

ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICABLES A TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE UNA EMPRESA ELECTRICA.

Francisco Saldivia

UNEXPO Barquisimeto, Venezuela, fsaldivi@gmail.com

Eduar Acevedo

Centrales Electricas del Norte de Santander, Colombia, eduar.acevedo@cens.com.co

Rómulo Pérez

UNEXPO Barquisimeto, Venezuela, rperez@unexpo.edu.ve

RESUMEN

El trabajo está dirigido al desarrollo de estrategias de mantenimiento predictivo en transformadores de potencia a partir del estudio de sus componentes principales, estadísticas de fallas y el modo de falla de sus componentes críticos. Para definir las estrategias los autores desarrollan el análisis modal de las fallas y efectos tomando en cuenta las recomendaciones de las normas internacionales, los fabricantes y las contribuciones de investigaciones actualizadas. Del análisis modal surgen las tareas propuestas de mantenimiento que dan lugar a dos estrategias básicas que pretenden implementar las mediciones de las variables eléctricas, el análisis físico-químico y el análisis de gases disueltos (DGA) como herramientas fundamentales para establecer el mantenimiento basado en la condición en los transformadores de potencia de empresas de energía eléctrica. La importancia de este trabajo que colocan los autores a su disposición, radica en plantear estas estrategias de mantenimiento con la finalidad de mejorar o incrementar la gestión de mantenimiento en la empresa eléctrica donde se implemente esta propuesta.

PALABRAS CLAVES.; transformador de potencia, mantenimiento, estrategia.

ABSTRACT

The work is directed at developing strategies for condition based maintenance in power transformers from the study of its main components, failure statistics and failure mode of critical components. To define the strategies the authors develop the modal analysis of failures and effects taking into account the recommendations of international standards, manufacturers and research contributions to date. Modal analysis arise proposed maintenance tasks that lead to two basic strategies that seek to implement measurements of the electrical variables, the physics-chemical analysis and the dissolved gases analysis (DGA) in the oil as essential tools to establish based maintenance condition of power transformers in power companies. The importance of this work the authors put at your disposal, lies in raising these maintenance strategies in order to improve or increase maintenance management in the electricity company which implements this proposal.

Keywords: Diagnosis, power transformer, fault matrix, critical analysis.

1. INTRODUCCIÓN.

Los transformadores de potencia conforman la columna vertebral de los sistemas de transmisión y distribución de la energía eléctrica de un país, de ahí su importancia estratégica ya que una salida inesperada de ellos puede conducir a grandes pérdidas por indisponibilidad y afectar a grandes regiones de un país cualquiera. Su salida implica pérdidas incalculables a la economía y al medio ambiente, de ahí la importancia de mantener su disponibilidad, confiabilidad y seguridad. La confiabilidad de un sistema de energía depende del adecuado funcionamiento de cada uno de los elementos que lo componen, entre los que se encuentra el transformador de potencia. Es por esta razón que en las empresas de energía eléctrica surge la necesidad de implementar estrategias de mantenimiento predictivo en los transformadores de potencia, para poder garantizar que los parámetros de operación de dichos equipos se mantengan en valores aceptables que aseguren la prestación del servicio y a su vez, que éstos alcancen su vida útil.

El presente trabajo está dirigido a plantear estrategias de mantenimiento predictivo en los transformadores de potencia de una empresa eléctrica a partir del análisis modal de fallas y sus efectos, con la finalidad de tomar acciones permanentes que garanticen su correcto funcionamiento y además coadyuden a las empresas en las necesidades de abastecer la demanda, alcanzar la calidad de servicio requerida por la regulación y lograr la seguridad de las instalaciones respecto a terceros y al personal propio.

DIAGNOSTICO Y MANTENIMIENTO EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

El diagnóstico y mantenimiento preventivo de Transformadores de Potencia es una tarea sistemática que deben realizar las diferentes empresas y especialmente las de generación, transmisión y distribución energía eléctrica, con la finalidad de mantener en condiciones de operación óptimas los equipos y de identificar posibles condiciones de operación críticas, que puedan dar lugar a la aparición de fallas incipientes. Esto permite una detección oportuna de las mismas para su corrección mediante un mantenimiento preventivo previo a una posible falla en el equipo, logrando así ahorros importantes en los costos operativos (Fernandez, 1999).

De acuerdo a la Norma IEEE std. 62-1995: "IEEE, Guía de campo de diagnóstico Prueba de energía eléctrica – aparatos Parte 1: Transformadores en aceite, reguladores y reactores", Las pruebas que permiten diagnosticar el estado operativo de los transformadores de potencia se pueden clasificar en pruebas eléctricas, pruebas de aceites dieléctricos y pruebas de funcionamiento de sus protecciones eléctricas y mecánicas. Estas pruebas de diagnóstico están descritas con referencia a las categorías de sistemas y componentes que constituyen el transformador tales como: Devanados o bobinas, Aislador pasatapas o bushing, aceite aislante, conmutador de carga o cambiador de tomas, el núcleo, tanque o cuba, y los dispositivos asociados.

En cada uno de estos sistemas y subsistemas la norma (IEEE, 2005) recomienda una serie de pruebas y mediciones que deben ser realizadas para registrar y evaluar su comportamiento.

Sin embargo, la implementación de estas pruebas varían de acuerdo con la práctica regular de las empresas y puede depender de la historia operativa de los transformadores, así como de la disponibilidad de los equipos necesarios y recursos humanos para su implementación, ya que esto requiere de una gran inversión económica sobre todo en el área de equipamiento y entrenamiento del personal calificado. De igual manera no siempre es suficiente con lo que indican las normas y fabricantes de los transformadores, sino que además se deben tomar en cuenta las estadísticas de fallas presentados por algunas instituciones de reconocido prestigio, para completar la información requerida y lograr un buen diseño de la estrategia de mantenimiento predictivo aplicable a transformadores de potencia (Pérez et al, 2012).

2. ESTADÍSTICAS DE FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

En la figura 1, se pueden apreciar los resultados de las estadísticas de fallas en transformadores reportadas por (Ramírez, 2001); (Liñán et al, 2001) que contiene las estadísticas de la CFE de México hasta 1999 y (Neumann et al, 2006) que muestra las estadísticas de la CIGRE, donde especifican los principales componentes susceptibles de fallas y su porcentaje en función del número de transformadores fallados.

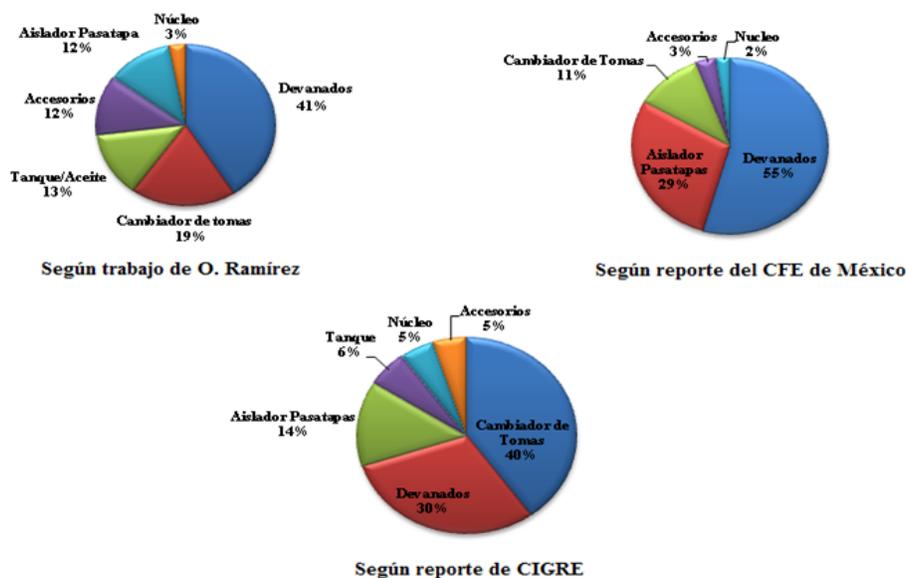


Figura 1. Porcentaje de falla por elemento de transformadores de potencia, según diferentes fuentes.

Como se observa en la Figura 1, los elementos mayormente fallados según los autores son: el cambiador de tomas, los devanados, tanque/aceite y los bushings que en su conjunto representan un promedio del 88 %, por lo que se debe hacer énfasis en estos elementos y realizar la identificación de los componentes críticos y evaluar en cada uno de ellos los modos de falla (fernandez, 1999).

3. IDENTIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS Y COMPONENTES CRÍTICOS

Basado en la información mostrada en la estadística de fallas anteriormente presentada y la documentación de trabajos realizados sobre las fallas más comunes en transformadores de potencia (Pérez, 2009), (Ferrel et al, 2009), se pueden identificar los sistemas y componentes más críticos que en el caso de fallar, representarían un riesgo inminente de daño del transformador e incluso un riesgo altamente potencial para el medio ambiente y las personas que se encuentran dentro del ámbito donde están instalados dichos equipos (Pérez, 2009). A continuación en la Tabla 1, se muestran los sistemas y componentes críticos.

Tabla 1. Sistemas y componentes críticos en un transformador

SISTEMA	COMPONENTE	SISTEMA	COMPONENTE
Parte activa	Devanados Núcleo	Tanque/aceite	Caja principal o cuba Aceite dieléctrico Tuberías y válvulas Tanque de expansión Radiadores Control de Nivel de aceite de la cuba principal
Bushing o Aislador pasatapas	Bushing del primario Bushing del secundario Bushing del terciario	Cambiador de tomas o Conmutador bajo carga	Aceite dieléctrico Cuba Selector Pre-selector Mando motor Control de flujo del conmutador

4. SELECCIÓN DE LAS VARIABLES PARA FUNDAMENTAR EL MBC.

Según diferentes autores (Fernandez, 2006), (Castillo y Cardenas, 2008), (Pérez 2009), recomendaciones de la norma (IEEE, 2005), (IEC 60599,1999) y fabricantes de los transformadores, la medición periodica y sistematica de las variables electricas y la evaluación de las propiedades físico-químicas y analisis de gases disueltos en el aceite aislante del transformador, son párametros suficientes aunque no absolutos para establecer un monitoreo de la condición, ya que se reflejan en ellos, el comportamiento de una gran cantidad de variables del transformador y abarca la mayoría de los componentes criticos establecidos en la estadística de fallas anteriormente presentadas. Esto representa una fortaleza en la gestión del mantenimiento ya que sirve de base referencial para la implementación de esta metodología en la empresa.

Entre las pruebas electricas recomendadas por las normas (IEEE, 2005), se encuentran: Resistencia del aislamiento, Prueba de aterramiento (Ground test), Temperatura (Infrarrojo), Resistencia del devanado, Capacitancia, Factor de potencia/Factor de disipación, relación de transformación, ruidos, descargas parciales, entre otras. En las mismas normas (IEEE, 2005), (IEC 60599, 1999) se obtiene que las pruebas para determinar los niveles de las propiedades físico-químicas que indican el comportamiento del aceite dieléctrico son: Contenido de agua, Gases disueltos, Esfuerzo dieléctrico, Conteo de partículas, Pérdidas dieléctricas, Factor de potencia/Factor de disipación, Tensión interfacial, Acidez, Visual, Color y Estabilidad a la oxidación.

Las pruebas electricas y las propiedades físico-químicas del aceite indicadas anteriormente son variables que se controlan con técnicas de mantenimiento predictivo ya que el patrón de falla es desgaste progresivo (fallas periódicas). No aplica para patrones de falla de desgaste aleatorio (Castillo y Cardenas, 2008).

5. DEFINICIÓN DE LOS MODOS DE FALLAS DE LOS COMPONENTES CRÍTICOS

A continuación se hace una descripción de los modos de fallas de los sistemas y componentes criticos del transformador y para efectos de este trabajo solo se presenta para el sistema parte activa; sin embargo para obtener la totalidad del estudio de las definiciones de los modos de falla consultar (Acevedo y Saldivia, 2012).

SISTEMA PARTE ACTIVA

La mayoría de las fallas en la parte activa ocurren en la bobina cuando por condiciones de corto-circuitos ejercen fuerzas axiales a través de una presión para desplazar de forma telescópica las bobinas del primario y del secundario, las que se repelen una de la otra debido a que las líneas eléctricas centrales no están alineadas. También existen fuerzas radiales en la bobina que tratan de desplazar las bobinas del primario y del secundario ocasionando que se fracture el aislamiento y falle el transformador. Esta ocurrencia de fallas es creciente y estan asociadas a la antigüedad del aislamiento (Ferrelli et al, 2009) ya que en estas condiciones de cortocircuitos se originan esfuerzos electrodinámicos que debido a su antigüedad ya no son soportados por los enrollados. (Chambilla, 2011), plantea que “en la operación de los transformadores de potencia éstos están sujetos a esfuerzos térmicos, eléctricos y mecánicos, los cuales provocan cierta degradación en el sistema de aislamiento. Las causas principales del fenómeno de degradación del sistema aislante son la temperatura excesiva, oxígeno, y humedad combinadas con los esfuerzos eléctricos, los cuales actúan como acelerador del proceso de degradación”. Las causas secundarias que aceleran el envejecimiento del sistema aislante son los esfuerzos mecánicos, los ácidos y lodos. Un exceso de cualesquiera de estos esfuerzos puede acelerar el proceso de degradación. El proceso de degradación del sistema aislante puede evolucionar gradualmente hasta que se presenta una, la cual puede ser muy dañina. Estas fallas algunas veces ocurren sin ninguna alarma o señal de que un problema se está presentando. Pero en otras ocasiones existen pequeños indicios que indican la presencia de agentes dañinos o de deterioro y son detectables en los analisis periodicos al aceite aislante, en las mediciones de las pruebas electricas y en las mediciones de las descargas parciales (Pettersson, 1990). La detección oportuna de estos indicios puede ser la diferencia entre someter el transformador a una reparación, sustituir una pieza dañada o tener un equipo fallado con todos los graves problemas que esto ocasiona.

A continuación en las tablas 2,3,4,5, y 6 se muestran el análisis modal de fallas (Castillo, 2010) y sus efectos en cada uno de los sistemas principales desarrollados por los autores.

Tabla 2. Análisis Modal Sistema Bobina

ANÁLISIS MODAL DE FALLAS Y SUS EFECTOS					
Sistema	Función	Modo de falla	Causas (Posibles motivos)	Efecto (Qué ocurre)	Modo de control (Tarea propuesta)
Parte activa - Bobina	Constituye el circuito eléctrico que transfiere la energía de un circuito a otro y su función principal es la de crear el flujo magnético.	Sobretensión Sobrecarga Cortocircuitos entre espiras Descargas parciales. Corrosión	Sobretensiones producidas por operación del sistema o descargas atmosféricas. Sobrecargas no admitidas Circulación de altas corrientes producto de fallas externas al transformador.	Pérdidas de energía. Aumento de las corrientes de fuga (superficiales y volumétricas) que desencadenan y aceleran los procesos de envejecimiento Formación de gases disueltos. Descomposición del aislamiento sólido Chisporroteo a lo largo de grandes superficies. Pueden iniciarse descargas o una falla Deterioro del papel en la zona superficial en contacto con el aceite. Cortocircuitos entre espiras	Evitar los sobre calentamientos en las bobinas Monitorear las temperaturas. Realizar análisis físico químico y cromatografía de gases al aceite dieléctrico. Realizar mediciones de la resistencia del devanado. Realizar mediciones de la relación de transformación

Tabla 3. Análisis Modal Sistema Núcleo

ANÁLISIS MODAL DE FALLAS Y SUS EFECTOS					
Sistema	Función	Modo de falla	Causas (Posibles motivos)	Efecto (Qué ocurre)	Modo de control (Tarea propuesta)
Parte activa - Núcleo	Constituye el circuito magnético que transfiere la energía de un circuito a otro y su función principal es la de conducir el flujo magnético.	Aislamiento deficiente de los tornillos de afianzamiento del núcleo. Canal de enfriamiento de aceite obstruido. Contacto a tierra deficiente. Aumento de las pérdidas en vacío. Aumento del Ruido o sus decibeles.	Carga excesiva. Calentamiento excesivo del núcleo. Corriente de cortocircuito parcial. Pérdida del aislamiento entre láminas. Aflojamiento de los yugos.	Deterioro del aceite y de los materiales de aislamiento. Rompimiento de los terminales de los devanados. Si se presenta una falla aguas abajo del transformador y esto provoca movimientos internos del mismo, estos movimientos son los que pueden en determinado caso que el núcleo se desplace o se rompa un perno de sujeción, provocando que el núcleo sea afectado	Realizar pruebas periódicas de ruido teniendo en cuenta la hora y la carga en el momento de la prueba.

Tabla 4. Análisis Modal Sistema Cuba-Aceite

ANÁLISIS MODAL DE FALLAS Y SUS EFECTOS					
Sistema	Función	Modo de falla	Causas (Posibles motivos)	Efecto (Qué ocurre)	Modo de control (Tarea propuesta)
Sistema Cuba - Aceite	Refrigerante, aislante eléctrico y protector de las partes internas del transformador, teniendo a la vez buena estabilidad a la oxidación y una aceptable tendencia a la gasificación.	Oxidación. Mal estado del radiador.	Naturaleza o composición del aceite. Cantidad de oxígeno disponible para la reacción de oxidación. Presencia de agua y otros catalizadores de oxidación. Incremento excesivo de la temperatura. Agotamiento del inhibidor de oxidación. Acumulación de sedimentos en las obleas o en el tubo, el flujo del aceite se dificulta y la temperatura desciende.	Formación de lodo el cual limita las capacidades de refrigeración, aislamiento y protección. Presencia de fugas de aceite en las cabeceras del radiador y de las partes soldadas del panel o del tubo.	En las pruebas del aceite se evidencia el deterioro del mismo y si algunos valores están por debajo de los valores permitidos se deben realizar mantenimiento al aceite (en caliente o en frío) Esto con el objeto de mejorar las condiciones del transformador mejorando el aceite en sus características de refrigerante y dieléctrico.

Tabla 5. Análisis Modal Sistema Conmutador

ANALISIS MODAL DE FALLAS Y SUS EFECTOS					
Sistema	Función	Modo de falla	Causas (Posibles motivos)	Efecto (Qué ocurre)	Modo de control (Tarea propuesta)
Conmutador	Permitir la regulación de voltaje en el devanado secundario de un transformador a través de un cambiador de tomas que actúa en los puntos de conexión a lo largo de un devanado que permite seleccionar el número de espiras.	Existencia de alta fuente de contaminación y esfuerzos eléctricos, descargas y extinción de arco eléctrico producto de la disipación de energía al interior del ruptor	Generación de gran cantidad de carbón, agua y gases. Reducción de la capacidad de transferencia de corriente del contacto e incremento de la temperatura.	Aparición de sobrecalentamientos localizados con temperaturas mayores a 200°C. Degradación del aceite generando subproductos que se acumulan sobre la superficie de los componentes y contactos ubicados en el interior.	Realizar pruebas al aceite con el número de maniobras realizadas se debe programar el mantenimiento del conmutador para realizar según sea el caso cambio de contactos, cambio de resistencia de transición, cambio total del aceite, lavado y limpieza general.

Tabla 6. Análisis Modal Sistema Bushing

ANALISIS MODAL DE FALLAS Y SUS EFECTOS					
Sistema	Función	Modo de falla	Causas (Posibles motivos)	Efecto (Qué ocurre)	Modo de control (Tarea propuesta)
Bushing	Permite el paso de la corriente a través de las bobinas del transformador y evita que haya un cortocircuito entre las fases de los devanados y entre los devanados y la cuba.	Son elementos capacitivos y es donde hay mayor esfuerzo dieléctrico concentrado en muy poco volumen, por lo que su condición debe evaluarse y asegurarse de una forma más intensiva que la de otros elementos.	Ingreso de contaminación externa, principalmente humedad, a causa del deterioro del empaque. Sobretensiones	Aparición de puntos calientes que aceleran el envejecimiento de los empaques y sellos. Depósito de impurezas en el canal de separación entre el cuerpo capacitivo y la porcelana como subproducto del deterioro del aceite mismo. Generación de gases, especialmente nitrógeno, en el interior del bushing	Realizar termografías periódicas o cada vez que se quiera aumentar la carga del transformador. Realizar pruebas de aislamiento y factor de potencia a los bushing en los periodos de mantenimiento programados.

Como resultado del análisis modal y sus efectos, se obtienen en el modo de control (tareas propuestas), la necesidad de implementar un programa de inspección y medición de las variables eléctricas ya que permitiera en un corto plazo llevar los registros históricos de cada una de las pruebas realizadas y brinda la posibilidad de evaluar la variación de ellas en el tiempo y determinar las condiciones operativas.

De igual manera otro resultado interesante que arroja el análisis modal es el monitoreo de las propiedades físico-químicas y análisis de los gases disueltos de los aceites dieléctricos, las cuales reflejarán la degradación y el deterioro del aislamiento del transformador de tal manera de prever las actividades de mantenimiento e inferir en cuanto a su periodicidad y muestreo en el tiempo.

6. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO.

Una vez determinados el análisis modal, se pueden establecer las estrategias básicas de mantenimiento basado en la condición. Estas parten del modo de control (tareas propuestas) y que al hacer un compendio de ellas en los sistemas estudiados, se propone la implementación de dos(2) estrategias principales, las cuales se desarrollan a continuación:

ESTRATEGIA NO. 1: Desarrollar un programa de inspección de variables eléctricas en los transformadores de potencia. A continuación en la tabla 7 se presenta la estrategia.

Tabla 7 . Estrategia N° 1

Definición de la acción: Desarrollar el programa de inspección de variables eléctricas en los transformadores de potencia.			
Objetivos	Actividades específicas	Recursos	
<ul style="list-style-type: none"> - Comprometer a la alta gerencia con la aplicación de un plan de mantenimiento basado en pruebas eléctricas a los transformadores - Capacitar al personal técnico sobre el objeto y procedimientos a realizar en cada prueba eléctrica - Establecer los límites de control de las variables en estudio 	<ul style="list-style-type: none"> - Talleres en el área supervisoria y de ejecución referentes a actividades de pruebas eléctricas a los transformadores de potencia - Intercambios de experiencias gerenciales con empresas del ramo 	<p>Humano:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gerentes. - Personal supervisorio. - Personal técnico. <p>Económico:</p> <p>Inversión en el plan de mantenimiento</p> <p>Costo de personal asesor para la capacitación del personal</p> <p>Materiales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Documentos internos de la organización - Bibliografía sobre las características del comportamiento de los transformadores y pruebas eléctricas a ejecutar 	
Responsables		Cronograma	
<ul style="list-style-type: none"> - Líder: Gerente de Operaciones o de Mantenimiento - Corresponsables: Personal gerencial y administrativo de la empresa 		Se desarrollará como mínimo las charlas semanalmente.	
Indicador	Definición	Fórmula matemática	Observaciones
Desarrollo de las pruebas eléctricas	Mide la efectividad en el desarrollo de las pruebas a ejecutar	$\frac{\text{Pruebas desarrolladas (\#)}}{\text{Pruebas programadas (\#)}}$	- Se medirá Anualmente. Para ser positivo, el indicador tiene que oscilar entre 0,75 y 1

Para llevar a cabo las actividades específicas de la estrategia No. 1, se plantea el dictado de talleres teórico-prácticos al personal que opera y al personal que ejecuta las labores de mantenimiento, referentes a transformadores de potencia y profundizar en la descripción y en las funciones de cada uno de los elementos que los conforman con la finalidad de mejorar los conocimientos de operatividad de los transformadores.

De igual manera se plantea el dictado de talleres referentes a las pruebas eléctricas que están establecidas en el programa y concientizar acerca del impacto que reflejan los resultados, análisis de tendencias y su influencia en la vida útil de los componentes. Los talleres los podrían realizar los Ingenieros de planta que posean la capacidad, destreza y el conocimiento suficiente para ello.

Las variables eléctricas que se proponen someterlas a estudio serán: Resistencia de aislamiento, resistencia de los devanados, aterramiento, ruidos, descargas parciales, corriente de excitación, factor de potencia, capacitancia, temperatura (medición y espectro infrarrojo), continuidad de contacto del cambiador de tomas, relación de transformación, inspección visual, inspección y verificación del sistema de enfriamiento, calibración y ajuste del relé de falla y calibración de medidores.

Para la ejecución de las pruebas eléctricas dada a que son muy específicas y se requiere de un alto equipamiento técnico, se propone la contratación de una empresa de servicios bajo la supervisión de personal calificado de la empresa, la cual entregará los resultados a la Gerencia de Mantenimiento, quien se encargara del procesamiento, respaldo de la información en bases de datos y generación de informes basados en gráficos de tendencia, que orienten a la alta gerencia y sirvan de base para la toma de decisiones sobre las acciones de mantenimiento.

Es importante establecer límites de control y parámetros de referencia de acuerdo a la variable a estudiar, tomando en cuenta la recomendación de los fabricantes de los transformadores y las normas.

ESTRATEGIA NO. 2: Desarrollar el estudio de las propiedades del aceite dieléctrico como parte del plan de mantenimiento de los transformadores de potencia. A continuación en la tabla 8 se muestra la estrategia N° 2.

Tabla 8. Estrategia N° 2

Definición de la acción: Desarrollar el estudio de las propiedades del aceite dieléctrico como parte del plan de mantenimiento de los transformadores de potencia			
Objetivos		Actividades específicas	
<ul style="list-style-type: none"> - Comprometer a la alta gerencia con la aplicación del plan de mantenimiento predictivo basado en la condición del aceite dieléctrico. - Establecer los límites de control de las variables en estudio. - Detectar fallas antes de que sucedan, y dar tiempo a corregirla sin perjuicios al servicio, ni detención de la producción. 		<ul style="list-style-type: none"> - Talleres en el área supervisoria y de ejecución referentes a actividades de muestreo y evolución histórica de los resultados de las propiedades del aceite dieléctrico - Intercambios de experiencias con empresas del ramo 	
		Recursos	
		Humano: <ul style="list-style-type: none"> - Personal supervisorio. - Personal técnico. Económico: Inversión en el plan de mantenimiento predictivo Costo de personal asesor para la capacitación del personal	
		Materiales: <ul style="list-style-type: none"> - Documentos internos de la organización - Bibliografía sobre el mantenimiento basado en análisis de aceite 	
Responsables		Cronograma	
<ul style="list-style-type: none"> - Líder: Gerente de Operaciones o de Mantenimiento - Corresponsables: Personal gerencial y administrativo de la empresa 		Se desarrollará como mínimo las charlas semanalmente.	
Indicador	Definición	Fórmula matemática	Observaciones
Desarrollo de los muestreos de aceite dieléctrico	Mide la efectividad en el desarrollo de los muestreos a efectuar	$\frac{\text{Muestras efectuadas (\#)}}{\text{Muestras programadas (\#)}}$	<ul style="list-style-type: none"> - Se medirá Anualmente - Para ser positivo, el indicador tiene que oscilar entre 0,75 y 1

Para llevar a cabo las actividades específicas de la estrategia No. 2, se plantea dictar talleres teórico-prácticos referentes a las pruebas físico-químicas y gases disueltos en el aceite que están establecidas en el programa y concientizar acerca del impacto que reflejan los resultados, análisis de tendencias y su influencia en la vida útil de los componentes. Se deben establecer límites de control de acuerdo a los recomendados por los fabricantes de los transformadores, por los fabricantes del aceite dieléctrico y las normas (IEC 60599, 1999). Los talleres los dictará el mismo personal de planta nivel Ingeniero, que posea la capacidad y el conocimiento suficiente para ello.

Las variables eléctricas que serán sometidas a estudio serán: contenido de agua, gases disueltos, esfuerzo dieléctrico, acidez y color Para la ejecución de las pruebas eléctricas será contratada una empresa de servicios, la cual entregará los resultados a la Gerencia de Mantenimiento para encargarse del procesamiento de la información para que a través de gráficos de tendencia sirva de base para la toma de decisiones. La frecuencia será anual y la definirá la persona encargada de la planificación del mantenimiento de acuerdo a las actividades previstas.

Hay algunos elementos importantes a considerar como parte de la ejecución del plan propuesto, entre las que están:

- En todos los transformadores cambiar la silica de los conservadores de gases o tanques de expansión ya que el no hacerlo significa que el aceite en los transformadores que tengan respiración abierta se espongan al contacto del aceite con el oxígeno o la humedad del medio ambiente.
- Si se presenta una fuga de aceite se debe intervenir inmediatamente ya que al contaminar el ambiente, se considera como residuo peligroso ya que si un litro de aceite va a una fuente hídrica contaminaría unos 10.000 litros de agua. De igual manera, al equipo presentar fuga de aceite, se permite el ingreso de oxígeno a la parte interna del transformador con lo que se aceleraría el proceso de oxidación del aceite el cual desencadena la disminución de su vida útil y la del transformador.
- La propiedad del papel aislante más significativa afectada por el envejecimiento es la resistencia mecánica a través de una reducción de la capacidad para soportar esfuerzos mecánicos (corto-circuitos y desplazamientos físicos importantes). Los resultados de la degradación de la celulosa son ácidos, gases, azúcares, fenoles, partículas solidadas no disueltas más compuestos de furanos. La estrategia para este caso es incluir dentro de las pruebas anuales la prueba de furanos a través del aceite.

7. MEJORAMIENTO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

Adicional a las estrategias de mantenimiento predictivo desarrolladas en este trabajo, muchas empresas de energía eléctrica a nivel mundial en aras de detectar condiciones de fallas y hacer un seguimiento de la condición del transformador para evitar la aparición de estas fallas, emplean el diagnóstico de la condición en tiempo real que puede ser efectuado utilizando los datos adquiridos por un sistema de monitoreo de las variables claves u optimas (Fernandez, 2006), que permita realizar un seguimiento cronológico, análisis de sus desviaciones, tendencias y comparaciones con patrones referenciales permanentemente (Pérez, 2009) con lo que pueden introducir técnicas avanzadas de mantenimiento basado en la condición (MBC) y mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC).

Uno de los componentes básicos de este tipo de sistema diagnóstico son los modelos térmicos, los cuales han tenido un amplio desarrollo de forma tal de mejorar la exactitud de sus resultados y de adaptarlos a las mediciones en tiempo real, lo que garantiza el permanente monitoreo y condición termica del enrollado (que es el componente que aparece con el mayor porcentaje de fallas ver figura 1), ya que existe una relación directa entre los incrementos de temperatura y la aparición de fallas en el aislamiento.

Si además de la condición termica del enrollado, al sistema de diagnóstico se le adiciona el monitoreo en tiempo real del análisis de gases disueltos en el aceite dielectrico, el factor de cubrimiento de las fallas aumenta considerablemente ya que como se determino a lo largo del analisis modal, el aceite aislante es donde se pueden detectar cambios significativos de sus propiedades, lo que esta relacionado a condiciones de falla de en una gran parte de los componentes y sistemas del transformador y es el metodo más usado como tecnica de diagnóstico en transformadores (perez et al, 2012), asi de esta forma se pudiese complementar la metodologia propuesta en este trabajo.

8. CONCLUSIONES

A través de la aplicación del Análisis Modal de Fallas y Efectos a los elementos del transformador de potencia se establece un procedimiento para establecer la variabilidad de las propiedades físico-químicas del aceite dieléctrico como una función del efecto de la falla para cada subsistema que lo conforma.

Entre los beneficios esperados con la de la implementación de las estrategias de mantenimiento basado en la condición, está la de llevar un registro confiable del estado operativo de los transformadores de potencia lo que permitirá hacer un estudio más riguroso para determinar la inclusión de nuevas técnicas de diagnóstico y determinar los tiempos de muestreo optimos de dichas variables.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Acevedo, E. Saldivia, F. (2012). “Estrategias de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceites dieléctricos en transformadores de potencia de Centrales Eléctricas de Norte de Santander S.A. E.S.P. Area Cúcuta”. Trabajo de grado presentado para optar al título de Magister en Mantenimiento Industrial, UNET Táchira, Venezuela.
- Castillo, M. (2010). Análisis modal y sus efectos en los generadores de vapor de centrales azucareros. EDICIONES UNEXPO Barquisimeto.
- Castro, A. y Cardenas, L. (2008). Mantenimiento preventivo basado en la confiabilidad de los elementos que componen la red de distribución. CLADE, Mar de Plata, Argentina.
- Chambilla, P. (2011). Técnicas de alta tensión, medición de las descargas parciales. Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica. disponible en: <http://es.scribd.com/doc/62939759/Descargas-Parciales>. Consultado el 10 de febrero de 2013.
- IEEE (2005). Guía de campo de diagnóstico Prueba de energía eléctrica – aparatos Parte 1: Transformadores en aceite, reguladores y reactores. Std. 62. Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos, Inc.
- IEC 60599 (1999) Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. Paris, Francia.
- Fernández, S. (1999) “Diagnostico táctica y estrategia”. *Revista Ingeniería Energética del ISPJAE*. XX, (4), pp. 7-18.

- Fernández, S. (2006) Folleto Texto: "Diagnóstico Integral". Curso de la Especialidad de Diagnóstico Integral de Centrales y Subestaciones Eléctricas. Tercera Edición 2006.CIPEL-CUJAE, Cuba.
- Ferrelí, R., Contreras, C., Casagrande, M., Laura, V. y Milani, F. (2009) Estadística De Fallas En Transformadores De Potencia. Implementación De Bobinas Limitadoras De Corriente De Cortocircuito. *XIII ERIAC, DÉCIMO TERCER ENCUENTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ*, Argentina.
- Ramírez, O. (2001). "Modelación fisicomatemática para el diagnóstico de grandes transformadores en tiempo real". Disertación de tesis doctoral. CIPEL-CUJAE, Cuba.
- Liñán, R. et al. (2001). "Experiencias en el desarrollo de sistemas de monitoreo y diagnóstico para transformadores de potencia". Instituto de Investigaciones Eléctricas. Bienal CIGRÉ-MÉXICO, paper 12-02.
- Neumann, C. et al. "The impact of insulation monitoring and diagnostics on reliability and exploitation of service life". *Memorias Congreso de la CIGRE 2006*, Paris, Francia, paper C4-201.
- Pérez, R. (2009). "Modelación térmica para el diagnóstico del aislamiento principal en transformadores de potencia". Disertación de tesis doctoral. CIPEL-CUJAE, Cuba.
- Pérez, R., Torres, H. y Fernandez S. (2012), *Sistema de Monitoreo en Tiempo Real para el Diagnóstico de Transformadores de Potencia en una Empresa de Energía Eléctrica*. Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference LACCEI'2012, Panama.
- Petterson, L. (1990). Estimation of the remaining service life of power transformers and their insulation. *Electra*, no.133, pp.65-71.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.