



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO OPTIMIZADO CON BASE  
EN EL ÍNDICE DE SALUD PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS EN LA GESTIÓN DE  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA CON MÁS DE TREINTA AÑOS DE OPERACIÓN EN  
EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE GUATEMALA**

**Lubin Lizandro Solares Cabrera**

Asesorado por el Maestro Ing. Rony Aureliano Jucup Solís

Guatemala, marzo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO OPTIMIZADO CON BASE  
EN EL ÍNDICE DE SALUD PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS EN LA GESTIÓN DE  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA CON MÁS DE TREINTA AÑOS DE OPERACIÓN EN  
EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LUBIN LIZANDRO SOLARES CABRERA**

ASESORADO POR EL MA. ING. RONY AURELIANO JUCUP SOLÍS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, MARZO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonzo Rivera Carrillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **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 UN PLAN DE MANTENIMIENTO OPTIMIZADO CON BASE  
EN EL ÍNDICE DE SALUD PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS EN LA GESTIÓN DE  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA CON MÁS DE TREINTA AÑOS DE OPERACIÓN EN  
EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 12 de enero de 2022.

**Lubin Lizandro Solares Cabrera**



**EEPFI-PP-0204-2022**  
Guatemala, 12 de enero de 2022

**Director**  
**Armando Alonso Rivera Castillo**  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Presente.

Estimado Ing. Rivera

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO OPTIMIZADO CON BASE AL ÍNDICE DE SALUD PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS EN LA GESTIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA CON MÁS DE TREINTA AÑOS DE OPERACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión del Mantenimiento - Gestión financiera del mantenimiento (mantenimiento, proyectos de inversión y servicios)**, presentado por el estudiante **Lubin Lizandro Solares Cabrera** carné número **200413397**, quien optó por 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 en ARTES en Ingeniería De Mantenimiento.

Y 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 Décimo, 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.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

RONY AURELIANO JUCUP SOLÍS  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
COLEGIADO NO. 16,972

Mtro. Rony Aureliano Jucup Solís  
Asesor(a)

*Rocio Medina Galindo*

Mtra. Rocio Carolina Medina Galindo  
Coordinador(a) de Maestría



*Edgar Darío Alvaréz Cotí*

Mtro. Edgar Darío Alvaréz Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-0204-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO OPTIMIZADO CON BASE AL ÍNDICE DE SALUD PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS EN LA GESTIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA CON MÁS DE TREINTA AÑOS DE OPERACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Lubin Lizandro Solares Cabrera**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, enero de 2022

LNG.DECANATO.OI.216.2022

La Decana 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 INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO OPTIMIZADO CON BASE EN EL ÍNDICE DE SALUD PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS EN LA GESTIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA CON MÁS DE TREINTA AÑOS DE OPERACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE GUATEMALA**, presentado por: **Lubín Lizandro Solares Cabrera**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada★

Decana

Guatemala, marzo de 2022

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Mis padres</b>	Benigno Solares y Rubelina Cabrera por su amor, paciencia y esfuerzo, motor que me ha impulsado a conseguir este importante logro.
<b>Mis hermanos</b>	Juan Manuel y Omar Antonio Solares por estar siempre y acompañarme en este recorrido.
<b>Mis tíos</b>	Rosario, Raquel y Concepción Solares quienes fueron un soporte importante durante mi etapa de estudiante.
<b>Primo</b>	Byron Hernández por ser el motor que me impulsó a continuar con mis estudios cuando estuve a punto de abandonar.
<b>Familia</b>	Familiares en general que me motivaron durante todo este tiempo a terminar mi carrera.
<b>Amigos</b>	Por impulsarme con su ejemplo y dedicación.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la institución que me permitió continuar con mi formación profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por darme las herramientas necesarias para buscar la excelencia en el trabajo que desarrollo.
<b>Escuela de Estudios de Postgrado</b>	Por haberme dado la opción de retomar mis estudios y culminar este hito.
<b>Mi asesor</b>	Ma. Ing. Rony Jucup por su apoyo y guía con el trabajo de graduación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
2.1. Generalidades .....	3
2.1.1. Análisis de resultados de investigaciones previas.....	3
2.1.1.1. Análisis a nivel internacional .....	3
2.1.1.2. Análisis a nivel nacional .....	7
2.1.2. Discusión de resultados de investigaciones previas .....	10
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
3.1. Descripción general del problema.....	11
3.2. Definición del problema .....	11
3.3. Problemas específicos.....	12
3.4. Delimitación del problema.....	13
3.5. Pregunta principal de investigación .....	13
3.6. Preguntas complementarias de investigación .....	13
3.7. Localización del área o lugar en estudio .....	14
3.8. Ubicación de área en estudio .....	15

4.	JUSTIFICACIÓN.....	17
5.	OBJETIVOS .....	19
6.	NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN .....	21
7.	MARCO TEÓRICO .....	23
7.1.	El sistema de transmisión .....	23
7.1.1.	Componentes de un sistema de transmisión .....	23
7.1.2.	Subestaciones eléctricas .....	24
7.1.3.	Líneas de transmisión .....	24
7.2.	Transformador de potencia .....	24
7.2.1.	Ciclo de vida del transformador de potencia .....	25
7.2.2.	Envejecimiento del transformador de potencia .....	26
7.3.	Mantenimiento del transformador de potencia.....	27
7.3.1.	Normas de referencia .....	27
7.3.2.	Estrategias de mantenimiento .....	27
7.3.2.1.	Monitoreo de condición.....	27
7.3.2.2.	Mantenimiento basado en tiempo .....	28
7.3.2.3.	Mantenimiento basado en condición....	29
7.3.2.4.	Mantenimiento correctivo .....	29
7.3.2.5.	Monitoreo continuo en línea.....	30
7.4.	Índice de salud.....	30
7.4.1.	Probabilidad de falla .....	31
7.4.2.	Factor de consecuencia.....	31
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	33
9.	METODOLOGÍA .....	37

9.1.	Tipo de la investigación o propuesta.....	37
9.2.	Diseño de la investigación o propuesta.....	37
9.3.	Enfoque de la investigación o propuesta .....	37
9.3.1.	Variables.....	38
9.3.2.	Operacionalización de variables .....	38
9.4.	Universo y población de estudio .....	39
9.4.1.	Criterios de inclusión.....	40
9.4.2.	Criterios de exclusión.....	40
9.5.	Muestreo .....	40
9.6.	Hipótesis.....	42
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....	43
10.1.	Métodos de recolección de datos .....	43
10.2.	Técnicas de recolección de datos.....	43
10.3.	Instrumentos de recolección de datos.....	43
10.4.	Procesamiento y análisis de datos.....	43
10.5.	Límites de la investigación .....	44
10.6.	Obstáculos (riesgos y dificultades) .....	44
10.7.	Aspectos éticos de la investigación .....	44
10.8.	Autonomía .....	44
10.9.	Riesgo de la investigación .....	45
11.	CRONOGRAMA.....	47
11.1.	Descripción detallada del cronograma y sus fases .....	47
11.2.	Cronograma.....	48
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	49
12.1.	Costo del estudio .....	49

REFERENCIAS..... 51

APÉNDICES ..... 57

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Localización de área en estudio .....	15
2.	Ubicación de área en estudio .....	16
3.	Cronograma .....	48

### TABLAS

I.	Operacionalización de variables.....	38
II.	Valores k y niveles de confianza .....	41
III.	Costos del estudio.....	50



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>k</b>	Constante de nivel de confianza que indica la probabilidad de que los resultados del estudio sean ciertos o no.
<b>e</b>	Es el error muestral que se considera.
<b>N</b>	Tamaño de la población.
<b>n</b>	Tamaño muestra a determinar.
<b>q</b>	Variabilidad negativa.
<b>p</b>	Variabilidad positiva.



## GLOSARIO

<b>Activo</b>	Representa un bien de la empresa, adquirido y que se espera genere un beneficio futuro.
<b>AGD</b>	Análisis de gases disueltos
<b>Falla</b>	Es un evento inesperado que implica el malfuncionamiento o paro de un equipo.
<b>Mantenimiento</b>	Acciones que tienen como un objetivo mantener un artículo o adecuarlo para su correcta operación.
<b>Riesgo</b>	Es la posibilidad de que se produzcan consecuencias negativas que resulten en daños a las personas o equipos en una situación dada.



## **RESUMEN**

El objetivo del presente trabajo de investigación es desarrollar un plan de mantenimiento optimizado para los transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala.

Múltiples investigaciones a nivel internacional concluyen que el parque de transformadores a nivel mundial ha venido envejeciendo y muchos de los equipos se acercan al final de su vida útil; optimizar el plan de mantenimiento con base en el índice de salud permitirá reducir los costos dedicados al mantenimiento de los equipos.

Para clasificar los activos se determinará el índice de salud de los activos, con base en la probabilidad de falla y los efectos que resultarían en el sistema de transmisión ante la ocurrencia de una de ellas. Una vez que los activos se han clasificado, se determinan las tareas de mantenimiento para cada uno de acuerdo con su condición.

La realización del estudio es factible al determinar que se cuenta con los resultados de las pruebas realizadas a los transformadores objeto de estudio, la metodología propuesta para la recolección de datos es la observación de los reportes de prueba que se han realizado durante los tres últimos años en el plan de mantenimiento de las subestaciones.

Para la elaboración del estudio se cuenta con los recursos necesarios ya identificados, la disponibilidad y herramientas de índole personal y se determina que el costo del estudio será de Q. 38,500.00.



# 1. INTRODUCCIÓN

Entre los activos principales instalados en las subestaciones que conforman la red de transmisión de Guatemala se encuentran los transformadores de potencia, equipo encargado de transformar las variables de tensión y corriente de tal manera que la energía eléctrica pueda ser transportada desde los centros de generación y aprovechada en los centros de consumo.

El transformador de potencia es un equipo diseñado para operar bajo ciertas condiciones y de manera confiable por largos periodos de tiempo; pero, como todos los activos, el transformador se ve sometido a un proceso natural de envejecimiento y desgaste producido por diferentes factores durante su explotación.

Para la realización de la presente investigación, se determinará la condición de los transformadores que tienen más de diez años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala con el objetivo de clasificarlos de acuerdo con su condición y optimizar las tareas de mantenimiento dedicadas para cada equipo.

Como resultado de la investigación se desarrollará un plan de mantenimiento optimizado que permita a las gerencias de mantenimiento enfocar las tareas y recursos de manera efectiva.

En el primer capítulo se hace una revisión de investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional, se hace una discusión de los resultados obtenidos con el objetivo de darle un enfoque a la investigación; en el capítulo dos se discute sobre los factores que dan origen al problema general de investigación y se plantean los problemas específicos.

El tercer capítulo incluye el marco teórico preliminar, se hace una descripción de los conceptos que serán la base para realizar la investigación; en el capítulo cuatro se propone la metodología de investigación, se definen las variables y el tratamiento que se dará a cada una. En el capítulo cinco se definen las tareas y la secuencia de ejecución, aquí se determinan los recursos y costos que demandará la investigación. En el capítulo sexto se analiza la factibilidad para desarrollar el estudio, se hace una propuesta de índice de contenidos para el informe final, las referencias fuente de consulta y el apéndice en donde se muestra la matriz de consistencia.

## **2. ANTECEDENTES**

En el presente capítulo se describen aspectos relacionados con la gestión de los planes de mantenimiento para transformadores de potencia que han sido abordados en diferentes estudios a nivel internacional y nacional.

### **2.1. Generalidades**

A continuación, se mencionan los aspectos más importantes de investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional, principalmente en América del sur y Centro América, sobre las estrategias de mantenimiento y clasificación de los activos con base en el índice de riesgo.

#### **2.1.1. Análisis de resultados de investigaciones previas**

Se realiza un análisis de estudios realizados a nivel maestría en universidades de: Ecuador, Perú, Colombia, México y Guatemala; estudios que se han enfocado en el análisis de las técnicas de mantenimiento basado en condición, gestión de los planes de mantenimiento, teoría del índice de riesgo de los activos y normas de referencia que serán las bases para la elaboración del presente protocolo.

##### **2.1.1.1. Análisis a nivel internacional**

En Ecuador Jiménez (2020) en su tesis de maestría realizó una *Propuesta de un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM aplicado a los activos críticos del sistema eléctrico de distribución a nivel de subestaciones.*

Dos de las conclusiones más importantes del estudio se mencionan a continuación:

Jiménez (2020):

Como resultado de la aplicación de la metodología RCM en su etapa de evaluación de criticidad, se ha determinado que los activos críticos del sistema eléctrico de la compañía Continental Tire Andina son: El transformador de potencia y los interruptores de la subestación.

El transformador de potencia es una máquina que puede presentar fallos ocultos que se desarrollan en el tiempo, es importante la utilización de estrategias de mantenimiento preventivo con la aplicación de técnicas predictivas como las pruebas eléctricas, AGD, calidad del aceite y análisis de furanos en periodos anuales o posteriores a eventos que presumiblemente causen fallos potenciales. (p. 8)

Según se determinó en el estudio planteado por el ingeniero Jiménez, el transformador de potencia es uno de los activos principales de las subestaciones y en él se deben aplicar las estrategias de mantenimiento que estén de acuerdo con la condición real de cada activo.

Por su parte, en el estudio realizado en Ecuador por los ingenieros Criollo y Quito (2020), en su tesis de maestría, denominado: *Desarrollo de una propuesta metodológica para la gestión de activos físicos en la planta de Continental Tire Andina (CTA), Cuenca*; concluyen sobre los sistemas de gestión de mantenimiento:

Criollo y Quito (2020):

Los sistemas de gestión de mantenimiento permiten coordinar actividades de mantenimiento, dichos sistemas pueden basarse en herramientas de programación simples o más sofisticadas. Los sistemas deben seleccionarse, implementarse y utilizarse de manera adecuada y efectiva para la gestión de actividades de mantenimiento como: monitoreo de condición, inspección o mantenimiento predictivo, mantenimiento preventivo, pruebas de funcionamiento y mantenimiento correctivo. (p. 77)

Como se indica en el estudio realizado por los ingenieros Criollo y Quito, la importancia de contar con un sistema adecuado de gestión del mantenimiento permite seleccionar e implementar los programas de mantenimiento de manera optimizada para alcanzar los objetivos planteados.

En Ecuador, en su tesis de maestría, el ingeniero Ortiz (2020) desarrolló un *Modelo de gestión del mantenimiento para empresas distribuidoras de energía eléctrica utilizando estrategias basadas en la confiabilidad y en los riesgos de los componentes asociados a las redes de distribución*. De los resultados del modelo desarrollado el ingeniero Ortiz concluye lo siguiente:

Ortiz (2020):

El enfoque basado en el riesgo para la determinación de la estrategia de mantenimiento óptima, integra la información obtenida de la inspección y el monitoreo de los activos del sistema de distribución con sus características de falla. El cálculo de la reducción de riesgos proporcionada por cada tarea de mantenimiento permite al administrador de activos sopesar los beneficios frente al costo. Este método combina las

actividades de mantenimiento en un solo objetivo de maximizar el rendimiento del sistema con una asignación mínima de recursos.

Es una estrategia integral que da como resultado una utilización óptima de los recursos y un mejor rendimiento del sistema. (pp. 108-109)

Como lo indica el ingeniero Ortiz, para optimizar los recursos y conseguir un mejor rendimiento de un sistema en particular es importante utilizar una estrategia de mantenimiento con base en el índice de riesgo de los activos.

Desde el punto de vista de Ramírez (2018), “los resultados de evaluación de activos en transformadores de potencia permiten optimizar las decisiones de inversión, reposición y mantenimiento en el largo plazo en función del riesgo y no simplemente en función de la condición del activo” (p. 106). Con base en lo expresado, la importancia de estudiar los activos que se encuentran cercanos a su vida útil permitirá enfocar los recursos de manera eficiente y prescindir de alguno de los transformadores en caso se determine que este está por llegar al final de su vida útil.

Según lo expresado en el estudio realizado por Ramírez, el mantenimiento basado en condición se puede complementar al hacer una adecuada gestión del riesgo, esto nos permitirá clasificar los activos y aplicar el plan de mantenimiento que mejor se adapte a cada uno.

En la metodología propuesta por Gálvez (2021), indica que uno de los aspectos más importantes que deberá ser considerado durante la planificación de los planes de mantenimiento en sistemas eléctricos, “tiene que ver con el desarrollo de bases de datos que contengan la información más importante y relevante de los componentes del sistema” (p. 72). De aquí la importancia de

tener una base de datos confiable que permita hacer los análisis requeridos para la toma de decisiones.

#### **2.1.1.2. Análisis a nivel nacional**

La CNEE (1996) mediante Las Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio de Transporte de Energía Eléctrica, establece que los transportistas son los responsables y “deberán conservar en buen estado su sistema por seguridad y por buen funcionamiento” (p. 6). Aquí se establecen también los periodos recomendados para realizar el mantenimiento de las instalaciones, así como las sanciones a las que estarán sujetos en caso los equipos presenten falla.

De acuerdo con lo establecido en la normativa nacional, y de acuerdo con el ente regulador en Guatemala; es responsabilidad de los transportistas implementar las tareas de mantenimiento que garanticen que el sistema funcione adecuadamente, a un bajo costo y de manera continua.

Tejaxún (2019) en su tesis de maestría de la Escuela de Postgrados, de la Facultad de Ingeniería; titulada: *Desarrollo de un modelo de gestión de mantenimiento a través del monitoreo de condición, utilizando ensayos no destructivos*, una de las principales conclusiones del estudio es la siguiente:

Tejaxún (2019):

La gestión de mantenimiento predictivo utilizando monitoreo de condición, es la herramienta que proporciona la mayor cantidad de tiempo para la planificación de mantenimientos correctivos programados. El objetivo del monitoreo de condición es detectar la aparición de fallas incipientes, por lo que permite detectar la frecuencia mínima que debe haber entre

inspecciones sin correr el riesgo que se presente una falla potencial. (p. 73)

Como lo indica Tejaxún en su tesis de maestría, hacer una correcta gestión del mantenimiento permite planificar las tareas y ejecutar de manera eficiente los programas de mantenimiento, esto ayuda a eliminar el riesgo de ocurrencia de fallas catastróficas en el sistema.

En Guatemala el ingeniero Dardón (2018) en su tesis de maestría titulada: *Análisis de riesgo de falla en transformadores eléctricos de potencia utilizando tecnologías de mantenimiento predictivo no intrusivo*, concluye con respecto a la falla de un transformador lo siguiente:

Dardón (2018):

Las condiciones de riesgo asociadas a las anomalías encontradas por integración tecnológica: el 65% de la muestra está a riesgo por las altas temperaturas que degradan el papel aislante, generando gases combustibles (...) las consecuencias de este evento son explosión, por la acumulación y sobrecalentamiento de gases combustibles en un recinto cerrado en presencia de descargas eléctricas, incendio de la unidad, daño consecuencial hacia las vecindades en el caso de no existir barreras efectivas corta fuego, alta probabilidad de daños al personal, interrupción de negocios, penalizaciones por no cumplir contratos. (p. 65)

Según lo indicado por Dardón, las consecuencias del fallo de un transformador pueden ser catastróficas y provocar desde el daño total del activo hasta provocar daños a las personas, he aquí la importancia de conocer el índice

de salud real de los activos y gestionar los planes de mantenimiento que estén de acuerdo con el estado de los equipos.

Al revisar información de estudios realizados en Guatemala, se determina que no se tienen muchos antecedentes de investigaciones realizadas en el país con respecto a los temas objeto de investigación, se plantean algunas investigaciones internacionales que complementan los antecedentes de referencia para el desarrollo del protocolo de investigación, entre otros:

En México el ingeniero químico Olgúin (2018) como parte de su tesis de maestría presenta una *Propuesta de implementación de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), en el gran hotel Xalapa*, una de las conclusiones más importantes de la propuesta es:

Olgúin (2018)

El RCM es un método efectivo para resolver el problema que se planteó en este trabajo (aumentar la disponibilidad de sus equipos al reducir su riesgo de falla), debido a que con sus herramientas se pudo cuantificar la criticidad de dichos equipos, se identificaron aspectos diferentes a sus fallas (causas, efectos y consecuencias) y se propusieron las tareas de mantenimiento necesarias para prevenir su ocurrencia. (p. 68)

Olgúin afirma que: implementar un plan de mantenimiento basado en condición permite clasificar los activos de acuerdo con la criticidad que representan en el sistema permitirá enfocar las tareas de mantenimiento que minimicen la probabilidad de ocurrencia de una falla.

Como afirma Lemi (2018), aplicar una estrategia de mantenimiento con base en el mantenimiento correctivo al atender situaciones de emergencia, se puede traducir en acumulación de tareas de mantenimiento y deficiencia en la atención de posibles fallas, concluyendo así que el mantenimiento correctivo no es el recomendado para los sistemas de gestión de mantenimiento de transformadores de potencia.

### **2.1.2. Discusión de resultados de investigaciones previas**

En los estudios realizados se puede observar una tendencia a aplicar una estrategia de mantenimiento basado en la condición. Los estudios revisados concluyen que este tipo de mantenimiento permite anticiparse a la ocurrencia de las fallas y planificar adecuadamente las tareas de mantenimiento.

Según las investigaciones realizadas por los ingenieros Jiménez y Dardón se puede concluir que los transformadores de potencia son los activos principales de las subestaciones y que una falla de estos pueda resultar catastrófica para un sistema de transmisión de potencia.

Por su parte Ortiz y Gálvez aportan suficiente información sobre la importancia del índice de riesgo en la gestión de los programas de mantenimiento y las ventajas que permite al mantenedor.

Finalmente, Ramírez y Lemi concluyen que hacer una clasificación de los activos con base en el índice de riesgo permitirá definir las tareas del mantenimiento para cada activo al determinar de la probabilidad de falla y las consecuencias generadas por la ocurrencia de estas.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En el presente capítulo se describen aspectos que dan origen a la presente investigación, se hace una categorización y descripción del problema principal y los problemas secundarios.

#### **3.1. Descripción general del problema**

A la fecha que se realiza la presente investigación, no existe una gestión de los planes de mantenimiento para los transformadores con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala, y al menos 10 de los transformadores objeto de análisis ya superan esta edad.

Todavía no se ha realizado un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala.

#### **3.2. Definición del problema**

Aunque los transformadores de potencia se consideran un equipo muy confiable, el parque instalado de transformadores a nivel mundial ha venido envejeciendo. Westman, Lorin y Ammann,(2010) indican que la vida media de los transformadores en plantas industriales esta alrededor de los 30 años y de 40 años en las industrias eléctricas; esta situación se refleja en los transformadores instalados en Guatemala y que son objeto de estudio.

Los programas tradicionales de mantenimiento de transformadores de potencia se diseñan con base en una programación por intervalos de tiempo desde el momento en que los equipos se ponen en servicio hasta el momento en que fallan, el programa de mantenimiento consiste en aplicar un conjunto de pruebas de rutina recomendadas por los estándares internacionales como ANSI y el comité CIGRE; independientemente de la condición de cada equipo.

### **3.3. Problemas específicos**

No se ha determinado el índice de salud de los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala.

Al considerar que los planes de mantenimiento para transformadores de potencia implementados hasta la fecha que se realiza la presente investigación son basados en el tiempo, no se ha determinado cual es el índice de salud de los equipos y por lo tanto no se tiene una clasificación de estos, al aplicar la misma estrategia de mantenimiento a todos los equipos por igual.

No se han clasificado cuáles son los transformadores de potencia con más de treinta años de operación con base en la probabilidad de falla y el factor de consecuencia que representan en el sistema de transmisión de Guatemala.

No se han establecido cuáles son las tareas de mantenimiento óptimas para los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala.

Los programas actuales de mantenimiento se aplican por igual a todos los transformadores sin importar la condición real de cada uno.

No se han establecido cuáles son los beneficios económicos de realizar un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala.

#### **3.4. Delimitación del problema**

El estudio será realizado en el área central de la ciudad de Guatemala, del municipio de Guatemala, durante los meses de enero a julio del año 2022, se hará una revisión de la documentación y resultados de las pruebas realizadas a los transformadores de potencia durante los tres años que anteceden a la elaboración del estudio.

#### **3.5. Pregunta principal de investigación**

Una vez identificado la problemática que da origen a la presentación del protocolo de investigación se plantean las inquietudes que deben resolverse con la solución planteada.

¿Qué debe realizarse para obtener una reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala?

#### **3.6. Preguntas complementarias de investigación**

Para complementar la pregunta principal se plantea una serie de preguntas secundarias que ayudan a resolver los problemas identificados:

- ¿Cuál es el índice de salud de los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala?
- ¿Cuáles son los transformadores de potencia con más de treinta años de operación con base en la probabilidad de falla y el factor de consecuencia que representan en el sistema de transmisión de Guatemala?
- ¿Cuáles son las tareas de mantenimiento óptimas para los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala?
- ¿Cuáles son los beneficios económicos de realizar un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala?

### **3.7. Localización del área o lugar en estudio**

El área en estudio está localizada en la región central del departamento de Guatemala, Guatemala. Los transformadores se encuentran instalados en la ciudad de Guatemala.

Figura 1. **Localización de área en estudio**

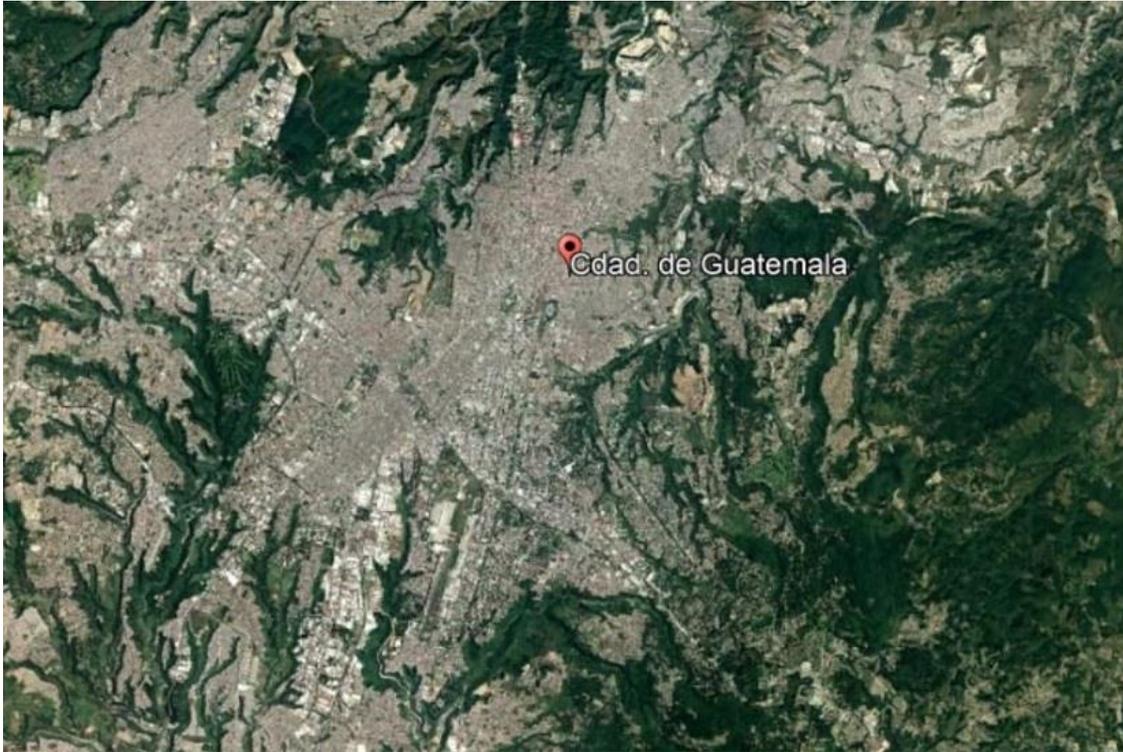


Fuente: Google Earth Pro (2020). *Localización*. Consultado el 29 de octubre de 2021.  
Recuperado de Landsat/Copernicus 2020 INEGI.

### **3.8. Ubicación de área en estudio**

El área de estudio se encuentra ubicada en la región central de ciudad de Guatemala, a una altura de 1500 metros sobre el nivel del mar, con una latitud de 14° 37' 15" N, y longitud de 90° 31' 36" oeste.

Figura 2. **Ubicación de área en estudio**



Fuente: Google Earth Pro (2020). *Ubicación*. Consultado el 29 de octubre de 2020. Recuperado de Lansat/Copernicus 2020 INEGI.

## **4. JUSTIFICACIÓN**

La optimización de los planes de mantenimiento y consecuentemente la reducción de los costos destinados para esta tarea son retos que se presentan día a día en las empresas responsables de manejar activos.

El transformador es el equipo principal de las subestaciones eléctricas y por consiguiente la gestión del mantenimiento deberá enfocarse en este. El estudio se enfocará en los transformadores envejecidos que se acercan al final de su vida útil.

Este trabajo permitirá hacer una clasificación de los transformadores objeto de análisis, con base en el índice de riesgo que cada uno representa para el sistema de transmisión de energía eléctrica en Guatemala.

Con base en la clasificación de los equipos se presentará un plan de mantenimiento optimizado para cada transformador, que permitirá a la gerencia de mantenimiento de los activos tomar decisiones de como invertir los recursos de manera óptima.

Enfocarse en el análisis de transformadores envejecidos hace la diferencia en el estudio planteado, obtener el estado de estos equipos que ya se acercan al final de su vida útil marcará una referencia de cómo deben mantenerse los activos en esta etapa.



## 5. OBJETIVOS

### General

Realizar un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala.

### Específicos

- Determinar cuál es el índice de salud de los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala.
- Clasificar cuáles son los transformadores de potencia con más de treinta años de operación con base en la probabilidad de falla y el factor de consecuencia que representan en el sistema de transmisión de Guatemala.
- Establecer cuáles son las tareas de mantenimiento óptimas para los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala.
- Establecer cuáles son los beneficios económicos de realizar un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala.



## **6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN**

Este trabajo pretende determinar el índice de riesgo para transformadores de potencia envejecidos que se encuentran en operación. Una vez establecido el índice de riesgo se hará una clasificación de los activos y se determinarán las tareas de mantenimiento óptimas para cada unidad de acuerdo con del estado de cada uno.



## **7. MARCO TEÓRICO**

Este capítulo está dirigido a presentar la base teórica para dar a conocer el fundamento del conocimiento en materia del mantenimiento de los transformadores de potencia, enfocándose en el índice de salud de los activos envejecidos.

### **7.1. El sistema de transmisión**

La Ley General de Electricidad define el sistema de transmisión como: “Conjunto de subestaciones de transformación y líneas de transmisión, entre el punto de entrega del generador y el punto de recepción del distribuidor” (Ley general de electricidad, 1996, p.6).

De acuerdo con la definición de un sistema de transmisión podemos concluir que las líneas de transmisión transportan la electricidad desde los centros de generación hasta las subestaciones donde los voltajes son adecuados para que puedan ser distribuidos en aprovechados por la sociedad.

#### **7.1.1. Componentes de un sistema de transmisión**

Los sistemas de transmisión están conformados principalmente por subestaciones y líneas de transmisión.

### **7.1.2. Subestaciones eléctricas**

Una subestación eléctrica es un conjunto de dispositivos adecuados de tal manera que su función principal es la de transformar las tensiones y corrientes de unos valores adecuados para la transmisión de energía eléctrica a otros adecuados para su distribución.

### **7.1.3. Líneas de transmisión**

Las líneas de transmisión son redes que se extienden de los centros de generación hasta las subestaciones, típicamente conformadas por estructuras de soporte, conductores y aisladores. Según lo indicado por Siguí (2018) la energía es transportada por las líneas de transmisión desde los centros de generación hasta los centros de distribución donde queda disponible para el aprovechamiento de los usuarios.

## **7.2. Transformador de potencia**

El transformador de potencia es el equipo principal de las subestaciones eléctricas, es el encargado de transformar los voltajes y corrientes a diferentes niveles. De acuerdo con Páez (2018), “los transformadores de potencia permiten originar varios niveles de voltaje, a través del sistema, por razones económicas, técnicas y de eficiencia no es correcto transportar la energía a grandes distancias en un nivel de voltaje bajo” (p. 41).

Loaiza (2019) indica que “el transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, por medio de interacción electromagnética” (p. 6).

También Haya (2015), define el transformador de potencia como:

El dispositivo encargado de aumentar o reducir la tensión alterna se denomina transformador. Es una máquina estática que resulta muy fiable y alcanza rendimientos cercanos al 100 %. Constructivamente es una máquina muy sencilla, básicamente son dos conductores eléctricos, primario y secundario, enrollados alrededor de un núcleo de hierro. Su funcionamiento se basa en la inducción electromagnética creada entre ambas bobinas, que permite transformar la energía eléctrica de un sistema de tensión-corriente, en otro sistema de tensión-corriente de diferente magnitud y misma frecuencia. (p. 5)

Por otro lado, Dardón (2018), indica que “los transformadores de potencia son máquinas que no tienen partes en movimiento, pero si oscilando como consecuencia de la atracción-repulsión dada la alternancia de polaridad” (p. 35). Conforme a lo indicado anteriormente por el ingeniero Dardón, la eficiencia de un transformador de potencia radica principalmente en que no cuenta con elementos en movimiento.

### **7.2.1. Ciclo de vida del transformador de potencia**

Como lo afirman Cerón, Orduña, Aponte y Romero (2015) el transformador de potencia es un activo que se ve afectado por el paso del tiempo y que su vida útil podría estar por los 40 años. También indica que: “durante el ciclo de vida del transformador de potencia se pueden realizar algunas acciones cómo: “adquirir”, “mantener”, “reparar”, “reubicar”, “desechar”, “reemplazar” o “no hacer nada” (p. 101).

Como se explica en la cita anterior, todo transformador de potencia está al margen de los elementos y se espera que después de un tiempo llegue al final de su vida útil, durante estas fases se debe aplicar el mantenimiento adecuado.

### **7.2.2. Envejecimiento del transformador de potencia**

El transformador de potencia está sometido a múltiples factores que aportan a su envejecimiento, como lo indican Manassero, *et al.* (2015) “La reducción de la vida útil del aislante en los transformadores se ve afectada por varios factores, a saber: sobretensiones, cortocircuitos, la carga y sobrecarga a la cual los transformadores son sometidos” (p. 159).

Por su parte, Carcedo (2015) en su estudio se refiere a los componentes principales de los transformadores de potencia e indica al respecto que:

La práctica totalidad de los transformadores de potencia que están en funcionamiento hoy en día utilizan papel como dieléctrico, así como aceite, que se utiliza también como refrigerante. El papel, compuesto principalmente por celulosa, es sensible a la temperatura de tal manera que su ritmo de envejecimiento se ve notablemente afectado por ésta, en el sentido de que su tasa de degradación se incrementa al aumentar aquélla. Desde el punto de vista del mantenimiento de un transformador, puede afirmarse que el tiempo de vida de éste está limitado por la durabilidad del papel dieléctrico que contiene. (p. 35)

### **7.3. Mantenimiento del transformador de potencia**

De acuerdo con CIGRE (2011) el mantenimiento del transformador de potencia tiene un impacto fundamental en la confiabilidad y vida útil del equipo.

#### **7.3.1. Normas de referencia**

En este apartado se presenta un listado de estándares que sirven como guía para realizar el mantenimiento de los transformadores, estándares desarrollados a nivel internacional y que son utilizados como referencia en Guatemala.

#### **7.3.2. Estrategias de mantenimiento**

CIGRE (2011) define los tipos de mantenimiento para los transformadores de potencia de la siguiente manera:

- Monitoreo de condición
- Mantenimiento basado en tiempo y monitoreo de condición basada en tiempo
- Mantenimiento basado en condición
- Mantenimiento correctivo
- Monitoreo continuo en línea

##### **7.3.2.1. Monitoreo de condición**

Altmann (2007) indica que el monitoreo de condición “se enfoca a los efectos o síntomas de las fallas utilizando distintas técnicas para monitorear el performance de un equipo” (p. 3). Se debe realizar una medición y seguimiento

de ciertos parámetros físicos que permiten anticiparse a una falla, para un transformador podemos definir las siguientes actividades como parte del monitoreo de condición:

- Inspección visual
- Ruidos anormales
- Vibraciones
- Temperatura
- Termografía infrarroja
- Ensayos fisicoquímicos
- Análisis de gases disueltos en el aceite
- Pruebas eléctricas

Como señala Martínez (2014), la importancia del monitoreo de condición consiste en que permite identificar síntomas del deterioro de los elementos, principalmente en activos que cuentan con una edad avanzada de operación, al aplicar adecuadamente las técnicas del monitoreo de condición se pueden evitar fallas y detectar alertas tempranas.

#### **7.3.2.2. Mantenimiento basado en tiempo**

Se basa en planes de mantenimiento que son ejecutados en periodos de tiempo establecidos, típicamente el mantenimiento de los transformadores se hace cada año y consiste en una serie de pruebas eléctricas, limpieza de los aislamientos, prueba de funcionamiento de los accesorios e inspección visual.

### **7.3.2.3. Mantenimiento basado en condición**

El mantenimiento basado en condición consiste en identificar las necesidades que motivan la intervención de un equipo. Para este tipo de mantenimiento se consigna información de los parámetros observados en el monitoreo de condición y de los resultados de las pruebas realizadas en el mantenimiento basado en tiempo y al observar un cambio en el comportamiento de una de las variables se busca su aplicabilidad.

Según Ellis (2008), el mantenimiento basado en condición requiere de un amplio conocimiento sobre las tasas y modos de falla, conocer la criticidad de los activos y los beneficios que puedan obtenerse de la estrategia de mantenimiento a implementar.

### **7.3.2.4. Mantenimiento correctivo**

Primero, Díaz, García y González (2015) indican que el mantenimiento correctivo son las tareas que se ejecutan sobre un equipo bajo falla para regresarlo a su estado operativo, es un tipo de mantenimiento que no obedece ningún tipo de planificación y su ejecución depende del reporte del personal.

Colindres (2019) indica que el mantenimiento correctivo es aquel que: “consiste en la reparación que se ejecuta en el momento que se produce una falla, ocasionando que los equipos queden fuera de operación” (p. 11). Es decir, los equipos se ponen en operación y hasta que dejan de cumplir con su función se hacen las correcciones que permitan continuar con la operación.

Por su parte Acevedo (2019) indica que el mantenimiento correctivo “es aquel que sirve para corregir los problemas que se van presentando en los

equipos a medida que los usuarios los van reportando” (p. 3). De acuerdo con la cita anterior, las fallas se detectan hasta que son inminentes y el mantenimiento consiste en corregir para continuar la operación.

#### **7.3.2.5. Monitoreo continuo en línea**

El monitoreo en línea permite vigilar continuamente los componentes críticos de los transformadores, garantiza una fuente de datos confiable que permite analizar las tendencias y puede detectar de manera temprana una falla y actuar con las tareas de mantenimiento necesarias.

#### **7.4. Índice de salud**

Ramírez (2018), define el índice de salud de la siguiente manera:

Los índices de salud son la base para evaluar la salud global y se basan en la identificación de los modos de falla de los activos y sus subsistemas para desarrollar medidas de degradación generalizada o degradación de subsistemas claves que pueden llevar al final de la vida del activo. (p. 20)

Por su parte Cerón, *et al.*, (2015) indican que:

El objetivo del índice de salud es presentar un valor objetivo que defina el estado real de salud de los activos. Adicionalmente indican que el índice se puede asignar de la siguiente manera, 0 para transformadores en óptimas condiciones y 1 para transformadores que muestren un deterioro considerable. (p. 108)

De acuerdo con Cerón, *et al.*, Romero, (2015) indican que:

El índice de salud permite a las compañías eléctricas clasificar sus transformadores en: 1) Los que necesitan inversión inmediata para renovación o reemplazo, 2) Los que necesitan renovación o mantenimiento y 3) Los que están en buen estado y no necesitan ninguna acción. (p. 108)

De acuerdo con Cerón *et al.*, (2015), el índice de salud se determina por dos componentes; el factor de consecuencia y la probabilidad de falla, conceptos que se definen a continuación.

#### **7.4.1. Probabilidad de falla**

Cerón *et al.*, (2015) indican que: “la probabilidad de falla evalúa la condición técnica del activo mediante ensayos de diagnóstico, historial de carga, historial de eventos, índice de salud, etc.” (p. 102). Para determinar la probabilidad de falla se analizan los resultados de las pruebas realizadas a los transformadores durante el programa de mantenimientos basado en tiempo.

#### **7.4.2. Factor de consecuencia**

Como lo indican Cerón *et al.*, (2015):

El factor de consecuencia para cada transformador varía según su tamaño y posición en el sistema eléctrico, su carga asociada, etc. Algunas de las variables consideradas para el cálculo de este factor son: costos asociados durante el ciclo de vida (CCV), confiabilidad del sistema, factor

de redundancia, seguridad del sistema e impacto ambiental y seguridad pública. (p. 103)

## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

### 1. INFORMACIÓN GENERAL

#### 1.1. Aspectos generales

##### 1.1.1. Área/departamento/municipio o zona de estudio

#### 1.2. Antecedentes del área de estudio

#### 1.3. Definición del problema

##### 1.3.1. Especificación del problema

##### 1.3.2. Delimitación del problema

##### 1.3.3. Pregunta principal de investigación

##### 1.3.4. Preguntas complementarias de investigación

##### 1.3.5. Necesidades para cubrir por la investigación o proyecto

#### 1.4. Ubicación, área/departamento/municipio o zona de estudio

#### 1.5. Localización del área de estudio

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. El sistema de transmisión

2.1.1. Componentes del sistema de transmisión

2.1.2. Subestaciones eléctricas

2.1.3. Líneas de transmisión

### 2.2. Transformador de potencia

2.2.1. Ciclo de vida del transformador de potencia

2.2.2. Envejecimiento del transformador de potencia

### 2.3. Mantenimiento del transformador de potencia

2.3.1. Normas de referencia

2.3.2. Estrategias de mantenimiento

2.3.2.1. Monitoreo de condición

2.3.2.2. Mantenimiento basado en el tiempo

2.3.2.3. Mantenimiento basado en condición

2.3.2.4. Mantenimiento correctivo

2.3.2.5. Monitoreo continuo en línea

### 2.4. Índice de salud

2.4.1. Probabilidad de falla

2.4.2. Factor de consecuencia

## 3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación o propuesta

3.2. Diseño de la investigación o propuesta

3.3. Enfoque de la investigación o propuesta

3.3.1. Variables

3.4. Universo y población del estudio

3.4.1. Criterios de inclusión

3.4.2. Criterios de exclusión

3.5. Muestreo

- 3.6. Hipótesis
  - 3.7. Métodos de recolección de datos
  - 3.8. Técnicas de recolección de datos
  - 3.9. Instrumentos de recolección de datos
  - 3.10. Procesamiento y análisis de datos
  - 3.11. Límites de la investigación
  - 3.12. Obstáculos
  - 3.13. Aspectos éticos de la investigación
  - 3.14. Autonomía
  - 3.15. Riesgo de la investigación
4. ESTUDIO TÉCNICO
- 4.1. Equipos seleccionados
  - 4.2. Recolección de datos
  - 4.3. Índice de salud
  - 4.4. Probabilidad de falla
  - 4.5. Factor de consecuencia
  - 4.6. Matriz de riesgo
  - 4.7. Clasificación de los transformadores
5. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN
6. DEFINICIÓN DE ESTADO
7. LISTADO DE TAREAS
8. PLAN DE MANTENIMIENTO
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 10. COSTOS Y ANÁLISIS FINANCIERO

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ÁPENDICE

ANEXOS

## **9. METODOLOGÍA**

### **9.1. Tipo de la investigación o propuesta**

Para la elaboración de un plan de mantenimiento de transformadores de potencia envejecidos con base en el índice de salud, se propone una investigación del tipo descriptiva correlacional.

### **9.2. Diseño de la investigación o propuesta**

La investigación será no experimental, se basa en la observación de resultados de pruebas que nos permitan determinar la probabilidad de falla de un transformador, por otro lado, se obtendrá el factor de consecuencia de una falla y finalmente se determinará el índice de salud que permita hacer una clasificación de los transformadores.

### **9.3. Enfoque de la investigación o propuesta**

El enfoque de la investigación será de carácter mixto, se aplicará un enfoque cuantitativo que permita determinar el índice de salud de los transformadores, como resultado del análisis de la probabilidad de falla y del factor de consecuencia; cualitativamente se determinarán las tareas que complementan el plan de mantenimiento.

### 9.3.1. Variables

Las variables estudiadas durante el proceso de esta investigación fueron: Determinar la probabilidad de falla y el factor de consecuencia para que con base en estos pueda determinarse en índice de salud de los transformadores. Una vez determinado el índice de salud, es posible clasificar los transformadores y determinar las tareas de mantenimiento aplicables.

### 9.3.2. Operacionalización de variables

La tabla siguiente contiene las diferentes variables identificadas para llevar a cabo la investigación, se hace una definición de cada una, se dimensionan y se presenta el indicador que represente a cada una.

Tabla I. Operacionalización de variables

Problema	Variable	Definición	Dimensión	Indicador
No se ha realizado un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala.	Plan de mantenimiento	Conjunto de tareas que permiten mantener adecuadamente un activo	Sin Dimensión	Existe/No existe el plan de mantenimiento
No se ha determinado el índice de salud de los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala	Índice de riesgo	Es un indicador que modela la condición de un activo en el sistema que opera	Sin Dimensión	0 -1

Continuación de la tabla I.

No se han clasificado cuáles son los transformadores de potencia con más de treinta años de operación con base en la probabilidad de falla y el factor de consecuencia que representan en el sistema de transmisión de Guatemala	Clasificación de los transformadores	Categorización de los equipos conforme al índice de riesgo	Sin Dimensión	Equipos clasificados/Equipos no clasificados
No se han establecido cuáles son las tareas de mantenimiento óptimas para los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala	Listado de tareas de mantenimiento	Conjunto de tareas que deberán aplicarse a cada transformador de acuerdo con su condición	Sin Dimensión	Existe/No existe el plan de mantenimiento
No se han establecido cuáles son los beneficios económicos de realizar un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala	Beneficio económico	Ahorros económicos que pueden obtenerse al optimizar el plan de mantenimientos	% de ahorro	Porcentaje de ahorro obtenido

Fuente: Solares (2021). *Operacionalización de variables.*

#### 9.4. Universo y población de estudio

Para evaluar el índice de salud de los transformadores de potencia objeto de estudio se analizará la probabilidad de falla y el factor de consecuencia para

los transformadores que actualmente sobrepasan los 30 años en operación y que se mantienen en funcionamiento, se han identificado al menos 10 unidades en esta condición y estos equipos representa el universo y la población que será objeto de estudio.

#### **9.4.1. Criterios de inclusión**

- Transformadores que se encuentran en operación, conectados al sistema de transmisión y que han sido objeto de mantenimiento durante los últimos tres años.
- Transformadores de potencia con capacidad de 14 MVA y tensiones de 69 kV a 13.8 kV que han cumplido al menos 30 años en servicio.

#### **9.4.2. Criterios de exclusión**

- Transformadores que actualmente operan en la red de transmisión y que son propiedad de grandes usuarios y que no se tiene acceso al resultado de las pruebas realizadas.
- Transformadores que se encuentran fuera de servicio por haber llegado al final de su vida útil.

### **9.5. Muestreo**

Los transformadores con 30 o más años de antigüedad, actualmente conforman un parque de al menos 10 unidades; para definir una muestra consistente se va a considerar un error del 5 % y una confianza del 95 %. Con base en lo establecido se considera que se podrá obtener acceso a la información de 95 % de los transformadores y de un 5 % la información pueda no estar

completa o queda la probabilidad de que alguno de los elementos de la población cambie su estado de inclusión y no pueda ser considerado.

Fórmula de muestreo:

$$n = \frac{k^2 * p * q * N}{e^2 * (N - 1) + k^2 * p * q}$$

Donde:

n: tamaño muestra a determinar

p: variabilidad positiva = (0.95)

q: variabilidad negativa = (0.05)

N: tamaño de la población = (10)

e: es el error muestral que se considera = (0.05)

k: constante de nivel de confianza que indica la probabilidad de que los resultados del estudio sean ciertos o no. Los valores de k que más se utilizan y sus respectivos niveles de confianza son:

Tabla II. **Valores k y niveles de confianza**

Nivel de confianza	75 %	80 %	85 %	90 %	95 %	97.5 %	99 %
Valores de k	1.15	1.28	1.44	1.65	1.96	2.24	2.58

Fuente: Hernández. (2012). *Valores k y niveles de confianza*.

$$n = \frac{(1.96)^2 (0.95) (0.05) (10)}{(0.05^2)(10 - 1) + \{(1.96^2)(0.95) (0.05)\}} = \frac{1.825}{0.0225 + 0.182} = 9.9 \cong 9$$

La muestra fue la siguiente:

- Población de transformadores: 10

- Muestra de transformadores: 9
- Mínimo de transformadores aceptado: 8

## **9.6. Hipótesis**

- HO: No se obtendrá un ahorro del 20 % con la optimización del plan de mantenimiento para transformadores envejecidos en el sistema de transmisión de Guatemala.
- HI: Se obtendrá un ahorro del 20 % con la optimización del plan de mantenimiento para transformadores envejecidos en el sistema de transmisión de Guatemala.

## **10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN**

### **10.1. Métodos de recolección de datos**

El método que se utilizará para la recolección de datos será la síntesis de observación y consistirá la recopilación de resultados de pruebas realizadas a los transformadores objeto de estudio durante los últimos tres años.

### **10.2. Técnicas de recolección de datos**

Se recomienda la técnica mixta para recolección de datos, consiste en realizar una observación directa de los informes y toma de resultados en reportes digitales de las pruebas realizadas a los transformadores de potencia.

### **10.3. Instrumentos de recolección de datos**

El instrumento para utilizar y digitalización de los datos en hojas en Excel que permitan ordenar analizar los resultados de las pruebas de los transformadores.

### **10.4. Procesamiento y análisis de datos**

Luego de obtener los resultados de las pruebas realizadas a los transformadores durante los últimos tres años, se hará la tabulación de los datos en Excel.

Una vez tabulados los datos se hará una evaluación de tendencias que permitan realizar una comparación de los resultados, evaluar tendencias y con base en esto determinar la probabilidad de falla de los transformadores.

#### **10.5. Límites de la investigación**

La investigación se limita a evaluar los resultados de las pruebas realizadas durante los mantenimientos de los últimos tres años.

#### **10.6. Obstáculos (riesgos y dificultades)**

Pueden presentarse limitaciones en el tiempo de recolección de información, tener en cuenta que las empresas trabajan en una modalidad de trabajo en casa por la pandemia de la SARS-CoV-2.

#### **10.7. Aspectos éticos de la investigación**

No existen aspectos éticos que comprometan el desarrollo de la investigación, se utilizarán datos de dominio público disponibles.

#### **10.8. Autonomía**

La recolección, evaluación y resultados de la investigación serán realizados por el investigador, se hará referencia a autores de investigaciones previas, se incluyen las referencias de cada autor.

## **10.9. Riesgo de la investigación**

La técnica para recolección de información se realiza mediante la observación de resultados de pruebas realizadas a los transformadores, se considera que el nivel de riesgo es 1 (sin riesgo).



## **11. CRONOGRAMA**

El cronograma es una representación cronológica de las tareas a realizar para conseguir con éxito el informe final.

### **11.1. Descripción detallada del cronograma y sus fases**

En la fase I se realizarán las tareas correspondientes a la consecución de la información de entrada requeridas para el desarrollo del estudio, se documentará la información disponible para cada transformador y se digitalizarán los resultados de las pruebas para facilitar el manejo de los datos.

En la fase II se determinará el índice de riesgo de cada transformador y se hará una clasificación de acuerdo con el índice determinado; para determinar el índice de riesgo es necesario conocer la probabilidad de falla y el factor de consecuencia para cada transformador.

En la fase III, se definirá el plan de mantenimiento propuesto con base en la clasificación de los transformadores que se realizó en la fase anterior.

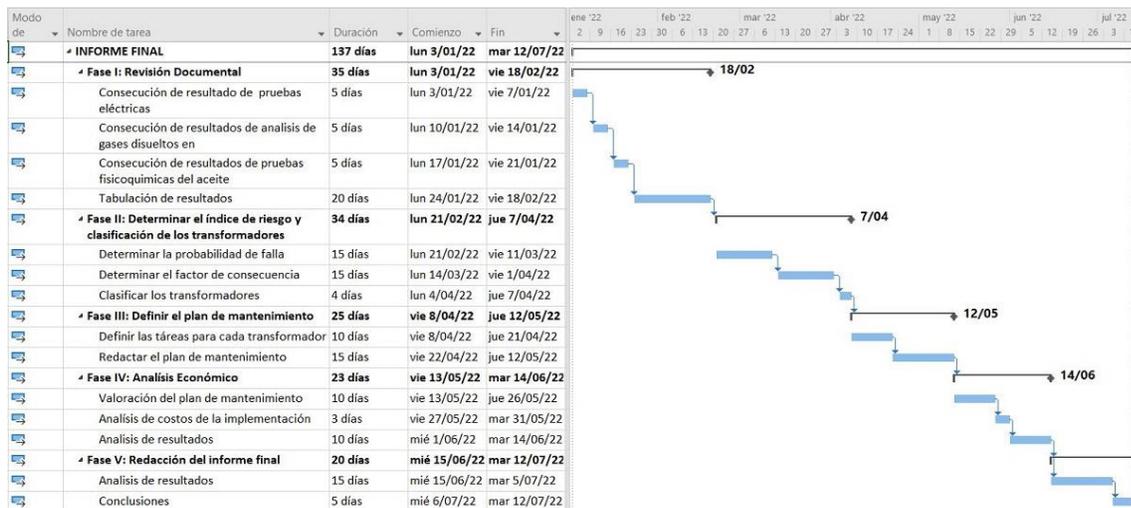
En la fase IV, se realizará el análisis económico y se determinarán las ventajas de tener un plan optimizado para el mantenimiento de cada transformador.

En la fase V, se completará el informe definitivo con las conclusiones del estudio.

## 11.2. Cronograma

El cronograma mostrado a continuación es una representación en el tiempo de la propuesta para desarrollar las diferentes fases del estudio, se hace una programación previsoría del tiempo que pueda tomar cada tarea y se hace una secuencia para la ejecución de estas.

Figura 3. Cronograma



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Project 2016.

## **12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO**

Técnicamente la ejecución del estudio es altamente factible, el investigador cuenta con las herramientas necesarias para el desarrollo de la investigación y se cuenta con acceso a los resultados de las pruebas e información base para determinar el índice de riesgo de los activos.

El investigador dispondrá del tiempo y acceso a los recursos necesarios para desarrollar las fases del estudio, se deberá invertir en recursos consumibles para la elaboración de informes y ensayos, recursos propios como vehículo y computador personal y el tiempo dedicado para el análisis y elaboración de los capítulos que componen la investigación.

El desarrollo de la investigación se visualiza en este punto que no tendrá ningún impacto en el ámbito social, durante el estudio se analizan datos que son resultado de pruebas ejecutadas con anterioridad y que no involucran la interacción de seres humanos.

Para la realización del estudio no será necesario realizar ensayos y por lo tanto no existirán riesgos para el medio ambiente, al no existir afectaciones se visualiza que su elaboración es ambientalmente factible.

### **12.1. Costo del estudio**

Para el desarrollo de la investigación será necesario considerar los costos asociados al investigador, el apoyo externo por parte de un asesor y las

herramientas que serán utilizadas, principalmente computadora personal, gastos de alimentación y traslados y reproducción documental.

Tabla III. **Costos del estudio**

	<b>Materiales</b>	<b>Presupuesto</b>
<b>Humano</b>	Investigador	Q. 17,500.00
	Asesor	Q. 2,500.00
	Computadoras personales	Q. 5,000.00
	Cámara Fotográfica	Q. 2,500.00
	Reproducción de documentos	Q. 500.00
<b>Materiales</b>	Alimentación	Q. 3,000.00
	Traslados	Q. 2,500.00
	1 servicios de telefonía móvil e internet	Q. 1,500.00
	Gastos imprevistos 10 %	Q. 3,500.00
	<b>TOTAL</b>	<b>Q. 38,500.00</b>

Fuente: elaboración propia.

## REFERENCIAS

1. Acevedo, J. (2019). *Gestión de un programa de mantenimiento preventivo para retroexcavadora case 580 de 98 hp, en empresa dedicada a la renta de maquinaria y servicio de la construcción bajo la normativa ISO 9001* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
2. Altmann, C. (2007) *Las técnicas de monitoreo de condición, como herramienta del mantenimiento proactivo*. Buenos Aires, Argentina: Adine.
3. Carcedo, J. (2015). *Aportaciones al estudio del envejecimiento de componentes dieléctricos en transformadores de potencia* (Tesis doctoral). Universidad de Cantabria. España. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=47972>.
4. Cerón, A.; Echeverry, D.; Aponte, G. y Romero, A. (noviembre, 2015). Índice de salud para transformadores de potencia inmersos en aceite mineral con voltajes entre 69 kV y 230 kV usando lógica difusa. *Información Tecnológica*, 26(2), 107-116. Recuperado de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0718-07642015000200013&lng=n&nrm=iso](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-07642015000200013&lng=n&nrm=iso).
5. CIGRE. (2011). *Guide for Transformer Maintenance*. Paris: Autor.

6. Colindres, W. (2019). *Diseño de un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite con aplicación de la norma ISO 4406:17 en la planta de pastas de una mina extractora de plata en Guatemala* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
7. Criollo, A. y Quito, M. (2020). *Desarrollo de una propuesta metodológica para la gestión de activos físicos en la planta de Continental Tire Andina* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19104>.
8. Dardón, A. (2018). *Análisis de riesgo de falla en transformadores eléctricos de potencia utilizando tecnologías de mantenimiento predictivo no intrusivo* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de [www.repositorio.usac.edu.gt](http://www.repositorio.usac.edu.gt).
9. Dardón, A. (2018). *Análisis de riesgo de falla en transformadores eléctricos de potencia utilizando tecnologías de mantenimiento predictivo no intrusivo* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
10. Decreto 93-96. Ley General de Electricidad. Diario de Centro América. Guatemala. 15 de noviembre de 1996.

11. Ellis, B. (noviembre, 2008). Condition Based Maintenance. *TJP*. 1-5. Recuperado de [https://www.academia.edu/5837576/Condition\\_Based\\_Maintenance](https://www.academia.edu/5837576/Condition_Based_Maintenance).
12. Galviz, J.S. (2021). *Metodología de evaluación de riesgos para la identificación de fallas potenciales en redes eléctricas de distribución primarias* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79977>.
13. Geno, K. (2019). *Investigation in to the status of maintenance management system of farm machinery: A case of Wonji-Shoa Sugar State* (Tesis de maestría). Adama Science And Technology University, Ethiopia. Recuperado de <http://213.55.101.23/bitstream/handle/123456789/11118/Kebede%20Lemi%20Geno.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
14. Jiménez, J. (2020). *Propuesta de un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM, a los activos críticos del sistema eléctrico de distribución a nivel de subestaciones, en la empresa Continental Tire Andina S.A.* (Tesis de maestría). Universidad del Azuay, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9963>.

15. Loaiza, S. (2019). *Análisis de la degradación de los componentes pasivos de un transformador de potencia de 10 MVA, con el fin de prolongar su vida útil, considerando su impacto al medio ambiente.* (Tesis de licenciatura). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/12529>.
16. Manassero, U.; Zóttico, A.; Furlani, R.; Torres, J. y Acosta, J. (septiembre,2015). Envejecimiento de la aislación eléctrica en transformadores de potencia. Desarrollo de un algoritmo de cálculo según guías de carga IRAM 2473 e IEEE C57. 91-2022. 4° *Simposio argentino de Informática Industrial.* Simposio llevado a cabo en Argentina.
17. Martínez, L. (2014). *Metodología para la definición de tareas de mantenimiento basado en confiabilidad, condición y riesgo aplicada a equipos del sistema de transmisión nacional* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51759>.
18. Olgúin, P. (2018). *Propuesta de implementación de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), en el Gran Hotel Xalapa* (Tesis de maestría). Universidad Veracruzana, México. Recuperado de <https://1library.co/document/y6jp0g4q-propuesta-implementacion-mantenimiento-centrado-confiabilidad-gran-hotel-xalapa.html>.

19. Ortiz, D. (2020). *Modelo de gestión del mantenimiento para empresas distribuidoras de energía eléctrica, utilizando estrategias basadas en la confiabilidad y en los riesgos de los componentes asociados a las redes de distribución* (Tesis de maestría). Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20947>.
20. Páez, O. (2018). *Coordinación de protecciones eléctricas de transformadores de una planta cementera* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
21. Primero, D.; Diaz, J.; García, L. y González, A. (diciembre, 2015). Manual para la gestión del mantenimiento correctivo de equipos biomédicos en la fundación valle del Lili. *Revista Ingeniería Biomédica*, 9(18), 81-87. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rinbi/v9n18/v9n18a21.pdf>.
22. Ramírez, A. (2018). *Evaluación de la salud de activos de los transformadores de potencia de las subestaciones de área metropolitana del valle de Aburrá* (Tesis de maestría). Universidad EAFIT, Colombia. Recuperado de <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/13031>.
23. Siguí, A. (2018). *Análisis técnico y económico del plan de expansión del sistema de transporte y su impacto en la calidad del servicio de distribución, de las redes de 69 kV de la ciudad de Guatemala* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

24. Tejaxún, C. (2019). *Desarrollo de un modelo de gestión de mantenimiento a través del monitoreo de condición, utilizando ensayos no destructivos, bajo la norma ISO 17359:2011 para la conservación de equipos críticos, en la industria avícola* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

## APÉNDICES

En el apéndice uno se presenta la matriz de consistencia, herramienta base para la formulación del protocolo de investigación desarrollado.

### Apéndice 1. Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Preguntas de investigación	Metodología	Fase final
1. Problema principal <ul style="list-style-type: none"> <li>No se ha realizado un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala</li> </ul>	1. Objetivo General <ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala</li> </ul>	1. Pregunta principal de investigación <ul style="list-style-type: none"> <li>¿Qué debe realizarse para obtener una reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala?</li> </ul>	Tipo de investigación: Descriptiva correlacional Nivel de Investigación: Nivel 1 Metodología de investigación: Exploratoria Población: Transformadores con más de 30 años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala	1. Conclusión General <ul style="list-style-type: none"> <li>Realizado un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala, se ha determinado lo siguiente:</li> </ul>

## Continuación del apéndice 1.

2. Problemas Secundarios	2. Objetivos Específicos	2. Preguntas complementarias de investigación		2. Conclusiones específicas
<ul style="list-style-type: none"> <li>No se ha determinado el índice de salud de los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala.</li> <li>No se han identificado cuáles son los transformadores de potencia con más de treinta años de operación con base en la probabilidad de falla y el factor de consecuencia que representan en el sistema de transmisión de Guatemala.</li> <li>No se han establecido cuáles son las tareas de mantenimiento óptimas para los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala.</li> <li>No se han establecido cuáles son los beneficios económicos de realizar un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determinar cuál es el índice de salud de los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala.</li> <li>Identificar cuáles son los transformadores de potencia con más de treinta años de operación con base en la probabilidad de falla y el factor de consecuencia que representan en el sistema de transmisión de Guatemala.</li> <li>Establecer cuáles son las tareas de mantenimiento óptimas para los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala.</li> <li>Establecer cuáles son los beneficios económicos de realizar un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>¿Cuál es el índice de salud de los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala?</li> <li>¿Cuáles son los transformadores de potencia con más de treinta años de operación con base en la probabilidad de falla y el factor de consecuencia que representan en el sistema de transmisión de Guatemala?</li> <li>¿Cuáles son las tareas de mantenimiento óptimas para los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala?</li> <li>¿Cuáles son los beneficios económicos de realizar un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala?</li> </ul>	<p>Muestra: 9 transformadores que ya sobrepasaron los 30 años en servicio</p> <p>Instrumento: Matriz de riesgo</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El índice de salud de los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala es:</li> <li>Los transformadores de potencia identificados con más de treinta años de operación con base en la probabilidad de falla y el factor de consecuencia que representan en el sistema de transmisión de Guatemala son:</li> <li>Las tareas de mantenimiento óptimas para los transformadores de potencia con más de treinta años de operación en el sistema de transmisión de Guatemala son</li> <li>Los beneficios económicos de realizar un plan de mantenimiento optimizado con base en el índice de salud para la reducción de costos en la gestión de transformadores de potencia con más de treinta años en operación en el sistema de transmisión de Guatemala son</li> </ul>

## Continuación de apéndice 1.

---

### 3. Hipótesis

#### Positiva:

Se obtendrá un 20 % de ahorro con la optimización del plan de mantenimiento para transformadores envejecidos en el sistema de transmisión de Guatemala.

#### Negativa:

No se obtendrá un 20 % ahorro alguno con la optimización del plan de mantenimiento para transformadores envejecidos en el sistema de transmisión de Guatemala.

---

Fuente: elaboración propia.

