



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MONITOREO EN  
LÍNEA, COMO MÉTODO PREDICTIVO PARA LA DETECCIÓN DE  
FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

**Javier Orlando Noriega Herrera**

Asesorado por el Msc. Ing. Javier Quan Hidalgo

Guatemala, julio de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MONITOREO EN  
LÍNEA, COMO MÉTODO PREDICTIVO PARA LA DETECCIÓN DE  
FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JAVIER ORLANDO NORIEGA HERRERA**  
ASESORADO POR EL MSC. ING. JAVIER QUAN HIDALGO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

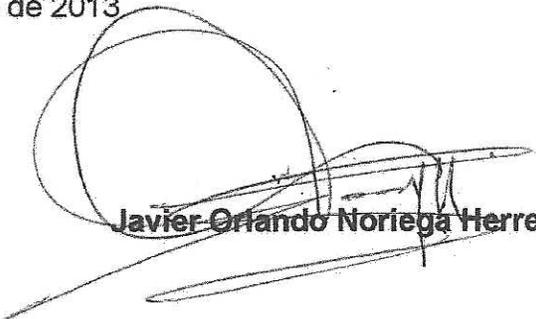
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Ramos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MONITOREO EN LÍNEA, COMO MÉTODO PREDICTIVO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 25 de noviembre de 2013



Javier Orlando Noriega Herrera



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226**



**AGS-MIMPP-0004-2013**

Guatemala, 23 de abril de 2014.

Director  
Guillermo Puente  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Javier Orlando Noriega Herrera** carné número **2002-12274**, quien optó la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Ingeniería en Mantenimiento**

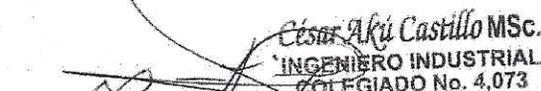
Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

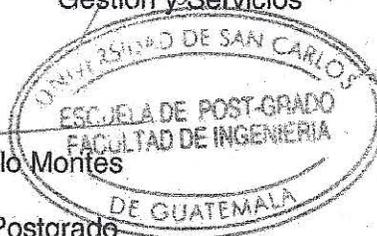
"Id y enseñad a todos"

  
MSc. Ing. Javier Quan Hidalgo  
Asesor(a)

**Ing. Javier Quan**  
**Colegiado No. 10939**

  
César Akú Castillo MSc.  
INGENIERO INDUSTRIAL  
COLEGIADO No. 4,073  
MSc. Ing. César Augusto Akú Castillo  
Coordinador de Área  
Gestión y Servicios

  
Dra. Mayra Virginia Castillo Montes  
Directora  
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo  
/la



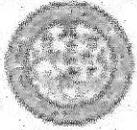
El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MONITOREO EN LÍNEA, COMO MÉTODO PREDICTIVO. PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA,** presentado por el estudiante universitario Javier Orlando Noriega Herrera, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



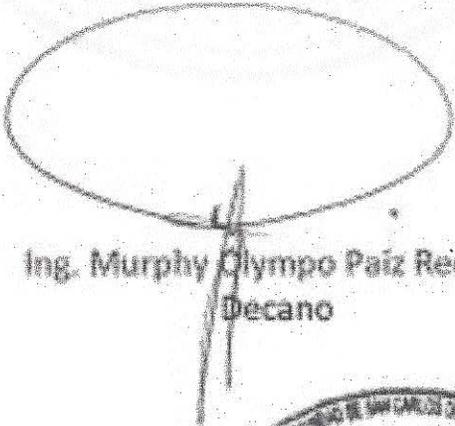
Guatemala, 18 JULIO 2014.



DTG. 345.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MONITOREO EN LÍNEA, COMO MÉTODO PREDICTIVO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA**, presentado por el estudiante universitario **Javier Orlando Noriega Herrera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

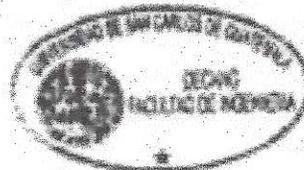
IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 21 de julio de 2014

/gdach





**Mis primos**

Abraham, Hugo, Víctor, Luis, Katherine, Adela, Josué, Victoria, Lucía Harold, Noé y Daniel Noriega, Oscar y Andrea Marroquín, por el cariño y los momentos compartidos.

**Mis amigos**

Por los momentos de alegría, tristeza, dificultades y logros compartidos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por su fidelidad, infinito amor y las bendiciones en mi vida.
<b>Mis padres</b>	Francisco Noriega (q.e.p.d.) y Aura Herrera, por guiarme con principios morales y espirituales, por el esfuerzo, la dedicación y comprensión al apoyarme incondicionalmente para alcanzar este logro.
<b>Mi familia</b>	Por el cariño, confianza, consejos y apoyo incondicional.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi casa de estudios en donde tuve la oportunidad de formarme académicamente.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme las herramientas y conocimientos para ser un excelente profesional, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
<b>Mi asesor</b>	Msc. Ing. Javier Quan Hidalgo, por brindarme su tiempo, conocimientos y buenos consejos al realizar este proyecto.

**Mis amigos**

Por la convivencia, por estar en los buenos y malos momentos, ser excelentes compañeros y brindarme un cariño sincero.

**Cada una de las personas que hicieron posible este trabajo**

Porque de alguna manera colaboraron, me apoyaron o estuvieron involucradas en las etapas de mi vida para obtener este logro.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	III
LISTA DE SÍMBOLOS .....	V
GLOSARIO .....	VII
RESUMEN .....	XI
INTRODUCCIÓN .....	XV
1. ANTECEDENTES .....	01
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	05
2.1. Descripción del problema .....	05
2.2. Formulación del problema .....	05
3. JUSTIFICACIÓN .....	07
4. OBJETIVOS .....	11
5. ALCANCES .....	13
6. HIPÓTESIS .....	15
7. MARCO TEÓRICO .....	17
7.1. Fallas que presentan los transformadores.....	17
7.2. Implementación de medidas correctivas.....	19
7.3. Orientaciones en desarrollo para su aplicación .....	21
7.4. Plan preventivo y predictivo.....	26

8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	29
9.	METODOLOGÍA .....	33
9.1.	Variables .....	33
9.2.	Indicadores.....	33
9.3.	Estudio .....	33
10.	TÉCNICAS Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	37
11.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	39
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	41
13.	BIBLIOGRAFÍA .....	43

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Cronograma de actividades.....39

### TABLAS

- I. Recursos humanos y financieros .....42



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
%	Porcentaje
Q	Quetzal



## GLOSARIO

<b>Aceite aislante</b>	Aceite dieléctrico o aceite para transformador, se utiliza generalmente en equipos eléctricos y que exhibe propiedades dieléctricas características y esenciales para oponerse al paso de la corriente eléctrica. Cumple la función de aislante eléctrico y de refrigerante.
<b>Arco eléctrico</b>	También arco voltaico a la descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de la atmósfera gaseosa enrarecida, normalmente a baja presión o al aire libre.
<b>Carga eléctrica</b>	Es una propiedad física intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante fuerzas de atracción y repulsión entre ellas. Es una medida de la capacidad que posee una partícula para intercambiar fotones.
<b>Confiability</b>	Es la capacidad de un ítem de desempeñar una función requerida, en condiciones establecidas.
<b>Degradación</b>	Disminución gradual de cualidades o características de un equipo o pieza.

<b>Descarga parcial</b>	El término descarga parcial (PD) hace referencia a una ruptura dieléctrica localizada en una pequeña región de un sistema sólido o líquido de aislamiento eléctrico sometido a condiciones de estrés de alta tensión que no puentea el espacio entre dos conductores.
<b>Diagnóstico</b>	Examen de una cosa, un hecho o una situación para buscar solución a sus males.
<b>Dieléctrico</b>	Se denomina dieléctrico al material mal conductor de electricidad sometido a un campo eléctrico externo, puede establecerse en él un campo eléctrico interno, a diferencia de los materiales aislantes con los que suelen confundirse, por lo que puede ser utilizado como aislante eléctrico.
<b>Elemento de protección</b>	Utilizado para evitar la destrucción de equipos o instalaciones por causa de una falla que podría iniciarse de manera simple y después extenderse sin control en forma encadenada.
<b>Falla</b>	Defecto, falla. Pérdida de las características de funcionamiento de un ítem.
<b>Mantenimiento</b>	Todas las acciones que tienen como objetivo mantener un artículo o restaurarlo a un estado en el cual pueda llevar a cabo alguna función requerida.

**Mantenimiento predictivo**

Está basado en la determinación del estado de la máquina en operación. El concepto se basa en que las máquinas darán un tipo de aviso antes de que fallen, este mantenimiento trata de percibir los síntomas para después tomar acciones.

**Mantenimiento preventivo**

Es el destinado a la conservación de equipos o instalaciones mediante la realización de revisión y reparación que garanticen su buen funcionamiento y fiabilidad. El objetivo es evitar o mitigar las consecuencias de los fallos del equipo logrando prevenir las incidencias antes de que estas ocurran.

**Mantenimiento proactivo**

Es una filosofía de mantenimiento dirigida a la detección y corrección de las causas que generan el desgaste y que conducen a la falla de la maquinaria.

**Monitoreo en línea**

Monitoreo automatizado de la maquinaria para proporcionarle información actualizada que le ayuda a optimizar el funcionamiento de sus principales activos de producción.

***Tap***

Son derivaciones que poseen los transformadores trifásicos, los cuales hacen que se tenga la posibilidad de poder cambiar la tensión a la salida del transformador.

**Transformador de potencia**

Es el que maneja grandes magnitudes de voltio amperios VA, los cuales se expresan en kVA (kilo voltio amperios) o en MVA (mega voltio amperios). Generalmente estos transformadores están instalados en subestaciones para la distribución de la energía eléctrica.

## RESUMEN

Los transformadores de potencia son elementos críticos para la provisión de energía eléctrica y su adecuado mantenimiento es clave para la prolongación de su vida útil. Las nuevas tecnologías de monitoreo continuo en tiempo real, aportan valiosa información acerca del comportamiento de los transformadores de potencia y el desarrollo de fallas en los mismos. Mediante la detección de variaciones en el contenido de gases disueltos y humedad en el aceite, se puede alertar acerca del deterioro de la aislación y el desarrollo de fallas incipientes para permitir llevar a cabo tareas de mantenimiento predictivo.

Se han desarrollado importantes avances tecnológicos en los sistemas de toma de datos y programas para procesar señales, además de la aplicación de sistemas de monitoreo de condición y diagnóstico para transformadores de potencia. Hace algunos unos años no era posible conocer el estado operacional de un *tap* intercambiador sin desmontarlo del equipo, actualmente se pueden conocer varios de los parámetros mecánicos censando algunas variables.

Es por eso que la presente investigación analiza y propone sistemas disponibles con tecnología que permite determinar las condiciones actuales en que opera el transformador sin sacarlo de operación.

Todo sistema de monitoreo en línea para transformadores de potencia consiste principalmente de sensores, sistemas de adquisición de datos, herramientas para el manejo de información y métodos para la evaluación de la condición operativa de los transformadores de potencia, por lo que los

parámetros más importantes a monitorear son: la carga, las condiciones de operación y la generación de gases disueltos en el aceite aislante.

El monitoreo de la carga y de las condiciones de operación se realiza con la medición de las tensiones y corrientes a la frecuencia de operación y las temperaturas. Para la medición de las tensiones se pueden usar los dispositivos de potencial y para la medición de la corriente de carga se utilizan los transformadores de corriente instalados en las boquillas o mediante dispositivos ubicados en otros puntos de la subestación.

El estado que guardan los pasos de enfriamiento es medido mediante dispositivos que indican el estado en que estos se encuentran (encendidos o apagados), permitiendo correlacionar la actividad de los pasos de enfriamiento con la carga en función del tiempo. La medición de corrientes de bombas, permite detectar problemas mecánicos y eléctricos en estos accesorios. Cualquier incremento de la corriente demandada por ellos es una indicación de la existencia de problemas.

Para evaluar la condición del sistema aislante debido a esfuerzos térmicos, es importante monitorear la temperatura en diferentes puntos del transformador. Temperaturas elevadas en el transformador son provocadas por sobrecargas o por calentamiento local (puntos calientes). Aún bajo condiciones de carga normal o baja, el transformador puede presentar sobrecalentamiento, debido a deficiencias en el sistema de enfriamiento.

El parámetro más importante que debe monitorear cualquier sistema de monitoreo en línea para transformadores de potencia, es la medición de los gases disueltos en el aceite aislante. Esto se basa en el hecho de que las fuentes de degradación incipiente, tales como, descargas parciales,

sobrecalentamiento y arcos generan gases, que se disuelven en el aceite. La generación excesiva provoca la formación de burbujas que pueden ocasionar fallas, si estas se introducen en zonas del sistema aislante sometidas a grandes campos eléctricos.

Los gases más importantes para la identificación de fallas en transformadores de potencia son: hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, acetileno, etano y etileno. La concentración de estos depende del tipo de degradación en el transformador.

Frecuentemente se presentan fallas dieléctricas en el aislamiento de los devanados o en el aislamiento principal, debido a concentraciones de esfuerzos eléctricos en puntos que han sido afectados por degradación. Uno de los métodos para detectar este tipo de fallas es la medición en línea de descargas parciales. Para la medición de descargas parciales se emplea la técnica ultrasónica, que se basa en que las descargas parciales producen ondas de presión que se propagan, a través del medio aislante, desde el sitio de la descarga hasta la pared del tanque del transformador, donde son detectadas por sensores ultrasónicos.

En forma general, se puede decir que los transformadores de potencia son parte vital de los sistemas de transmisión de energía y que debido a restricciones económicas para realizar mantenimientos periódicos en función a las recomendaciones de los fabricantes, existe una fuerte tendencia a realizar mantenimiento basado en la condición real, mediante la detección oportuna de degradaciones incipientes.

Para cumplir con este requerimiento, los sistemas de monitoreo en línea para transformadores de potencia proporcionan las herramientas requeridas

para incrementar la confiabilidad de los transformadores por medio del monitoreo continuo de los parámetros más importantes. Los beneficios de los sistemas de monitoreo en línea son los siguientes:

- Proporcionan información sobre la condición operativa de los transformadores.
- Crean un historial de datos.
- Permiten en algunos casos, sobrecargar los transformadores sin reducir su vida útil.
- Cambian de mantenimientos periódicos a mantenimientos basados en la condición real del equipo.
- Auxilia en la toma de decisiones.
- Reducen el riesgo de fallas catastróficas y los costos asociados con ellas.

## INTRODUCCIÓN

En la subestación durante su operación, los transformadores de potencia están sujetos a esfuerzos que degradan su sistema de aislamiento. Las causas principales de degradación son: temperatura excesiva, presencia de oxígeno y humedad que combinadas con los esfuerzos eléctricos aceleran el proceso. Otras causas son los esfuerzos mecánicos y los productos de descomposición del aceite.

El proceso de degradación evoluciona gradualmente hasta presentarse la falla, que en ocasiones puede ser catastrófica. La detección oportuna de una degradación puede ser la diferencia entre someter el transformador a una reparación mayor o sustituir una pieza dañada. La detección de cierto tipo de fallas puede ser efectuada mediante el monitoreo en línea de parámetros clave, que sirven para diagnosticar la condición del transformador.

La confiabilidad de equipos utilizados en los sistemas eléctricos de potencia, tales como los transformadores, es altamente importante ya que desde el punto de vista de las compañías de generación y suministro de energía eléctrica, una falla en servicio de un transformador de potencia representa un costo que puede exceder el costo de un equipo nuevo.

Con el objetivo de reducir la probabilidad de fallas en estos equipos, la ingeniería de mantenimiento se está encaminando fuertemente a los sistemas de mantenimiento predictivo, siendo la herramienta principal la utilización de sistemas de monitoreo en línea.

La necesidad de tener información que aborda los factores que componen el mantenimiento de un transformador que proporcione estrategias para brindar detalle de los diferentes elementos de un transformador y que permitan su monitoreo, el análisis y toma de decisiones en relación al mantenimiento para su optimización, es hoy en día de vital importancia para las subestaciones en Guatemala.

La presente investigación analiza y propone sistemas disponibles con tecnología que permite determinar las condiciones actuales en que opera el transformador sin sacarlo de operación. El sistema de monitoreo en línea que tiene como ventaja la inspección en operación está integrado por sensores que reciben la señal, un sistema de adquisición de datos, y una computadora donde se analizan los resultados.

Como resultado las soluciones que aporta este sistema de monitoreo, podemos citar las siguientes, considerándolas las más importantes para este proyecto:

- El rápido diagnóstico del estado actual del equipo, de tal forma que ofrece fácilmente la toma de decisiones para mantener al transformador en operación.
- El pronóstico de condiciones de falla en sus estados iniciales de evolución, de modo que aumenta la disponibilidad del sistema y hace posible que el equipo esté fuera de servicio solo cuando sean necesarias acciones correctivas.
- El monitoreo de las condiciones de operación del equipo a lo largo de su vida, con el fin de mantenerla útil y controlado el proceso de

envejecimiento, el cual es acelerado cuando se utiliza el equipo en los límites de operación.

- Acceso rápido a la información del estado del equipo.
- Posibilidad de integración con los demás sistemas de monitoreo y de gerenciamiento de mantenimiento de la empresa.

En el capítulo 1 se definirá la terminología sobre la función del mantenimiento, su objetivo y confiabilidad, ya que conociendo el nivel de función adecuado que se desea obtener en los transformadores de alta potencia, se podrá determinar los parámetros de optimización requeridos y, en consecuencia, tratarán de implementarse las estrategias necesarias para alcanzarlos.

En el capítulo 2 se describirán las distintas técnicas de monitoreo de condición, su campo de aplicación y su sensibilidad, así como, los aspectos más importantes a tener en cuenta a la hora de diseñar las estrategias proactivas de mantenimiento; con lo anterior se pretende describir el uso de métodos en línea que permiten la implementación de planes preventivos y predictivos cuya aplicación incidirá en evitar que el transformador se deteriore y con ello se detenga su funcionamiento a la hora de realizar el estudio y análisis de la situación en que se encuentra el equipo al momento de detectar alguna falla de operación.

En el capítulo 3 se enfatizará sobre la influencia de las buenas prácticas de mantenimiento, en cuanto a confiabilidad operacional se refiere, lo cual no debe olvidarse a la hora de implementar técnicas de monitoreo de condición, por lo que se plantearán los elementos que deben formar parte de un plan de

mantenimiento continuando con la descripción de las diferentes pruebas de campo que aportan valiosa información para determinar el comportamiento y estado del transformador.

En el capítulo 4 se describirá un plan de mantenimiento confiable, el cual presenta una descripción de las acciones que deberán tomarse a través de los métodos seleccionados para el análisis de la información que arroja el monitoreo, así como las diferentes técnicas utilizadas para la regeneración de los transformadores, ya sea para anticipar o prevenir; detectar y corregir las fallas según resulte más conveniente.

En el último capítulo se desarrollará el análisis de resultados exponiendo un caso práctico en el cual se implementaron los métodos descritos para el análisis de una falla, el cual recopila el estudio expuesto en cada capítulo del proyecto.

Se presentará el documento completo con la integración y descripción de todos y cada uno de los elementos mencionados en los anteriores capítulos como aporte del trabajo de investigación. En el mismo se incluyen las consideraciones que el estudio presentará como aporte, el cual incluye una serie de orientaciones que podrían ser aplicadas por el personal a cargo del mantenimiento de los equipos de generación de energía eléctrica.

Aquí se brindará una serie de recomendaciones, pues se considera que solamente a través del fortalecimiento de la labor continua, la cual forma un vínculo entre técnicos y las competencias laborales, se podrán identificar los elementos indispensables para el fortalecimiento del desarrollo de las empresas.

## 1. ANTECEDENTES

Debido a que en Guatemala la generación, transformación y distribución de energía son actividades de gran importancia y teniendo en cuenta que el transformador es un equipo vital para el desarrollo de esas actividades y, que actualmente no se aplica tecnología de monitoreo en línea en la mayoría de los transformadores de potencia en subestaciones del país, es necesario verificar el transformador por medio de monitoreo estratégico. Esto significa, extender la supervisión común por un concepto más avanzado de monitoreo y detección de diferentes variables del transformador, su tendencia en el tiempo y el diagnóstico oportuno.

Según (Rivera Flores, Jaime H., 2009, p. 26), de la ciudad de Medellín, Colombia, docente de la Universidad de Antioquia y analista en la empresa Interconexión Eléctrica S. A. ISA., “Los transformadores de potencia son los elementos más costosos en una subestación. El sistema de monitoreo en línea de diferentes variables, brinda utilidad de supervisión del transformador permitiendo incrementar su vida útil, mejorar las actividades de mantenimiento y evitar daños catastróficos.”

Los transformadores de potencia están sujetos a esfuerzos que degradan su sistema de aislamiento durante su operación y funcionamiento. Las causas principales son: temperatura alta, presencia de oxígeno y humedad que combinadas con los esfuerzos eléctricos aceleran el proceso de deterioro. También los esfuerzos mecánicos y los productos de descomposición del aceite son causas que aceleran la degeneración.

La degradación evoluciona gradualmente hasta presentarse la falla, que en ocasiones puede ser catastrófica. La detección oportuna de una degradación puede ser la diferencia entre someter el transformador a una reparación mayor o sustituir una pieza dañada.

Es necesario preocuparse por el mantenimiento y la evolución de ciertos parámetros fundamentales de los transformadores, debido a sus condiciones y los altos costos de operación que puede resultar de una falla o anomalía.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) (1998) desarrolló e instaló cinco sistemas de monitoreo en línea para transformadores de potencia (SMLTP), en 3 subestaciones de transmisión de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Estos sistemas permiten conocer en tiempo real las condiciones de operación y el estado del sistema aislante de los transformadores de potencia, con el objetivo principal de detectar degradaciones incipientes que permitan tomar decisiones oportunas para reducir la probabilidad de fallas catastróficas en estos equipos.

Se han desarrollado importantes avances tecnológicos en los sistemas de toma de datos y programas para procesar señales, además de la aplicación de sistemas de monitoreo de condición y diagnóstico para transformadores de potencia. Hace algunos años no era posible conocer el estado operacional de un *tap* intercambiador sin desmontarlo del equipo, actualmente se pueden conocer varios de los parámetros mecánicos censando algunas variables.

Según la Empresa de Investigación Newton Evans Inc. (2007), el promedio de edad de un transformador es de 35 años, que significa que muchos, con una vida esperada entre 40 y 50 años, están llegando al término

de su utilidad, según la Caldera de Vapor Hartford (2008), el más grande suscriptor de seguros de transformadores, quienes afirman que el porcentaje de falla por año es alrededor de 1 % (1 000 transformadores), aumentó a 2 % y que podría mantener la tendencia.

Sin embargo, la durabilidad y rentabilidad de un equipo dependerá en gran parte de su mantenimiento y de un diagnóstico certero a la hora de evaluar su rendimiento; considerando la importancia de realizar una investigación, donde se proporcionan orientaciones necesarias para prolongar la utilidad del equipo.

Menciona (C. Bengtsson, 1996, p. 132), “En el mundo, las estadísticas de fallas en transformadores de potencia indican que el 41 % de estas, están relacionadas con el conmutador; el 19 % con los devanados; el 3 % con el núcleo; el 12 % con los *bushing*; el 13 % con el tanque y los fluidos y el 12 % con los accesorios.”

Los sistemas de monitoreo posibilitan evaluar en línea las condiciones del equipo, dando como resultado la posibilidad vigilar diferentes parámetros de interés, detectar el desarrollo de fallas y diagnosticar condiciones anormales.

Actualmente, es posible monitorear en línea lo siguiente: *bushings*, conservador de aceite, temperaturas de aceite y devanados, cambiador de *taps* bajo carga (CTBC), gases disueltos y humedad del aceite, nivel de aceite.

La información de sistemas de monitoreo en línea conlleva a mejorar las condiciones del equipo a través de detección y análisis de las fallas, siendo de vital importancia para aumentar la confiabilidad y productividad de los equipos.



## **2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

### **2.1. Descripción del problema**

Por lo general, el transformador de potencia presenta mayor índice de deterioro en un sistema eléctrico derivado de la inexistencia de un diagnóstico oportuno que determine exactamente cuáles son las deficiencias encontradas, siendo los más funcionales los que pueden realizarse en línea por medio de técnicas de vibración ultrasónica y de gases disueltos.

La detección de fallas en los transformadores de potencia por medio de un diagnóstico adecuado, es importante para aumentar la productividad en la Subestación Guatesur. Para determinar las causas que originan los daños en los transformadores, así como sus consecuencias, es necesario implementar técnicas de monitoreo en línea, que incidirá en la prevención de riesgos en los dispositivos eléctricos, por medio del mantenimiento oportuno que involucre la aplicación de métodos preventivos, correctivos e innovadores.

### **2.2. Formulación del problema**

Preguntas de la investigación

- ¿Cómo mejorar desde la gestión de mantenimiento, la prevención de riesgos y la disminución de fallas en transformadores de potencia?
- ¿Qué características tienen las fallas más frecuentes en transformadores de potencia en la Subestación Guatesur?

- ¿Cuáles son las técnicas de monitoreo en línea existentes en la actualidad y cómo pueden aplicarse en la predicción de fallas en transformadores de la Subestación Guatesur?
- ¿En qué medida contribuye la implementación de técnicas de monitoreo en línea a transformadores de potencia, en la detección de fallas, para aplicar métodos predictivos y preventivos de mantenimiento, que redundará en su funcionamiento confiable y de disponibilidad?

### **3. JUSTIFICACIÓN**

El siguiente trabajo de graduación surge de la necesidad de promover los avances tecnológicos en la detección de fallas y monitoreo en línea para transformadores de potencia, aplicando la tecnología para analizar y predecir estados y condiciones anormales en equipo de potencia, para lograr un aumento en confiabilidad.

La detección de fallas en transformadores de potencia es una labor que deben realizar los encargados de mantenimiento, sin embargo, no es posible debido a la falta de aplicación de pruebas de monitoreo en línea. Generalmente la falta de información sobre la forma de generar un diagnóstico puede arrojar indicadores falsos, que solamente producirán consecuencias severas como resultado de la falta de medidas asertivas a la hora de elegir un método confiable que valide los resultados obtenidos, debido a que lejos de conducir a procedimientos correctivos, contribuirá a la poca claridad sobre los parámetros idóneos en que el equipo deberá funcionar.

Un diagnóstico erróneo solamente podrá causar daños irreversibles en el transformador, que en determinado momento colocará en riesgo la seguridad al no cumplirse el objetivo de propiciar su buen funcionamiento sin evitar su deterioro y poca durabilidad.

Se considera sumamente importante que el personal de mantenimiento y reparación del equipo transformador de energía eléctrica conozca no solamente las normas y avances tecnológicos internacionales, para el correcto funcionamiento de los transformadores de alta potencia, sino que a la vez

pueda determinar con certeza las fallas que se originan en el equipo y sus consecuencias, para dar un mantenimiento preventivo y predictivo al mismo, a través de métodos confiables que inducirán a la generación, desarrollo y control de un plan proactivo que asegure la confiabilidad de los dispositivos eléctricos.

Derivado de la importancia que tiene a nivel mundial la prevención de fallas en los transformadores de potencia durante el proceso de investigación, se identifican los diferentes problemas que los mismos pueden presentar los cuales pueden ser diagnosticados mediante un monitoreo continuo y seguro que permitirá su adecuado funcionamiento, a través del mantenimiento del equipo para su óptima utilización.

Si las fallas no son detectadas a tiempo pueden producirse accidentes que van desde explosiones hasta incendios en transformadores, esto puede ser provocado por la falta de un adecuado mantenimiento y monitoreo, así como por el desconocimiento de los parámetros necesarios para la optimización de equipos. Las técnicas modernas permiten conocer el estado del transformador sin exponerlo a la subutilización o inutilización, mientras se realiza el monitoreo.

El aporte del trabajo de investigación lo representa la aplicación de los conocimientos obtenidos en la maestría en mantenimiento, relacionados con: áreas o estudios en análisis de fallas, automatización del mantenimiento, administración de mantenimiento, técnicas de monitoreo no destructivos y reacondicionamiento de piezas.

Asimismo, identificando los indicadores de riesgo para el deterioro de los transformadores de potencia, así como su análisis, a través de un documento que describa los métodos idóneos para realizar el monitoreo continuo en línea, que permitirá obtener un diagnóstico predictivo, y proactivo, que contribuirán

en la detección de fallas y las posibles soluciones para su óptimo funcionamiento a través de un mantenimiento preventivo, logrando un alto rendimiento del equipo en operación.



## **4. OBJETIVOS**

### **General**

Describir los sistemas de monitoreo de condición en línea y realizar una propuesta que contenga las orientaciones necesarias para la detección de fallas aplicada como método predictivo de mantenimiento, para aumentar las condiciones de confiabilidad y productividad total en los transformadores de potencia de la Subestación Eléctrica Guatesur.

### **Específicos**

1. Describir las fallas más frecuentes en los transformadores de potencia en la Subestación Eléctrica Guatesur.
2. Describir técnicas de monitoreo en línea como un plan de detección de fallas en transformadores de potencia en la Subestación Eléctrica Guatesur.
3. Detallar un plan de mantenimiento basado en el monitoreo de condición en línea para transformadores de potencia.



## 5. ALCANCES

El trabajo de investigación busca describir y explicar en términos claros y específicos las características de los transformadores de potencia, su funcionamiento y mantenimiento predictivo, a través de la detección de fallas por medio del monitoreo en línea. Las observaciones sobre este método se realizarán en la Subestación Eléctrica Guatesur.

Las técnicas utilizadas para la observación son las listas de cotejo aprobadas por las normas vigentes de energía eléctrica que serán utilizadas por personal adiestrado dentro de la empresa y se describirán los resultados obtenidos en el análisis respectivo del trabajo de investigación.

La investigación llenará un vacío de información con relación a los transformadores de alta potencia de la Subestación Eléctrica Guatesur, derivado de fallas técnicas producidas por la falta del mantenimiento adecuado provocado al no haberse implementado un plan proactivo que incluya orientaciones y acciones concretas.

Dicho plan debe estar basado en métodos y técnicas de monitoreo en línea para predicción y prevención de desperfectos en los dispositivos eléctricos, tiene que fundamentarse en directrices proporcionadas por el manual de uso de los protectores de transformadores que es suministrado por el distribuidor, el cual describe normas establecidas como: ANSI/IEEE C57.12.00-1987, IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution Power, and Regulating Transformer, las que determinan los requerimientos que

ha de contener los transformadores de distribución, potencia y regulación sumergidos en líquidos (aceite dieléctrico).

Asimismo, existen otras normas en las que se presentan solamente aspectos del diseño de los transformadores como:

- La Norma IEC 76, que únicamente menciona las medidas eléctricas básicas sin hacer referencia al diseño mecánico y de protección.
- La Norma CEI 76 referida a los transformadores, que trata sobre las medidas de aislamiento eléctrico y no incluye ninguna restricción referente a las protecciones mecánicas de los tanques de transformadores.

A través de un documento que incluya las causas y consecuencias que provocan las fallas en los transformadores de potencia, se podrán plantear las medidas necesarias que deberán tomarse en cuenta al momento de desarrollar un plan de mantenimiento para la prevención y predicción de desperfectos.

Debe fundamentarse en la información detallada y actualizada sobre sistemas de monitoreo en línea, que permitirá a la subestación sujeta a estudio, así como a otras subestaciones de energía eléctrica del país, que tomen en cuenta la propuesta para detectar de manera confiable los posibles riesgos y consecuencias, que pueden originar el deterioro en el equipo generador de electricidad que propiciará el desarrollo de acciones asertivas que incidan en proporcionar el mantenimiento adecuado de estos dispositivos de energía.

## 6. HIPÓTESIS

A continuación se presentan las hipótesis de la investigación:

- Hipótesis de investigación (Hi): el conocimiento sobre el proceso de monitoreo en línea y diagnóstico de fallas en transformadores de potencia, incidirá directamente en la disminución de fallas en el sistema, mejorando procesos predictivos y preventivos aplicables al mantenimiento, así como su confiabilidad y productividad.
- Hipótesis alternativa (Ha): la instalación de sistemas de monitoreo continuo en los transformadores de potencia, ayuda a mejorar las condiciones de funcionamiento del equipo, permitiendo la descripción de parámetros importantes en operación, que deben mantener los transformadores, esto incidirá directamente en la disminución de fallas en el equipo, incrementando su confiabilidad.
- Hipótesis estadística: los problemas en devanados y en boquillas representan unas de las fallas más frecuentes en transformadores de potencia, por lo que un monitoreo en línea orientado a la detección de dichas fallas determinará resultados positivos para su buen funcionamiento y operación.



## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1. Fallas que presentan los transformadores**

Los transformadores de potencia, como cualquier equipo puede fallar en determinado momento, porque su funcionamiento óptimo dependerá del mantenimiento que se le aplique, sin embargo, en la mayoría de casos las fallas se deben a funciones dieléctricas que están directamente relacionadas con las concentraciones de esfuerzos eléctricos, principalmente, cuando ocurren en puntos específicos donde ya ha existido una degradación, indicando que ocurren daños en el aislamiento principal de los devanados (Corrales, Juan 1954).

Según (Liñán 1998, p. 43), “Aunque existen diferentes tipos de métodos para detectar fallas en sistemas de transformación eléctrica, el más utilizado en la actualidad es el que realiza la medición en línea”, a través del mismo, se pueden detectar descargas parciales. Se utiliza una técnica ultrasónica, que permite visualizar las ondas de presión, que frecuentemente, sucede desde el sitio donde se origina la descarga hasta la pared del transformador, es decir, en la pared.

Como expone (Reason 1996, p. 3), “Los sistemas de monitoreo en línea de los transformadores de potencia, son los que mejores resultados presentan a la hora de incrementar la optimización del equipo”, además a través de un monitoreo continuo de los parámetros más importantes, se hace posible la interpretación de datos que conllevan a establecer si existen ciertas anomalías,

las cuales pueden resolverse si se actúa con prontitud para evitar el deterioro mayor del dispositivo eléctrico.

(Jiménez Jáuregui, Julián 1999, p. 11) considera que los transformadores representan aproximadamente un 70 % como parte importante de los sistemas de transmisión de energía, sea cual fuere el tipo o modelo de estos, “el mantenimiento periódico es de vital importancia para alcanzar su optimización, que contribuye a elevar su rendimiento y evitar posibles daños que contribuyan a su degradación total y por consiguiente, a pérdidas mayores que podrían ocasionar inconvenientes económicos para la empresa.”

Un mantenimiento oportuno, ante la detección inminente de peligro en el equipo, provocado por fallas o disfunciones dieléctricas, representa grandes beneficios para el uso de los equipos de transformación eléctrica, máxime si se llevan a cabo por un sistema en línea de monitoreo, los beneficios son:

- Obtener la información oportuna y actualizada sobre la forma en que están operando los transformadores de potencia.
- Iniciar un registro de datos sobre el funcionamiento del sistema.
- Poder sobrecargar los transformadores sin disminuir el tiempo de utilidad del equipo.
- Recurrir a mantenimientos periódicos que se basen en su condición actual.
- Orientar la toma de decisiones en relación a medidas correctivas para introducirse en el sistema.
- Evitar riesgos que incidan directamente en el deterioro total o parcial del equipo.
- Establecer modificaciones en la operación y funcionamiento del sistema aislante, al momento de realizar el mantenimiento.

- Propiciar la optimización de los dispositivos eléctricos, a través de un plan proactivo de monitoreo predictivo, preventivo.

## **7.2. Implementación de medidas correctivas**

Aunque una de las partes importantes en el transformador es el cambiador de toma, debido a que su función es la de realizar la regulación de energía, a través de la tensión de salida, sin producir la interrupción de corriente, es necesario tomar en cuenta que por ser la única parte con movimiento del equipo, en ella se produce un 40 % de los daños de todo el sistema, provocando que su estado electromecánico sea el más importante para asegurar su potencia y funcionalidad no importando el sistema de transmisión al cual se encuentre conectado, deberá encontrarse en óptimas condiciones para evitar apagones o interrupciones de energía que afecten globalmente a los usuarios. (Bossi, A. 1998)

Asimismo, algunas técnicas utilizadas para implementar medidas acertadas para desarrollar un plan de detección de fallas, se encuentra la técnica en línea, que permite medir mediante dispositivos eléctricos o acelerómetros, la señal de vibración de cada operación del cambiador de tomas en carga, para posteriormente realizar un análisis comparativo entre esta y la señal guía que servirá como parámetro de funcionamiento.

Según (Rivas, 2009, p. 42), “El análisis de las vibraciones de un cambiador de tomas en carga puede ser utilizado para el diagnóstico de averías, para cuestiones de diseño, control de calidad o para fines de mantenimiento predictivo, como monitorización en línea o para detectar un defecto cuando aún es incipiente.” Sin embargo, derivado a que algunos sistemas son un poco complejos, que produce que al repetirse el diagnóstico

para obtener un dato certero sobre la condición de los cambiadores de tomas, se registren datos diversos.

Es importante que se tome en cuenta al momento de realizar un monitoreo de mantenimiento predictivo o preventivo, la implementación de indicadores de impulsos, a través de la inclusión de acciones orientadas a la medición de tiempos entre un impulso y otro, niveles de energía, así como frecuencia con que se llevan a cabo los impulsos.

Aunque el sistema posee sensores que permiten registrar señales que pasan previamente por un amplificador y un código de registro de datos antes de que se visualicen en el equipo de computación para conocer si existen problemas internos en el transformador, es necesario determinar cuáles dispositivos presentan fallas, a través del procesamiento de todas las señales de vibración registradas en el sistema, las cuales permiten obtener una serie de indicadores, que al ser analizados proporcionen una tendencia sobre los niveles, tiempos y frecuencia de los impulsos eléctricos generados por los cambiadores de tomas.

De esta manera se puede determinar cuáles se encuentran dentro de los parámetros establecidos y los que se encuentran fuera de éstos, basados en la señal guía, que es la que se considera como óptima para el funcionamiento del transformador.

Para (Rivas, 2009, p. 53), “Con los indicadores, además de conocer si existen averías internas, se podría determinar en qué elementos del aparato se encuentra el fallo, que contribuiría a reducir el tiempo para su reparación”; que es muy importante, pues impedirá que se revise todo el equipo, se paralice o

deje de funcionar y solamente se realizará el mantenimiento en el dispositivo dañado.

### **7.3. Orientaciones en desarrollo para su aplicación**

Tomando en cuenta que la tecnología es un recurso que permite obtener excelentes herramientas para desarrollar métodos proactivos que representan una diferencia entre las técnicas tradicionales de detección de fallas en transformadores de potencia y las actuales, “es necesario que las personas que están a cargo del mantenimiento de los dispositivos eléctricos, estén bien documentadas sobre su funcionamiento, protección y operación o funcionamiento” (Mago, M., 2011, p. 36).

Se considera el trabajo de investigación como una oportunidad para generar un documento con una propuesta de implementación que brinde las orientaciones necesarias e indispensables para generar un plan de mantenimiento predictivo y preventivo dentro de la empresa, para ponerlo al alcance de los trabajadores.

El documento representa una herramienta fundamental que deberá contener las estrategias pertinentes para poder llevar un control del transformador, el cual incluye cómo realizar una descripción de los resultados del mantenimiento, donde se deberán registrar todos los datos correspondientes al análisis de aceites, y las pruebas eléctricas en conjunto. El contar con estos datos y verificar sus tendencias, permitirá a los responsables del mantenimiento conocer el estado funcional del transmisor eléctrico y les dará la oportunidad de tomar las decisiones necesarias para impedir el que se susciten fallas inesperadas, las cuales pueden llevar incluso, a la pérdida total

del equipo. No solamente afectaría la economía sino también, la calidad y confiabilidad en el servicio que ofrecen.

Sin embargo, previo a presentar algunas directrices que incluirá el documento en mención, es indispensable resaltar que para que se pueda distribuir energía eléctrica, las acciones u operaciones de transformación son muy importantes, que involucra la compra del equipo necesario. De lo contrario, resultaría imposible adaptar la generación y posterior transmisión de la energía eléctrica a las necesidades y requerimientos fundamentales del usuario.

Se requiere de un gran esfuerzo e interés por parte del personal involucrado en la operación y mantenimiento del equipo de transformación, quienes deberán hacer uso de documentación que les sirva de apoyo durante el proceso de desarrollo y generación de suministro eléctrico.

Asimismo, el objetivo primordial es unificar criterios acerca del conocimiento que sobre el mantenimiento de transformadores se tiene, con el fin de identificar los límites permisibles de prueba. Siendo uno de los aspectos más importantes que se analizará.

La herramienta se pondrá a disposición de los operadores y encargados de dar mantenimiento a los transformadores de potencia para promover su aplicación tecnológica, tomando en cuenta ciertos procesos innovadores como los que conllevan al monitoreo en línea de las condiciones del equipo existente, con el fin de detectar sus fallas y desarrollar un plan de optimización, a través de la tecnología en línea. Lo anterior, redundará en beneficio de la subestación en estudio, por medio de la optimización de las acciones de

instalación, operación y conducción; así como generación del servicio, a través del mantenimiento y control de los transformadores y reactores de potencia.

Con el propósito de mantener la utilidad del documento se recomienda actualizarlo periódicamente, a través de las propuestas de diagnóstico que se deriven de la experiencia y aplicación de la incorporación de las nuevas técnicas de diagnóstico y de desarrollo tecnológico, que en el sector energético se produzcan, principalmente en Latinoamérica.

A continuación se describen algunos conceptos básicos que se incluirán en el documento por desarrollar:

- Operación: la operación de un transformador permite variar alguna función de la corriente como el voltaje o la intensidad, manteniendo la frecuencia, opera transformando la electricidad que le llega al primario (devanado de entrada) en magnetismo para volver a transformarla en electricidad en el secundario (devanado de salida) en las condiciones deseadas.
- Materiales aislantes: se define como material con escasa o ninguna conductividad eléctrica. “La forma de comportarse es debido a la barrera de potencial que se establece entre sus bandas de valencia y conducción esto no permite la existencia de electrones libres que sean capaces de conducir la electricidad a través del material, el aislante es el que posee más de 4 electrones en su última capa de valencia.” (Smith, W. 1998, p. 55)

- Sistemas de enfriamiento: los transformadores cuentan con algún medio para enfriarlos, estos pueden ser aire o aceite, además el método de enfriamiento que se utilice debe ser capaz de mantener una temperatura adecuada de operación, lo suficientemente baja para prevenir puntos calientes en cualquier área del transformador. El aceite es considerado uno de los mejores medios para refrigeración además cuenta con buenas propiedades dieléctricas.

“Como en la mayoría de máquinas eléctricas, existen pérdidas por dispersión, así en el núcleo y en los devanados del transformador durante su funcionamiento la energía térmica calienta algunas partes del equipo. Según efecto gradientes térmicos el calor se transmite desde su origen a los lugares en los que es transferido al medio refrigerante. La difusión del calor se produce por radiación y convección” (Mota Contreras, E. 1995, p. 29).

Una temperatura elevada de los arrollamientos provoca la carbonización lenta de los aislamientos en contacto con el cobre, de igual forma, si el aceite caliente se mantiene demasiado tiempo por encima de los límites, se descompone creando depósitos de reacción ácida sobre los devanados esto impide la correcta evacuación del calor, elevando exageradamente la temperatura interior del transformador. Se han establecido normas nacionales e incluso internacionales para fijar los calentamientos admisibles en los arrollamientos y en los fluidos refrigerantes, por las razones descritas a continuación.

- Carga (cargabilidad): el estado de carga de un transformador queda definido en función de la pérdida de vida útil del aislamiento, esto se puede calcular con la temperatura del punto más caliente que se da en la espira más interna del bobinado. Esto permite definir si un

transformador fue sobredimensionado, subdimensionado o correctamente dimensionado. La cargabilidad incide en la vida útil, pérdidas y operación del transformador.

- Procedimientos de mantenimiento y diagnóstico: el mantenimiento que se efectúa a los transformadores de potencia actualmente es más estricto y cuidadoso. Un correcto plan de mantenimiento está basado en: pruebas eléctricas y fisicoquímicas, análisis de ingeniería, que son necesarios para garantizar su funcionamiento, durabilidad, disponibilidad y confiabilidad. Actualmente se realizan diversas pruebas preventivas en equipo energizado, además de pruebas como: factor de potencia, cromatografía de gases disueltos en aceite, resistencia de aislamiento y devanados que en la actualidad son reconocidas como métodos confiables para el diagnóstico e identificación de fallas eléctricas.
- Procesos de montaje: es el procedimiento montar e instalar equipos y circuitos eléctricos o electrónicos para maquinaria y equipo industrial, a partir de planos y especificaciones técnicas en condiciones de funcionamiento y seguridad. Realizar el montaje, mantenimiento y reparación de maquinaria y equipo industrial en condiciones de calidad, seguridad y plazos requeridos.
- Elementos de protección: el transformador es un equipo sumamente importante de la instalación eléctrica. Las fallas en este equipo provocan cortes del suministro de energía que representan pérdidas, pueden terminar en daños al equipo o personal de la subestación. Los transformadores cuentan con una serie de elementos que minimizan la posibilidad de fallas internas del transformador también evitan accidentes.

- Componentes y accesorios: dentro de estos se encuentran las partes internas y exteriores que intervienen en el funcionamiento del transformador, así como equipo que se instala para protección y monitoreo del mismo.
  
- Sistemas de control en línea: tienen la característica de que una serie de elementos pueden influir en el funcionamiento del transformador. El objetivo final de un sistema de control en línea es conseguir mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, haciendo que estas alcancen unos valores predeterminados. Un sistema de control en línea ideal debe cumplir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:
  - Garantizar la estabilidad y ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
  - Ser tan eficiente como sea posible.
  - Ser fácil de implementar y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador

#### **7.4. Plan preventivo y predictivo**

- Plan preventivo: se utiliza para prevenir fallas que se generan detectándolas con anterioridad, principalmente son todas las actividades que involucran la revisión e inspección de forma programada, que pueden finalizar en una acción correctiva o de cambio. Las actividades preventivas se realizan a través de un programa, entre las cuales se tiene por ejemplo la revisión y lubricación, previamente establecidas.

- Plan predictivo: es una técnica para pronosticar una futura de falla en un componente o máquina, esto hace posible que dicho componente pueda reemplazarse o repararse, con base en un plan previamente establecido y esto sea justo antes de que falle. Con este plan se busca que el tiempo muerto se minimiza y el tiempo de vida se maximice.
- Procesos proactivos de detección de fallas: es una técnica enfocada en la identificación y corrección de las causas que originan las fallas en equipos, componentes e instalaciones industriales. Esta técnica implementa soluciones que atacan la causa de los problemas, no los efectos. “Un mantenimiento proactivo se basa en localizar la causa principal del problema y tomar las medidas necesarias para que no incurra en el mismo factor.” (Tavares, Lourival. 2000, p. 93)



## **8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS**

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE

PREGUNTAS ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

HIPÓTESIS

INTRODUCCIÓN

### **1. FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

- 1.1. Generalidades sobre fallas que afectan el funcionamiento de transformadores
- 1.2. Función del mantenimiento
- 1.3. Confiabilidad en el servicio de mantenimiento
- 1.4. Parámetros de optimización requeridos
- 1.5. Estrategias para alcanzar un funcionamiento óptimo

### **2. TÉCNICAS DE MONITOREO EN LÍNEA Y SISTEMAS DE DETECCIÓN DE FALLAS**

- 2.1. Técnicas de monitoreo de condición
- 2.2. Campo de aplicación y sensibilidad
- 2.3. Diseño de estrategias proactivas de mantenimiento
- 2.4. Uso de métodos en línea para su implementación

- 2.4.1. Análisis de la situación en que se encuentra el equipo
- 2.4.2. Planes preventivos y predictivos
- 2.4.3. Métodos de detección de fallas con el equipo operando
- 2.4.4. Implementación de estrategias para evitar el deterioro del equipo

### 3. PLAN DE DETECCIÓN DE FALLAS EN LÍNEA

- 3.1. Influencia de las buenas prácticas de mantenimiento
  - 3.1.1. Confiabilidad operacional
  - 3.1.2. Implementación de técnicas de monitoreo de condición
- 3.2. Elementos que forman parte de un plan de mantenimiento
- 3.3. Pruebas de campo
  - 3.3.1. Verificación del comportamiento y estado del transformador
  - 3.3.2. Monitoreo en línea

### 4. MONITOREO DE CONDICIÓN COMO BASE DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO

- 4.1. Descripción de las etapas del plan
  - 4.1.1. Metodología empleada para su aplicación
  - 4.1.2. Información que brinda el monitoreo
- 4.2. Técnicas de mantenimiento utilizadas para la regeneración de transformadores
  - 4.2.1. Pruebas de anticipación
  - 4.2.2. Pruebas de detección
  - 4.2.3. Pruebas de corrección

## 5. DESCRIPCIÓN DE UN CASO PRÁCTICO

- 5.1. Implementación de métodos en línea para la detección de fallas
  - 5.1.1. Descripción del documento y elementos de monitoreo en línea
  - 5.1.2. Integración a las etapas de mantenimiento
  - 5.1.3. Descripción de los resultados
- 5.2. Guía para el fortalecimiento de una labor continua de mantenimiento
  - 5.2.1. Especificaciones sobre el mantenimiento de transformadores
  - 5.2.2. Orientaciones para aplicación de monitoreo
  - 5.2.3. Elementos importantes para el fortalecimiento de un plan de mantenimiento

RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS



## **9. METODOLOGÍA**

### **9.1. Variables**

- Variable independiente (cuantitativa): monitoreo de condición (diagnóstico).
- Variable dependiente (cuantitativa): detección de fallas en transformadores.
- Variable interventiva: personal de mantenimiento, condiciones de monitoreo (temperatura, voltaje, corriente, vibraciones, gases) y tipo de mantenimiento.

### **9.2. Indicadores**

- Mejora en diagnóstico de fallas.
- Mejores procesos de mantenimiento predictivo.
- Aumento confiabilidad del equipo.
- Aumento en productividad del equipo.

### **9.3. Estudio**

El trabajo de investigación es de tipo descriptivo y explicativo con el fin de definir en términos claros y específicos las características de los transformadores de potencia, su funcionamiento y mantenimiento predictivo, a través de la detección de fallas por medio del monitoreo en línea.

Las observaciones sobre este método se realizarán en la Subestación Guatesur, siendo esta parte la investigación de campo y experimental. El experimento consiste en manipular la variable independiente para analizar en qué medida el monitoreo de condición en línea puede incidir en: la detección de fallas, la mejora del mantenimiento predictivo y en el aumento de conocimientos de diagnóstico para el personal de mantenimiento. En este sentido el estudio es cuantitativo y explicativo al tratar de ocuparse tanto de la determinación de las causas de fallas, como de los efectos (investigación experimental), y su consecuente disminución, mediante la prueba de la hipótesis planteada.

- Fase I: documentación y terminología

En el documento se define la terminología sobre la función del mantenimiento, su objetivo y confiabilidad, conociendo el nivel de función adecuada que se desea obtener en los transformadores de alta potencia se podrá determinar los parámetros de optimización requeridos y, en consecuencia, tratarán de implementarse las estrategias necesarias para alcanzarlos.

Se describirán las distintas fallas y técnicas de monitoreo de condición, su campo de aplicación y su sensibilidad, así como los aspectos más importantes a tomar en cuenta a la hora de diseñar las estrategias proactivas de mantenimiento.

Se enfatizará en la influencia de las buenas prácticas de mantenimiento, en cuanto a confiabilidad operacional se refiere, lo cual no debe olvidarse a la hora de implementar técnicas de monitoreo de condición y es por ello que se describirán en un plan de mantenimiento, el cual menciona las acciones que

deberán tomarse, ya sea para anticipar y prevenir; corregir o detectar la falla según resulte más conveniente.

- Fase II: investigación y pruebas de campo

La investigación de campo se llevará a cabo en la subestación guatesur cercana a la capital, para lo cual se utilizará la técnica de recolección de datos en línea y la observación directa.

Este trabajo permitirá obtener información sobre transformadores de protección que utilizan el monitoreo en línea para la detección de fallas, lo cual determinará los beneficios de este sistema y, al mismo tiempo podrá establecerse si los trabajadores cuentan con la información suficiente para conocer las estrategias y mecanismos necesarios para su aplicación, así como las fortalezas y debilidades del mismo; proponiendo su implementación en caso de no contar con este, o mejorarlo si así se considera necesario.

Por lo anterior, se realizarán visitas durante tres meses a las instalaciones de la subestación con el objetivo de obtener un registro documental de la forma en que realizan los diagnósticos de detección de fallas con el fin de establecer y determinar si dicho sistema permite la optimización del equipo, al desarrollar monitoreos continuos que impidan el deterioro o daño de los transformadores de potencia.

- Fase III: evaluación y análisis de resultados

Por último, con base en la información documental y de campo recolectada, se desarrollará la evaluación y el análisis de resultados, para obtener las conclusiones y recomendaciones de las condiciones actuales, a

través del proceso de diagnóstico de operación del transformador, y por medio de un análisis del equipo, realizado por el personal de mantenimiento de la Subestación Guatesur, en el cual se utilizan los métodos de monitoreo en línea para diseñar un plan de mantenimiento adecuado.

Como técnica de análisis se utilizará la observación directa a los transformadores de potencia con la participación de los encargados de mantenimiento en el área operativa de transformadores de potencia.

La construcción de instrumentos de observación se hará a partir de listas de cotejo debidamente estructuradas. La observación documental se llevará a través del análisis e interpretación de los datos que arroje el proceso de observación. El análisis secundario se llevará a cabo a través de fuentes directas e indirectas de información.

## 10. TÉCNICAS Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

En el proceso de análisis de información para desarrollar la investigación durante las tres fases antes descritas se combinará la investigación cualitativa e investigación cuantitativa.

Al principio se utilizará el análisis cualitativo, que consiste en captar información de los transformadores de potencia de la Subestación Guatesur, indagando sobre todo lo relativo a manuales de equipo, manuales de instalación, historial de mantenimiento e información de encargados de mantenimiento, obteniendo conocimiento de las diferentes perspectivas de los transformadores y su operación, así poder identificar los aspectos que se deben tener en cuenta en la posterior recopilación de datos, además ampliar la visión sobre dichos equipos, ayudando así a evitar un análisis erróneo posterior.

El análisis cuantitativo se dedica a recoger, procesar y analizar datos cuantitativos o numéricos sobre variables previamente determinadas que están relacionadas con el funcionamiento del equipo tales como: temperatura, vibraciones, gases disueltos, corrientes o voltajes entre otras.

Esto le da una connotación que va más allá de un mero listado de datos organizados como resultado, pues estos datos que se muestran en el informe final, están en total consonancia con las variables que se declararon desde el principio y los resultados obtenidos van a brindar una realidad específica a la que estos están sujetos. Además de lo antes expuesto, vale decir que la investigación cuantitativa estudia la asociación o relación entre las variables que

han sido cuantificadas, lo que ayuda aún más en la interpretación de los resultados.

Para analizar los datos se utilizarán métodos de estadística descriptiva, que se dedicará a la recolección, descripción y resumen de datos originados a partir de los fenómenos y variables de estudio anteriormente descritos. Además los datos serán resumidos numérica o gráficamente, para un análisis de resultados más adecuado y plantear las conclusiones acertadas.

El objetivo para este proyecto de investigación estadística es investigar la causalidad y, en particular extraer una conclusión en el efecto de que algunos cambios en los valores de la variable independiente tienen sobre la variable dependiente. Para esto se hará un estudio experimental, lo cual implica: tomar mediciones de los transformadores bajo estudio antes de monitoreo de condición, manipular el sistema que en este caso implica agregar el monitoreo de condición en línea y luego tomar mediciones nuevamente usando el mismo procedimiento para determinar si la manipulación al sistema (añadir monitoreo en línea) ha modificado los valores de las mediciones en los transformadores.

## 11. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Se presenta a continuación la descripción de las tareas a ejecutar y el período programado para su inicio y finalización.

Figura 1. Cronograma de actividades

No. FASE	DESCRIPCIÓN	ACTIVIDADES	2014				
			MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO
FASE I	Documentación y terminología	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definir problemas (fallas)</li> <li>- Definir términos de mantenimiento</li> <li>- Descripción de técnicas de monitoreo</li> <li>- Análisis de historial equipo</li> </ul>					
FASE II	Investigación y pruebas de campo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de equipo de monitoreo</li> <li>- Toma de datos-monitoreo continuo</li> <li>- Observación de transformadores bajo monitoreo</li> <li>- Detección de fallas recurrentes</li> </ul>					
FASE III	Evaluación y análisis de resultados	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis de datos monitoreados en línea</li> <li>- Descripción de fallas</li> </ul>					
INFORME	Conclusiones e informe final	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comparación de resultados monitoreo en línea vs. sin monitoreo en línea</li> <li>- Descripción de propuesta de mantenimiento basada en monitoreo en línea</li> </ul>					

Fuente: elaboración propia.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Factibilidad se refiere a la disponibilidad de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetivos o metas señalados anteriormente en este documento, en relación al desarrollo del monitoreo en línea y los beneficios que puede aportar a la gestión de mantenimiento de los transformadores de potencia, analizaremos para la factibilidad tres aspectos básicos:

- Factibilidad operativa: en este proyecto se refiere a todos aquellos recursos donde interviene algún tipo de actividad (proceso) tales como: instalación de sensores y equipo de medición además de análisis de datos monitoreados, dependiendo de los recursos humanos que participen durante la operación del proyecto que es básicamente personal de mantenimiento y operación.
- Factibilidad técnica: se refiere a los recursos necesarios como herramientas, conocimientos, habilidades, experiencia, etc., que son necesarios para efectuar las actividades o procesos que requiere el proyecto. Existe personal capacitado en operación y mantenimiento de los transformadores de potencia que se encargarán de todo el proceso de monitoreo con los equipos de medición que estarán en constante supervisión de que el proyecto sea realizado con seguridad y de una manera profesional, para que los datos y resultados sean acertados.
- Factibilidad económica: se refiere a los recursos económicos y financieros necesarios para desarrollar o llevar a cabo las actividades o procesos. La administración de la subestación ya contempla dentro de

la puesta en marcha del proyecto el costo de: equipo de monitoreo de condición, capacitación y el que implica que los operadores y ejecutores de mantenimiento realicen el monitoreo por lo que está aprobado. Para la subestación este tipo de diagnóstico representa mejoras en proceso de mantenimiento, aumento de productividad y confiabilidad de sus equipos.

Tabla I. Recursos humanos y financieros

RECURSO	DESCRIPCIÓN	TOTAL (Q)
Asesor	Horas de asesoría del profesional, tomando en cuenta costo mínimo establecido por la Escuela de Estudios de Postgrado	2 500,00
Estudiante	Horas dispuestas para realizar y completar las fases de documentación, investigación, evaluación y análisis de resultados, hasta elaborar informe final	0,00
Insumos	Costos de papelería, impresiones, internet, fotocopias. Costos generales de insumos de oficina.	2 000,00
Equipo de protección personal	Costos de equipo para seguridad y protección industrial, casco, guantes, lentes y botas.	1 800,00
Costos de operación	Visitas, traslado en vehículo (combustible y parqueos).	2 500,00
Equipo de monitoreo e historial de transformadores	Equipo eléctrico y electrónico de monitoreo y muestro, manuales, información e historial de mantenimiento de los equipos a analizar (proporcionado por el Departamento de Mantenimiento)	0,00
<b>Total</b>		<b>8 800,00</b>

Fuente: elaboración propia.

## 13. BIBLIOGRAFÍA

1. Arias, B. (2009). *Métodos, Diseños y Técnicas de Investigación*. Universidad UDIMA: Valladolid, España.
2. Arias, F. (1999). *El Proyecto de Investigación. Guía para su elaboración*. (3ª. edición). Caracas, Venezuela: Editorial Epísteme.
3. Azevedo, V. (2005). *Apuntes de los cursos de Estabilidad de Sistemas Eléctrico de Potencia de FING. Capítulos de estabilidad transitoria y protecciones*. (2ª. edición). Universidad de la República de Uruguay.
4. Bossi, A. (1998). *Operación y Mantenimiento de Transformadores de Potencia. Requerimientos de Usuarios y Fabricantes*. (2ª. edición). España: Editorial McGraw-Hill.
5. Corrales, J. (1994). *Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores*. (3ª. edición rev.) Escuela de técnico electricista. Barcelona, España: Editorial Labor.
6. Destacados Electrónica y Electricidad. [www.avantec.cl](http://www.avantec.cl).
7. Foro de Mantenimiento Predictivo. [www.infoweek.cl](http://www.infoweek.cl).
8. Jiménez, J. et al (1999). *Operación y mantenimiento de transformadores de potencia*. Comisión Federal de Electricidad. México, D.F.

9. Liñán R., Pascacio A., y Núñez A. (1998). *Extensión de la vida útil de transformadores de potencia mediante el monitoreo en línea*. Acapulco, Guerrero: Reunión de Verano de Potencia (RVP-99) de la IEEE Sección México.
10. Mago, M. (2011). *Análisis de Fallas de Transformadores de Distribución utilizando Métodos No Convencionales*. Tesis de maestría. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela: Área de Estudios de Postgrado. Facultad de Ingeniería.
11. Montané, J. et al (2011). “Estado actual del diagnóstico de transformadores de potencia en las centrales eléctricas cubanas”, *APLICACIONES INDUSTRIALES. Ingeniería energética*, (vol. XXXII, ISSN 1815 – 5901). Cuba.
12. Normas para Transformadores de Distribución. CADAFE (1979). Caracas, Venezuela.
13. Reason, J. (1996). *Para combatir las pérdidas, averigua a dónde va cada Kwh*. Instituto de investigaciones Energía Eléctrica: México.
14. Rivas, E. (2009). *Condition Assessment of Power OLTC by Vibration Analysis Using Wavelets Transform*. Tesis doctoral. México: Revista IEEE Transactions on Power Delivery.
15. Setayeshmehr, A., Akbari, H., y E. Gockenbach (2006). *On-line Monitoring and Diagnoses of Power Transformer Bushings*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. (1ª. edición).

16. Smith, W. (1998). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales (3ª. edición)*. España: Editorial McGraw-Hill.
17. Tamayo, M. (2006). *El Proceso de la Investigación Científica*. México: cuarta edición. Editorial Limusa.
18. Tavares, L. (2000). *Administración Moderna del Mantenimiento*. (2ª.edición). Brasil: Editorial Datastream.

