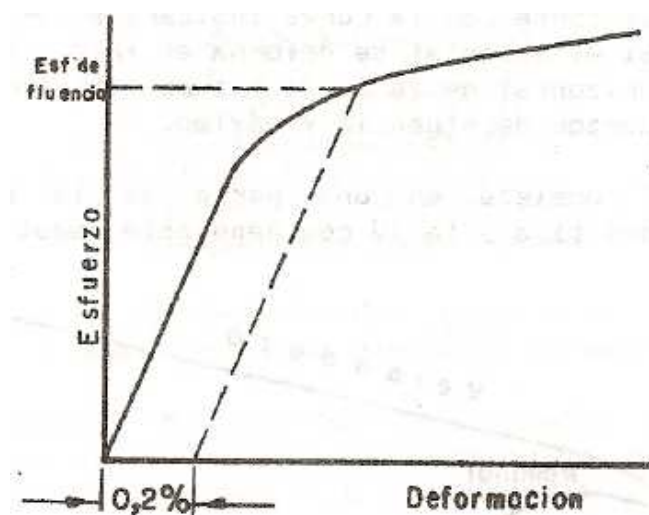


Figura 15: Determinación del punto de fluencia por el método del 0,2 %

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], de las propiedades del papel aislante para transformadores, analizando cada uno de los fenómenos que se producen al ir incrementando la fuerza aplicada al cuerpo para alargarlo hasta producir su ruptura, lo cual permite determinar el punto de fluencia por el método del 0,2 % [10]. En la Figura 15, se muestra la curva característica utilizada para este ensayo.

6. METODOLOGIA

Las probetas de papel aislante utilizadas en la presente investigación fueron preparadas y marcadas en forma numérica para su identificación utilizando la leyenda indicada a continuación:

Muestra Patrón *identificada* 1-1.

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

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

Muestra de papel aislante de transformador fallado por cortocircuito externo en alta tensión (AT) *identificada* 1-4.

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

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

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

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

En la Figura 16 se muestra una de las probetas preparadas e imágenes del equipo utilizado al realizar el ensayo de tensión.

7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA EL ANALISIS DE LA CHAPA DE ACERO AL SILICIO APLICANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

7.1. 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*

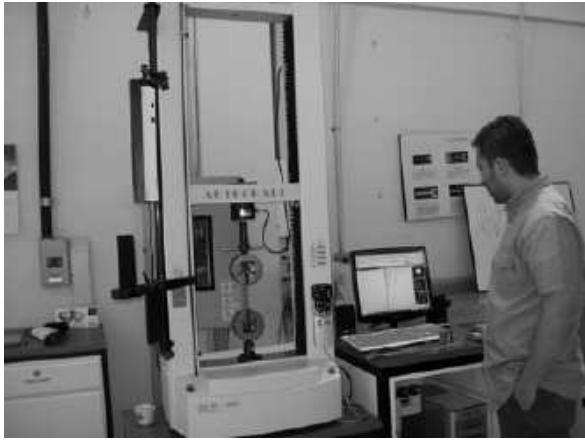


Figura 16: Ensayo de tensión del papel aislante



Figura 17: Chapas de acero de equipos fallados preparadas para realizar END utilizando líquidos penetrantes



Figura 18: Chapas de acero de equipos fallados luego de aplicar líquido revelador

Test Method for Liquid Penetrant Examination o método (ASTM E165-95) [11], para la aplicación del ensayo utilizando líquidos penetrantes, se limpió la chapa de acero, aplicando líquido penetrante, luego, fue limpiada de nuevo la superficie, y por último se colocó líquido revelador que extrajo

el líquido de las grietas y permitió inspeccionar posibles defectos. En las Figuras 17 y 18, se muestran imágenes de este procedimiento experimental.

7.2. Ensayos con partículas magnéticas

Luego de llevar a cabo el ensayo aplicando líquidos penetrantes a 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) [12], magnetizando el material utilizando electrodos o puntas de contacto de tal forma que las posibles grietas produzcan un escape de flujo magnético; y al aplicar partículas con propiedades magnéticas, se produce acumulación en esas zonas, delatando la presencia de defectos evaluando discontinuidades superficiales y subsuperficiales en la superficie del material.

Los END indicados anteriormente, fueron realizados en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1. Pruebas de tensión del papel aislante de los transformadores fallados

En la Tabla 2 se indican cálculos obtenidos de la máxima carga a soportar, al igual que el desplazamiento, esfuerzo y la deformación, y en la Tabla 3 características técnicas que establece el fabricante para este tipo de material.

Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Deformación Plástica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

8.2. Ensayos con líquidos penetrantes a las chapas de acero al silicio

Se realizó el procedimiento establecido para tal fin, no apreciándose en las muestras analizadas *ninguna discontinuidad superficial* [13]. En la Figura 19 se muestra una chapa de acero al silicio según lo indicado anteriormente.

Tabla 2: Características de las probetas de papel aislante de los transformadores fallados

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

Nombre	Max. Carga	Max. Despl.	Max. Esfuerzo	Max. Deform.
Unidades	N	mm	KPa	%
1-1	227.375	2.19100	78211.0	2.19
1-2	915.469	3.27000	86376.4	3.27
1-3	929.719	3.64200	46825.4	3.64
1-4	667.219	2.10300	67889.6	2.10
1-5	251.219	1.49900	83461.1	2.99
1-6	325.875	1.53000	45111.9	1.53
1-7	563.468	2.32800	70762.3	2.33
1-8	69.8438	4.78650	16301.5	4.79

Fuente: M. Mago (2011)

Tabla 3: Características técnicas del papel aislante

Resistencia a la tracción longitudinal (N/mm ²)	70–100
Resistencia a la tracción transversal (N/mm ²)	50–60
Alargamiento a la rotura longitudinal (%)	3–5
Alargamiento a la rotura transversal (%)	7–10
Gramaje (mm)	0.1–126

Fuente: M. Mago (2011)

8.3. Ensayos con partículas magnéticas a las chapas de acero al silicio

Aplicando el procedimiento establecido para evaluar discontinuidades superficiales y sub-superficiales con partículas magnéticas, no encontrándose en los materiales evaluados *ninguna alteración o cambios en los mismos* [13].

Con estos ensayos no se observan cambios

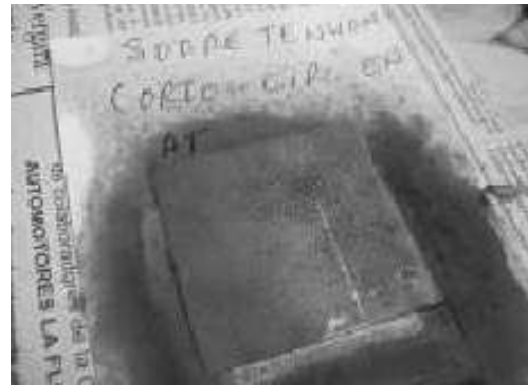


Figura 19: Chapa de acero de equipo fallado no muestra ninguna discontinuidad superficial

o alteraciones en la chapa de acero al silicio que indique deterioro en la calidad del material producto de alguna causa de falla.

8.4. Ensayos de tensión mecánica del papel aislante

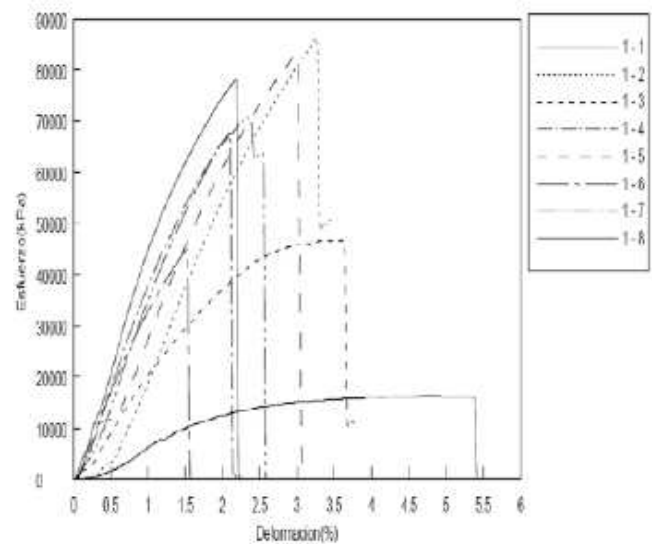


Figura 20: Resultados obtenidos de los ensayos de tensión de todas las muestras de papel aislante

De los resultados obtenidos se observa, que las muestras de papel aislante de los transformadores fallados a causa de sobretensión y humedad, 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 a causa de defecto de operación, sobrecarga, cortocircuito externo en alta tensión e incluso la muestra de papel aislante del transformador de control, 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 20, se muestra lo indicado.

9. CONCLUSIONES

Esta investigación contribuye con la aplicación de métodos no convencionales para el diagnóstico de fallas en los transformadores de distribución, abriendo paso a una nueva área de especialización donde, ingenieros de distintas especialidades, se apoyarán en sus análisis técnicos, a fin de comprender los fenómenos eléctricos, magnéticos y mecánicos que definen el comportamiento de estos equipos, complementado dichos análisis, lo cual permitirá mayor experticia y desarrollo de equipos para mantenimiento preventivo, que disminuyan la probabilidad de ocurrencia de fallas y garanticen mejoras en los sistemas de distribución de energía eléctrica. 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. Se recomienda aplicar a las muestras de equipos fallados microscopía electrónica de barrido y difracción por rayos X, ya que estas técnicas complementarían los END utilizados en la presente investigación, y se pudieran evaluar otros defectos en estos materiales de fabricación.

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, sus resultados contribuyen a la aplicación de modelos de pronóstico que mejo-

rarían los programas de mantenimiento preventivo en las empresas del sector eléctrico, disminuyendo la probabilidad de ocurrencia de fallas.

Con la aplicación de estas técnicas, se pretende desarrollar simulaciones para determinar la vida remanente en los transformadores de distribución, sin embargo, los avances obtenidos hasta ahora, permiten solamente, realizar comparaciones entre los métodos de calificación utilizados por excelencia, por ejemplo, análisis físico-químico del aceite dieléctrico de los equipos fallados, versus, estos métodos no convencionales. Pero, el desarrollo de equipos para mantenimiento preventivo basados en estos métodos no convencionales, en poco tiempo será una realidad.

AGRADECIMIENTO

A las empresas Transformadores del Centro, y FYR Ingenieros, en Venezuela y Colombia, respectivamente. Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (Venezuela) y a la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Referencias

- [1] Smith, W (1998). "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales". Editorial McGrawHill. 3ra edición, España.
- [2] Mago, M., (2011). "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.
- [3] Bossi, A. (1998). "Operación y Mantenimiento de Transformadores de Potencia. Requerimientos de Usuarios y Fabricantes". Editorial Mc Graw Hill. España.
- [4] NORMAS PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN. CADAPE. (1979). Caracas.
- [5] Mota, J ; Contreras, E. (1985). "Problemática de los Transformadores Sumergidos en Aceite". Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.
- [6] Corrales, Juan. (1954). "Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores". Editorial Labor. 3era Edición Rev. (Escuela de técnico electricista) Barcelona, España.
- [7] NORMAS PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN. CADAPE. (1979). Caracas, Venezuela.

- [8] Mago, M., (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 Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. 18, Volumen 3, Diciembre 2011.
- [9] Forero, A (1995). "Laboratorio de Metales". Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- [10] Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus o método (ASTM D-828).
- [11] Forero, A (2003). "Metalografía Práctica". Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- [12] Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination o método (ASTM E165-95).
- [13] Standard Guide for Magnetic Particle Examination o método (ASTM E709-01).
- [14] Shackelford, J (1992). "Ciencia de Materiales para Ingenieros". Editorial Prentice Hall, 3era edición. México.