



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA DE
TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN LA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE
ELECTRICIDAD OCCIDENTE, S.A.**

Rene Adolfo Monzón López

Asesorado por el M.A. Ing. Edson Omar Mazariegos Marcial

Guatemala, febrero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA DE
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EN LA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE
ELECTRICIDAD OCCIDENTE, S.A**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RENÉ ADOLFO MONZÓN LÓPEZ

ASESORADO POR EL M.A. ING. EDSON OMAR MAZARIEGOS MARCIAL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2023

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 Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonzo Rivera Castillo
EXAMINADOR	Ing. Marvin Mariano Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera

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 PARA EL ANALISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA
DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN LA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE
ELECTRICIDAD OCCIDENTE, S.A**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Posgrado con fecha 15 de noviembre 2022.

René Adolfo Monzón López



EEPFI-PP-1688-2022

Guatemala, 9 de noviembre de 2022

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingeniería Mecanica Electrica
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 PARA ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN LA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE ELECTRICIDAD OCCIDENTE S.A.**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Proyectos de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en un mercado eléctrico regulado. - Ingeniería de la confiabilidad y riesgo**, presentado por el estudiante **René Adolfo Monzón López** carné número **201122985**, 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 Gestion De Mercados Electricos Regulados.

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"

Mtro. Edson Omar Mazariegos Marcial
Asesor(a)

Edson Omar Mazariegos Marcial
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 18816

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría



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





EEP-EIME-1413-2022

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 PARA ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN LA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE ELECTRICIDAD OCCIDENTE S.A.**, presentado por el estudiante universitario **René Adolfo Monzón López**, 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

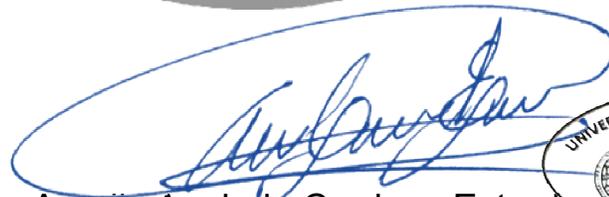
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, noviembre de 2022

LNG.DECANATO.OI.179.2023

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 PARA EL ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN LA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE ELECTRICIDAD OCCIDENTE, S.A.**, presentado por: **Rene Adolfo Monzón López**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabeia Cordova Estrada

Decana



Guatemala, febrero de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme permitido realizar una más de mis metas.
Mis padres	Por haberme traído al mundo y guiado a través de él, mi eterno agradecimiento por su apoyo para hacer realidad este sueño.
Mis hermanos	Luis, Gabriela y Emily Monzón López, por su apoyo y compañía durante mi vida.
Mi abuelo	Reinerio López, por siempre motivarme a continuar con mis estudios universitarios.
Esposa e hija	Angélica y Samira Monzón por ser mi mayor motivación en la etapa final de mi carrera universitaria.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el alma <i>mater</i> que me permitió nutrirme de conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
ENERGUATE	Por haberme brindado la información necesaria para realizar este diseño de investigación.
Mis amigos	Por haberme acompañado durante la carrera.
Mi asesor	M.A. Ing. Edson Omar Mazariegos Marcial, por su valioso apoyo en esta investigación.
Familia y amigos en general	Por brindarme su apoyo incondicional en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Contexto general	7
3.2. Descripción del problema	8
3.3. Formulación del problema	9
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Transformador de distribución monofásico.....	17
7.1.1. Aspectos constructivos	18

7.1.2.	Núcleo	19
7.1.3.	Bobinas	19
7.1.4.	Sistema de aislamiento	20
7.1.5.	Aceite dieléctrico	20
7.1.6.	Accesorios.....	20
	7.1.6.1. Bushing AT.....	21
	7.1.6.2. Bushing de BT.....	21
	7.1.6.3. Válvula de sobrepresión	21
	7.1.6.4. Luz indicadora de sobrecarga	22
	7.1.6.5. Cambiador de derivaciones (TAP)	22
7.2.	Transformador convencional S	22
7.3.	Transformador Autoprotegido CP	23
7.4.	Protecciones de transformadores monofásicos	24
	7.4.1. Descargador de sobretensiones (pararrayo)	24
	7.4.2. Fusible.....	26
	7.4.3. Sistema de puesta a tierra.....	27
7.5.	Tipos de fallas en transformadores monofásicos	28
	7.5.1. Fallas por sobretensión	29
	7.5.2. Fallas por sobrecarga.....	29
	7.5.3. Fallas por cortocircuitos externos.....	30
7.6.	Ingeniería de la calidad	30
	7.6.1. Confiabilidad.....	31
7.7.	Análisis de modo y efecto de falla.....	31
	7.7.1. Objetivos del análisis de modo y efecto de falla.....	32
	7.7.2. Índice de prioridad de riesgo	32
7.8.	Análisis de criticidad.....	33
7.9.	Diagrama de causa y efecto.....	35
7.10.	Mantenimiento.....	36
	7.10.1. Mantenimiento productivo total.....	36

8.	ÍNDICE PROPUESTO.....	37
9.	METODOLOGIA.....	41
9.1.	Características del estudio	41
9.1.1.	Diseño	41
9.1.2.	Enfoque	41
9.1.3.	Alcance.....	42
9.2.	Unidad de análisis	42
9.3.	Variables.....	43
9.4.	Fases del desarrollo de la investigación	45
9.4.1.	Fase 1: revisión documental.....	45
9.4.2.	Fase 2: recopilación de informes de incidencias por falla en transformadores monofásicos.....	46
9.4.3.	Fase 3: análisis cuantitativo y estadística descriptiva.	46
9.4.4.	Fase 4: identificación de fallas recurrentes y críticas	47
9.5.	Resultados esperados.....	47
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	49
10.1.	Herramientas estadísticas	49
11.	CRONOGRAMA.....	51
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	53
13.	REFERENCIAS.....	55
14.	APÉNDICES.....	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de solución	16
2.	Transformador monofásico de distribución.....	18
3.	Transformador tipo S y CP	23
4.	Pararrayos de distribución.....	26
5.	Base y tubo porta fusible	27
6.	Sistema de puesta a tierra Carson	28
7.	Matriz de criticidad	34
8.	Ejemplo de diagrama de Causa – Efecto	35

TABLAS

I.	Clasificación de variables No. 1	43
II.	Clasificación de variables No. 2	44
III.	Clasificación de variables No. 3	44
IV.	Clasificación de variables.....	45
V.	Cronograma de actividades	51
VI.	Presupuesto de la investigación.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Hz	Hercio
KΩ	Kilo ohms
KV	Kilo volts.
KVA	Kilo volts ampere
KVA	Kilo voltio amperios
KVAR	Kilo voltios amperios reactivos
KW	Kilovatio
KV	Kilovoltio
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
MW	Mega Watts
P	Potencia
%	Porcentaje
Kva (Q)	Potencia aparente
kVAR (S)	Potencia reactiva
kW (P)	Potencia real

GLOSARIO

Aislante	Material cuyas cargas eléctricas internas tienen movilidad nula.
AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
Análisis de falla	Procedimiento que permite determinar la posible causa raíz de la falla de un elemento, componente o equipo industria.
Apartarrayos	Dispositivo protector para limitar el sobre voltaje producido por una descarga atmosférica en la red.
Conductor	Material que ofrece poca resistencia al movimiento de carga eléctrica.
COR	Centro de operación de ENERGUATE.
Corriente alterna	Corriente eléctrica que varía su amplitud en función del tiempo.
Corriente eléctrica	Flujo de electrones que es generado por un campo eléctrico.

Cortocircuito	Falla de baja impedancia entre dos puntos de potencial diferente el cual produce esfuerzos electrodinámicos y térmicos.
Demanda eléctrica	Cantidad de energía eléctrica que se necesita para abastecer una comunidad.
DEOCSA	Distribuidora de Electricidad de Oriente, Sociedad Anónima.
DEORSA	Distribuidora de Electricidad de Oriente Sociedad Anónima.
Dialectico	Material que posee baja conductividad eléctrica.
Energía cinética	Energía debida a un movimiento determinado.
Energía potencial	Energía que contiene el agua debido a la altura y es aprovechable para generar electricidad a partir de la misma.
<i>Flicker</i>	Fenómeno de variación de la intensidad luminosa que afecta la visión humana, principalmente en el rango de frecuencias de 0 a 25 Hz.
Impedancia	Resistencia que se genera en un circuito de corriente alterna.

Incidencia	Frecuencia con la que se presenta una condición específica.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación.
Potencia eléctrica	Cantidad de energía entregada o absorbida por un circuito eléctrico.
Puesta a tierra	Conexión de baja impedancia a un potencial cero, para drenar sobre corrientes de falla en la red.
SAT	Superintendencia de Administración Tributaria.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
Sobrecarga	Se dice que en un circuito o instalación hay sobrecarga o está sobrecargada, cuando la suma de la potencia de los aparatos que están a él conectados, es superior a la potencia para la cual está diseñado el circuito de la instalación.
Sobretensión	Aumento de tensión capaz de poner en peligro el material o el buen servicio de una instalación eléctrica.
Spot	Costo del MWh en Guatemala.
Tap central	Selector mecánico que le sobrepone al bobinado primario un número de espiras para variar la tensión de salida en un transformador.

Tensión	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en Voltios.
Transformador	Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico.
Vatio	Unidad de medida de potencia.

RESUMEN

En redes de distribución de energía, la falla del transformador eléctrico afecta la continuidad del servicio para los usuarios, estas se deben a diversas circunstancias y condiciones en las que operan, tales como sobrecargas, sobretensiones y corto circuito; las condiciones de falla son causadas por sobredimensionamiento de la capacidad del transformador, descargas atmosféricas y maniobras inadecuadas.

En la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A se tiene una alta tasa de falla en transformadores, el alto costo económico de este activo y las constantes interrupciones del servicio que este problema genera, hacen necesario implementar una metodología de confiabilidad para la reducción de transformadores dañados y mejorar la calidad del servicio.

La finalidad del presente trabajo es realizar un análisis de modo y efecto de falla, en transformadores monofásicos que han sido desmontados de la red de media tensión de la empresa DEOCSA, con el propósito de identificar las circunstancias y condiciones con la que estas incidencias ocurren, para mejorar los criterios técnicos de instalación y planes de mantenimiento.

La importancia de reducir la tasa de falla en transformadores es el alto costo económico que implica la sustitución de este equipo de la red de distribución, también reducir las interrupciones que provocan estas fallas en el suministro de energía sería de beneficio para el usuario final.

1. INTRODUCCIÓN

La red de distribución de media tensión es el medio necesario para que la energía eléctrica llegue al usuario final, esto con la ayuda del transformador monofásico, debido a esto es importante que una empresa de distribución eléctrica garantice el óptimo funcionamiento de este equipo y los elementos que lo conforman.

Las diferentes metodologías de confiabilidad han contribuido a la mejora de operaciones en diferentes sistemas y procesos, ya que con estos se pueden detectar malas prácticas técnicas y deficiencias en los planes de mantenimiento, debido a esto hoy en día se está implementando esta herramienta en diferentes industrias.

Actualmente la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A, tiene una alta tasa de falla en transformadores monofásicos instalados en la red de media tensión, los altos costos de este equipo y la intermitencia en el servicio que provoca este problema, crean la necesidad de tomar acciones que ayuden a disminuir este tipo de incidentes.

El análisis de modo y efecto de falla es una metodología que tiene como objetivo identificar los modos de falla que representan un mayor riesgo para posteriormente seleccionar la mejor tarea de mantenimiento a utilizar, ya sea preventiva predictiva o correctiva.

El propósito de este trabajo es realizar un análisis de modo y efecto de falla, en transformadores que han sido desmontados de la red de distribución de la empresa DEOCSA, por mal funcionamiento, para identificar las causas raíz de estos incidentes y así poder establecer criterios técnicos adecuados de instalación, reforzar la coordinación de protecciones eléctricas y mejorar los planes de mantenimiento.

En el primer capítulo se presentan los estudios previos que muestran la importancia de realizar investigaciones asociadas a temas de análisis de confiabilidad en sistemas eléctricos. En el segundo capítulo se muestran los conceptos asociados a la investigación a través del marco teórico, en el que se refuerza la teoría de transformadores eléctricos y análisis de modo y efecto de falla. Por último, se analiza la metodología a seguir para realizar la investigación y se establecen las técnicas de estudio que se utilizará para el análisis de la información.

2. ANTECEDENTES

Debido a la importancia que representa disminuir las interrupciones en el servicio de energía eléctrica para el usuario final, diversos investigadores han realizado valiosas investigaciones y publicaciones, con lo que se ha logrado contribuir al análisis de las causas que provocan estos eventos, con el objetivo de mejorar los criterios de diseño de instalación y planes de mantenimiento.

Holguin y Villacob (2017) desarrollaron un modelo para evaluar el índice de fallas en transformadores de distribución instalados en la ciudad de Barranquilla Colombia, con lo que se logró identificar que las principales causas de falla se deben a sobrecargas, sobretensiones y sobre corrientes, para lo cual se propuso mejoras en los criterios técnicos de dimensionamiento en la instalación.

Energética Hoy (2021) realizó una publicación en la que se analizó la curva de bañera en diferentes transformadores, para lo cual se determinó que la tasa de falla aumenta después de los 35 a 40 años de uso, y para los 60 años casi es del 100 %; esto se debe a la superación de la vida prevista, por lo que se concluyó que la edad de los equipos tiene una influencia importante en las fallas.

Según Montané, Dorrbercker y Castillo (2019) es imposible que se pueda predecir con certeza el momento en el cual un transformador fallará, sin embargo, si se logra cuantificar adecuadamente el valor remanente de algunas propiedades aislantes del equipo, tales como la rigidez mecánica, fatigas operacionales entre otras, sería posible determinar el momento en el cual las circunstancias sean tales que una falla pueda ocurrir.

Una de las principales causas de fallas en transformadores de distribución, son las descargas atmosféricas, Huancollo (2018) propuso una guía para determinar las fallas en transformadores de distribución, esta consiste en una inspección visual tanto externa como interna, se clasificó las fallas en descargas atmosféricas, cortocircuito externo y cortocircuito interno, para la muestra utilizada se definió que, en los meses de lluvia se sufre un crecimiento considerable en la tasa de fallas en transformadores de distribución, por lo que se recomendó optimizar las protecciones de puesta a tierra.

Otro importante hallazgo es el trabajo de investigación realizado por Mago, Valles, Olaya, Espejo, Arango y Sierra (2017) en que se analizó un grupo de transformadores desmontados por falla, para el cual se incorporó el cálculo de pérdidas totales en el núcleo de los transformadores, se determinó que hay cambios en la calidad térmica de la chapa en el momento de una falla por arco eléctrico, por lo que no es recomendable la reutilización de estos.

Ramos (2014) realizó una investigación en el que aplicó métodos estocásticos unificados para la predicción confiable de fallas por condiciones ambientales en transformadores de distribución, se propuso un modelo de detección de fallas incipientes, para lo que se utilizó redundancia analítica, con el objetivo de reducir la tasa de fallas en transformadores monofásicos de distribución.

Se han realizado diferentes propuestas para mejorar los programas de mantenimiento preventivo a través de herramientas de confiabilidad, Chávez (2018) implementó el análisis de confiabilidad para evaluar las diferentes causas de fallas en transformadores, con lo que se logró mejorar los procesos de mantenimiento correctivo, predictivo y preventivo.

Zapata, Cataño y Suarez, (2004) establecieron índices de confiabilidad de transformadores de distribución, se clasificó las causas de falla en transformadores monofásicos de distribución en fallas por sobretensión, fallas por sobre corriente y fallas por maniobras inadecuadas, para esto se realizó un índice de confiabilidad, se determinó que la incidencia con una mayor frecuencia de ocurrencia es la producida por sobre corriente, por lo que se recomendó evaluar los factores de diseño para dimensionamientos de apartarrayos, pararrayos y puestas a tierra.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En redes de distribución de electricidad el daño de un transformador afecta el suministro de energía del servicio para los usuarios, estas se deben condiciones de falla causados por sobredimensionamiento de la capacidad del transformador, descargas atmosféricas y maniobras inadecuadas.

3.1. Contexto general

Entre los elementos que componen el sistema de distribución, está el transformador eléctrico, que es de los más importantes, debido a que hace posible la entrega de energía de la distribuidora eléctrica al usuario final, una falla en este elemento provoca la suspensión del servicio de energía.

Uno de los problemas que afronta el sector eléctrico de Guatemala, es el alto índice de falla en transformadores eléctricos de distribución, principalmente en las zonas rurales, en que se tiene un mayor impacto en el occidente del país, en donde la empresa eléctrica que se ubica con el mayor número de clientes es Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A.

Según información técnica de la red de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A durante el año 2020 se reportó un total de 997 transformadores desmontados por diferentes fallas, propiamente para el año 2021 se reportó un aumento significativo en este rubro, por lo que se registró un total de 1075 transformadores desmontados. Estas fallas fueron causadas por sobretensiones, sobrecargas y corto circuitos, derivado de diferentes condiciones y circunstancias de operación en la red.

El alto costo económico de este activo y la sustitución de un transformador desmontado por falla, genera un gasto considerable para la empresa; también es importante considerar que estas interrupciones en el servicio afectan a la calidad del suministro de energía eléctrica, lo que ocasiona inconformidad en el cliente por no tener un servicio confiable y continuo.

Dicho lo anterior, lograr identificar y analizar las causas que provocan las fallas en transformadores monofásicos podría ayudar a establecer acciones de mantenimiento correctivo y preventivo, también se podría mejorar los criterios técnicos de instalación y dimensionamiento de protecciones; con esto se podría reducir la tasa de falla en transformadores.

3.2. Descripción del problema

Según el historial de incidencias de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A, se reportó un incremento en la tasa de falla entre los años 2020 y 2021, la tendencia de incremento en la frecuencia de ocurrencia de fallas se mantiene durante el presente año 2022, por lo que es necesario con urgencia establecer acciones que puedan mejorar las condiciones y circunstancias de operación del transformador.

- Pregunta central

¿Cómo realizar un análisis modo y efecto de falla en transformadores monofásicos en la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A.?

- Preguntas auxiliares

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuáles son las causas raíz de falla de transformadores eléctricos monofásicos en la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A.?
- ¿Qué nivel de criticidad pueden tener los efectos generados por cada falla posible en transformadores eléctricos monofásicos de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A.?
- ¿Cuál es el índice de prioridad de riesgo en transformadores monofásicos de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A.?

3.3. Formulación del problema

El análisis de modo y efecto de falla en transformadores monofásicos de distribución se contextualizó en el ámbito de los escenarios de interrupción del servicio de energía eléctrica por fallas en transformadores. Lo mencionado involucra a diversas variables que influyen directa e indirectamente en la alta tasa de falla de transformadores monofásicos en la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A.

En el presente estudio se utilizará datos del departamento de información técnica de la red de la empresa Distribuidora de Occidente S.A, por lo que la delimitación geográfica se fundamentó en los departamentos de la región occidente de Guatemala.

Para el análisis se usarán los registros históricos de los años 2020 y 2021, de transformadores desmontados por falla, del departamento de información técnica de la red de la empresa Distribuidora de Occidente S.A, el estudio será el primero de esta índole dentro de la empresa.

4. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio se justifica en la línea de investigación de ingeniería de la confiabilidad y riesgo de la Maestría en Gestión de Mercados eléctricos Regulados. Con esta investigación se aportará con reducir el índice de falla en transformadores eléctricos monofásicos en la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A, por medio de un estudio de confiabilidad con base los criterios de causa raíz, criticidad y modo de falla lo que permitirá establecer criterios técnicos adecuados de instalación y dimensionamiento de protecciones, también hacer mejoras en los planes de mantenimiento preventivo y correctivo.

Con esta investigación se podrá reducir los altos costos económicos que implica la sustitución de un transformador monofásico dañado de la red de distribución, también se reducirá la frecuencia con las que ocurren estas fallas, y así proveer un servicio de energía eléctrica más confiable y continuo para los usuarios, con lo que se obtendrá una mejora en los indicadores de calidad del servicio eléctrico.

También se beneficiará al medio ambiente, pues se busca un aumento en el tiempo de operación del transformador monofásicos que es un elemento no reutilizable, por lo que establecer acciones para la reducción de tasa de fallas en la empresa Distribuidora de Electricidad de Occidente S.A, prolongaría la vida útil del transformador, con la finalidad de generar un impacto positivo para el entorno ambiental, que hoy en día es de gran importancia.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Realizar un análisis modo y efecto de falla en transformadores monofásicos en la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A.

5.2. Específicos

- Determinar las principales causas de falla en transformadores monofásicos de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A.
- Estimar el nivel de criticidad que pueden tener los efectos generados por cada falla posible en transformadores eléctricos monofásicos de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A
- Calcular el índice de prioridad de riesgo en transformadores monofásicos de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

En base al presente trabajo de investigación se evaluará las causas raíz que provocan los diferentes fallos en transformadores monofásicos en la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A, para mejorar los criterios técnicos de instalación y coordinación de protecciones eléctricas, por medio de la implementación del análisis modo y efecto de falla. Mediante la investigación, se establecerán las acciones de mantenimiento adecuadas a implementar para mejorar los planes actuales.

Este análisis se justifica técnica y financieramente porque el transformador monofásico de distribución es un activo crítico para la empresa, por lo que la sustitución de los transformadores dañados en la red de distribución, representa un alto costo económico, y al aumentar el tiempo de operación de estos elementos sería de gran beneficio para la empresa.

Dado que un transformador monofásico de distribución es el elemento final en la entrega de energía eléctrica al usuario final, el daño de este provoca una interrupción en el suministro de electricidad, lo cual genera un impacto negativo en los indicadores de calidad del servicio, al lograr la reducción de la tasa de falla en transformadores también se mejoraría la calidad del servicio, con lo que el usuario final se beneficiará de gran manera.

A continuación, se presente en términos generales un esquema de solución para alcanzar los objetivos anteriormente establecidos.

Figura 1. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia.

7. MARCO TEÓRICO

Una red de distribución tiene como objetivo proporcionar el suministro de energía eléctrica, desde el sistema de transmisión hacia cada uno de los usuarios finales. En Guatemala se manejan dos voltajes de distribución: 13.8 KV y 34.5 KV, estos son reducidos por un transformador monofásico a voltaje secundario 120/240 V, 120/208 V entre otros voltajes de servicios, la falla de este elemento de distribución genera una interrupción en el servicio de energía, prestado por la empresa eléctrica.

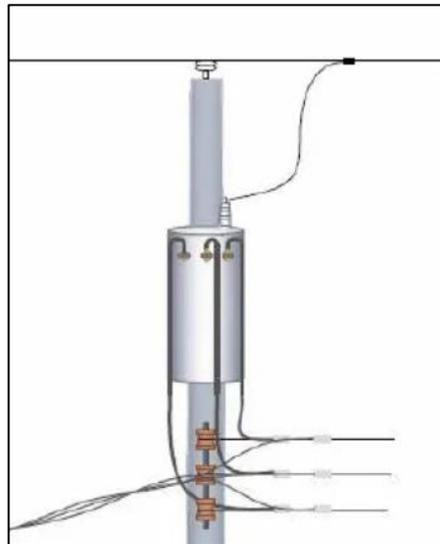
Por la alta tasa de falla de transformadores monofásicos en diferentes empresas de distribución eléctrica, se han empezado a implementar diferentes metodologías basadas en la ingeniería de confiabilidad, para mejorar los planes de mantenimiento, ya que por el alto costo de este equipo se considera un activo crítico.

7.1. Transformador de distribución monofásico

Los transformadores monofásicos son máquinas que ayudan a reducir los niveles de voltaje, en un sistema de distribución eléctrica, para que la energía pueda ser suministrada a niveles de voltaje seguros para el usuario. Este servicio es utilizado en los circuitos de iluminación y fuerza en los sectores residencial, comercial, industrial o público. Cualquiera que use este equipo, debe entender que, sin él, no habría energía para usar, por tal razón es uno de los elementos más importantes en un sistema de potencia. Los transformadores en el área rural son monofásicos, que

pueden ser convencionales o auto protegidos, para su montaje en poste o en bancos trifásicos. (Peña y Prentice, 2010, p. 4)

Figura 2. **Transformador monofásico de distribución**



Fuente: López. (2012). *Criterios de diseño para arquitectura de red de media tensión a 34,5 kv y baja tensión, en el área rural de Guatemala.*

7.1.1. Aspectos constructivos

De acuerdo con la Universidad de Vigo (2012) dice:

Un transformador consta de dos bobinas que están acopladas magnéticamente entre sí a través de un núcleo ferromagnético. La primera bobina se compone de interruptores que regulan el voltaje y la segunda se compone de dos devanados que tienen las mismas dimensiones. (párr. 2)

7.1.2. Núcleo

El circuito magnético está compuesto por un núcleo de chapa de acero con bajas cantidades de silicio, que evita pérdidas por histéresis y corrientes parásitas. Las columnas de bobinado enrolladas en el núcleo de chapa de acero transforman la energía. Cuanto mayor sea el tamaño del devanado, mayor será la potencia del transformador.

La fabricación de núcleos normalmente requiere el uso de láminas magnéticas laminadas en frío con un espesor de aproximadamente 0,35 milímetros. Estas láminas reducen la pérdida de núcleos por histéresis y se someten a un tratamiento químico especial llamado carlita para convertirse en finas copas aislantes de 0,01 milímetros de espesor. (Rueda, s.f.)

7.1.3. Bobinas

Son un conjunto de espiras que rodean las columnas del núcleo, estas constituyen el circuito eléctrico, que se encarga de recibir un voltaje y corriente para transformar sus valores por medio de inducción electromagnética. El tamaño del conductor determina la cantidad de corriente que puede operar el transformador; exceder ese límite dañaría la bobina.

Según Saldívar (2018) “las bobinas y su aislamiento son la parte mas vulnerable del transformador y deben estar contruidos para soportar esfuerzos dieléctricos, térmicos y magnéticos derivados de las diferentes fallas que ocurren en la red de media tensión” (p. 19).

7.1.4. Sistema de aislamiento

La principal función del sistema de aislamiento es impedir el contacto entre las bobinas, el núcleo y partes metálicas en contacto con la red de tierra del transformador, este aislamiento puede ser sólido o líquido, con un aislamiento sólido, se consigue proporcionar un soporte mecánico contra cortocircuitos o descargas atmosféricas, mientras un aislamiento líquido proporciona un medio refrigerante. (Saldívar, 2018)

Para mantener la vida útil de sus transformadores, es importante que estos operen a temperaturas específicas. Los límites de aumento de temperatura afectan la calidad del aislamiento de un transformador, que juega un papel importante en la transmisión de energía eléctrica. (Hernández, 2010)

7.1.5. Aceite dieléctrico

El aceite es utilizado como medio de aislamiento eléctrico, otra función importante es mantener frescos a los transformadores. Sus propiedades dieléctricas protegen el sistema de aislamiento eléctrico de la humedad y el aire. Las funciones dieléctricas y de aislamiento del aceite son una ventaja importante. Sin embargo, esta sustancia es dañina para el medio ambiente y problemática para la salud de muchas personas, por lo que se han buscado nuevas alternativas para hacer menos dañino este elemento del transformador. (Martínez, 2018)

7.1.6. Accesorios

A continuación, se describen algunos de los accesorios necesarios que deben ser instalados en los transformadores monofásicos para su correcto funcionamiento.

7.1.6.1. Bushing AT

Los *bushings AT* son elementos se encargan de conectar el transformador a la línea de media tensión, dependiendo del tipo de transformador monofásico estos pueden tener dos *bushing* o uno, las dimensiones de este equipo dependen del nivel de voltaje de la red de distribución. Estos dispositivos se pueden sustituir al momento de presentarse un daño, de presentarse esta situación el transformador tiene que ser desmontado para efectuar la reparación. (Borja, 2019)

7.1.6.2. Bushing de BT

La función de este elemento es proporcionar la salida de baja tensión, están contruidos para funcionar a una corriente nominal según la potencia del transformador, al conectar una carga mayor al de límite establecido podría provocar la quema de estos, por lo que es recomendable no sobrecargar el transformador. Es importante mencionar que en el momento en que estos accesorios se dañan, el transformador tendrá que ser desmontado para sustituirlos. (Bitransformadores, 2018)

7.1.6.3. Válvula de sobrepresión

Un cortocircuito o arco interno en un transformador sumergido en un líquido aislante puede provocar aumentos rápidos de presión, debido a la vaporización instantánea de parte del líquido. Esto puede causar la deformación del tanque o incluso su ruptura, por lo que es necesario tener una protección contra aumentos de presión interna. (BIRT LH, 2020)

Una válvula es un material que ayuda al transformador a liberar el escape de presión excesivo dentro de la cuba, derivado del aumento de temperatura, producido por una sobrecarga, temperaturas elevadas del medio ambiente, fallas secundarias externas o fallas en el devanado de baja tensión. (BIRT LH, 2020)

7.1.6.4. Luz indicadora de sobrecarga

Este elemento es un material bimetálico y se activa cuando se produce una sobrecarga continua, está alimentada por una bobina electromagnética especial que le proporciona entre 4 y 6 voltios, es accionado por los cambios de temperatura del aceite superior al del transformador. Con este accesorio, las unidades que están sobrecargados pueden ser identificadas fácilmente. (Stewart, 2005)

7.1.6.5. Cambiador de derivaciones (TAP)

Según Stewart (2005), los cambiadores de derivación son dispositivos que están instalados por encima de la bobina primaria, este elemento cumple con la tarea de compensar pequeñas variaciones de voltaje en diferentes puntos de la red. Los variadores manuales de voltaje están diseñados para regular un rango máximo de un 10 % del voltaje primario. Durante la regulación del voltaje de línea, los cambiadores de tomas cambian la relación de vueltas en el transformador en pequeña cantidad.

7.2. Transformador convencional S

Este tipo de transformador de distribución es utilizado principalmente en bancos trifásicos, posee dos *bushings* en la parte de media tensión, no tiene protecciones incorporadas debido a que se emplean fusibles y pararrayos

conectados con el primario. Estas las capacidades están dadas en 10, 15, 25, 50 y 75 KVA.

7.3. Transformador Autoprotegido CP

Una de la característica distintiva de este transformador de distribución es que poseen solo un *bushing* de media tensión, este transformador tiene incorporado las protecciones contra sobretensiones y sobre corrientes en el primario, puede regular si voltaje con el cambiador de *taps* en un rango de 10 % del voltaje nominal.

Figura 3. Transformador tipo S y CP



Fuente: ABB. (2002). *Distribution transformer guide*.

7.4. Protecciones de transformadores monofásicos

Definitivamente los transformadores de distribución necesitan de determinados dispositivos de protección que aseguren un adecuado funcionamiento, tomando en cuenta los requerimientos establecidos en las normas ANSI y recomendaciones de la IEEE.

Para la protección contra sobretensiones se utilizan descargadores, estos elementos son conocidos como pararrayos y para la protección contra sobre corrientes se utilizan los fusibles o también llamados seccionadores, estos últimos se tienen que dimensionar según la potencia nominal del transformador. Para que estos elementos de protección funcionen adecuadamente, se necesita de un sistema de tierra que logre drenar las corrientes de falla. A continuación, se hará énfasis en cada uno de estos elementos.

7.4.1. Descargador de sobretensiones (pararrayo)

Para proteger los sistemas eléctricos de las corrientes atmosféricas de alto voltaje, se creó un pararrayos. Este equipo tiene que estar debidamente conectado a tierra. Las sobretensiones pueden ser causadas por descargas atmosféricas o por maniobras inadecuadas; se pueden medir y agrupar en categorías.

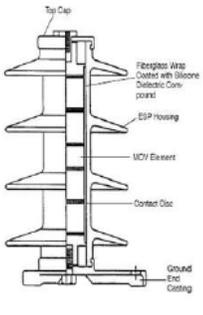
Una de las situaciones que puede ocurrir es cuando en el pararrayos impacta directamente una descarga atmosférica. Esto se denomina *descarga adyacente* y sus parámetros de corriente de choque se indican con una forma de onda de 10/350 μ s o 3,5/10 μ s, esto produce sobretensiones dentro del sistema eléctrico de los usuarios, causando daños en los electrodomésticos relacionados. La energía liberada por estas sobretensiones es más pequeña que la descarga

de impulso cercana y consiste en una forma de onda de 8/20 microsegundos (8/20 μ s). Esto se debe a que las sobretensiones inducen los efectos de los campos electromagnéticos en los dispositivos y aparatos eléctricos. (Industrias SICA, 2016)

Dentro de las categorías también se puede mencionar el caso en que se produce una descarga atmosférica, a una gran distancia de la casa, se denomina descarga distante. E es el nombre que se le da a cualquier corriente atmosférica que se induce en una línea eléctrica de distribución, crea un pulso de ocho/veinte microsegundos o más en la red. Por último, encontramos a las corrientes que son generadas por sobretensiones debido a operaciones de conmutación, que se deben a la maniobra de cargas inductivas, la activación de protecciones y contactos accidentales a tierra. (Industrias SICA, 2016)

Los pararrayos están fabricados de óxido metálico de envoltorio polimérico, se encuentran montados sobre un soporte aislante, por lo regular los transformadores vienen fabricados con esta protección, adecuada al nivel de voltaje de la línea de media tensión.

Figura 4. Pararrayos de distribución

Figura	Esquema	Símbolo	Voltaje asignado (kV)	34,5
			Voltaje nominal (Arrester rating) (kV)	27
			Voltaje de descarga (8/20 μ s – 10 kA) (kV)	≥ 78
			Voltaje máximo de servicio (kV)	22
			Corriente nominal de descarga (Heavy Duty – kA)	10
			Frecuencia nominal (Hz)	60
			Máx voltaje descarga residual onda 8/20 μ s (kV)	89
			Alto total (mm)	390
			Distancia del centro del pararrayos al centro de sujeción del taladro (mm)	115
			Diámetro de la campana (mm)	≥ 100
			Peso aproximado (kg)	4.4
Línea de fuga (mm)	≥ 900			

Fuente: López. (2012). *Criterios de diseño para arquitectura de red de media tensión a 34,5 kv y baja tensión, en el área rural de Guatemala.*

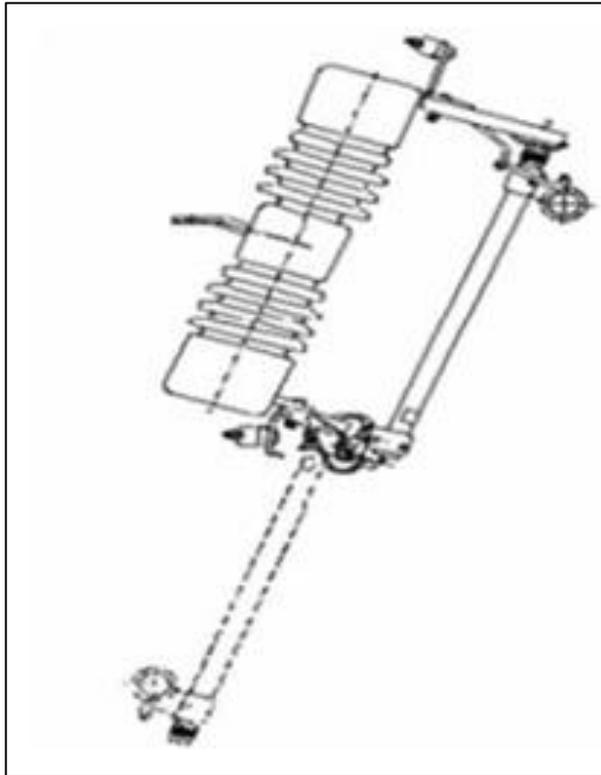
7.4.2. Fusible

Es uno de los elementos que conforman el sistema de protección de un transformador. Este dispositivo se abre en el momento que circula una corriente mayor a la nominal, impidiendo que la falla queme las bobinas del equipo. El fusible está colocado dentro de un tubo porta fusible, este tiene la función de contenerlo y extinguir el arco eléctrico. Según la curva de operación, se pueden encontrar tipo K, T y E, este elemento debe de estar debidamente conectado al conductor de tierra. (Merla, 2021, párr. 23)

Para un fusible existen dos curvas, la curva mínima de fusión, que opera con la corriente mínima y el tiempo en que el fusible comienza a fundirse y la curva máxima de liberación de falla, por lo que en definitiva para un buen

funcionamiento de este dispositivo se debe seleccionar el adecuado, en base a las características del transformador de distribución.

Figura 5. **Base y tubo porta fusible**



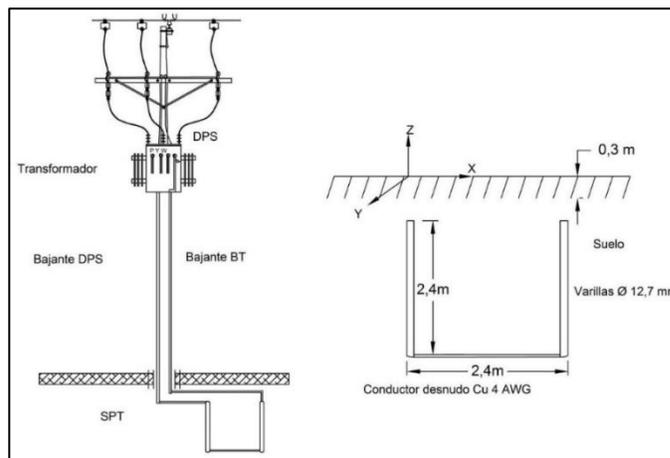
Fuente: Martín. (1987). *Diseño de subestaciones eléctricas*.

7.4.3. Sistema de puesta a tierra

Es la unión entre un equipo eléctrico y la tierra, por medio de un conductor eléctrico adecuado. Este sistema ayuda al transformador a descargar a tierra la corriente de falla, por tal razón es importante dimensionar correctamente la red de tierra, y así alcanzar los valores ideales de operación. Los valores recomendables para un transformador son no mayores a 5 ohmios.

Según Stewart (2005), el sistema de puesta a tierra representa una función importante en la protección del transformador, es por ello por lo que dependiendo de la configuración se deben de tomar en cuenta que los pararrayos y tanque del transformador deben de ir debidamente aterrizados, con la finalidad que todo el entorno del equipo este referenciado a tierra, para que las corrientes de falla se drenen de forma correcta.

Figura 6. **Sistema de puesta a tierra Carson**



Fuente: CODENSA. (2017). *LAR400 Puesta a tierra. NORMA TÉCNICA.*

7.5. Tipos de fallas en transformadores monofásicos

Los problemas comunes con los transformadores pueden derivarse de fallas eléctricas o mecánicas, así como un estrés térmico excesivo debido a diferentes condiciones ambientales. A continuación, se enumeran algunas de las fallas de transformadores más comunes y sus causas. (TECSA, 2018)

7.5.1. Fallas por sobretensión

De acuerdo con lo planteado por Astudillo (2021), una sobretensión es el incremento de voltaje por encima de un valor establecido como máximo, entre dos puntos de un sistema eléctrico, lo que puede provocar fallas de aislamiento en los equipos, de acuerdo con su duración, se clasifican en sobretensiones transitorias y temporales.

Conviene subrayar que estos eventos transitorios son provocados por descargas atmosféricas o maniobras inadecuadas; un evento temporal se puede derivar de la sobrecarga del transformador, por tal razón es importante tener todas estas consideraciones en el momento de la instalación del equipo en la red de distribución.

Dicho lo anterior, cuando sucede una sobrecarga, se ven expuestos los diferentes dispositivos que conforman el transformador de distribución, provocando con esto la disminución de la vida útil del mismo. Algunas fallas derivadas de sobretensiones que se pueden mencionar son: ruptura del devanado de media tensión, *tap* central fundido, perforación de la bobina de baja tensión, bornes BT quemados cortocircuito entre espiras entre otros. (Giraldo, 2014, p. 44)

7.5.2. Fallas por sobrecarga

Con respecto a la falla por sobrecarga, se produce al momento de sobrepasar el límite de la potencia nominal que el transformador puede entregar, esto debido al incremento no planificado de la demanda o a un mal dimensionamiento de instalación. Además, es importante mencionar que la

temperatura ambiente no adecuada a que opera el equipo puede generar una sobrecarga.

Las irregularidades más comunes en el transformador debido a una sobrecarga que se puede mencionar son: bajo nivel de aceite, deterioro de la pintura interna del tanque, aceite enrojecido, cortocircuito en las espiras de baja tensión, dicho lo anterior es de suma importancia tener en cuenta criterios adecuados de instalación para que el equipo pueda funcionar de forma correcta y así evitar sobrecargas. (Giraldo, 2014)

7.5.3. Fallas por cortocircuitos externos

Debido a la exposición del transformador al medio ambiente, se pueden presentar fallas por cortocircuitos ajenos al sistema interno del equipo, usualmente son provocados por problemas en acometidas, desgaste de aislamiento en las derivaciones de baja tensión, ráfagas de viento, incluso por vandalismo. (Giraldo, 2014)

Algunos de los problemas comunes que se generan por una falla de cortocircuito externo pueden ser: deformación de válvula de sobrepresión, *bushings* de baja tensión quemados, disminución de rigidez dieléctrica del aceite, bobinas de media tensión abierta entre otro. (Giraldo, 2014)

7.6. Ingeniería de la calidad

Según González (2010), a nivel empresa, la ingeniería de la calidad implica mejorar los procesos con eficiencia, por medio de la aplicación de nuevas tecnologías, sin requerir un costo alto para la institución. Para que esto se alcance desde la perspectiva de la ingeniería de la calidad, se establece un conjunto de

procesos metodológicos que permite incorporar la calidad en todas las áreas de una empresa, por medio de diferentes técnicas y herramientas que se aplican para el estudio de mejora, una de las herramientas más utilizadas en la ingeniería de la calidad es la confiabilidad.

Dicho lo anterior, para lograr un proceso de calidad, se debe realizar acciones de mantenimiento orientadas al cuidado del equipo, para que no genere defectos de calidad, además es prevenir fallas en el sistema, por lo cual es importante medir la duración y frecuencia con la que estos eventos suceden y las causas que las provocan, con la finalidad de obtener un sistema que funcione en óptimas condiciones.

7.6.1. Confiabilidad

Meza y Ortiz (2006), definen la confiabilidad como la capacidad de un sistema para desempeñar funciones establecidas y requeridas por un determinado intervalo de tiempo, por lo que se refiere a la probabilidad de que un elemento o sistema ejecute las funciones de forma correcta y satisfactoria durante un periodo de tiempo sin falla. Las teorías de mantenimiento basadas en confiabilidad mejoran los procesos y alargan la vida útil del equipo, ya que se diseñan estrategias que consideran un mayor número de variables que afectan un sistema o un elemento de este.

7.7. Análisis de modo y efecto de falla

A fines de la década de 1940, la NASA comenzó a usar un método llamado *Análisis de modo y efecto de falla*, o AMEF por sus siglas en inglés. Es un invento que se desarrolló para evaluar la confiabilidad del equipo y predecir los efectos

de las fallas. El modo de falla se define como la forma en que un proceso puede fallar, lo que comúnmente es relacionado con un defecto en el diseño del sistema.

La importancia de este método radica en que asegura la calidad por medio de un análisis sistemático, para lo que se identifica y evalúa los modos de falla potenciales, las causas asociadas con el diseño, y consecuencias importantes respecto a los criterios de disponibilidad. (Salazar, 2019).

Aunque el método AMEF usualmente se utiliza en las industrias automotrices, es utilizado para la detección y bloqueo de las causas de fallas principales en productos y procesos de cualquier clase de empresa, ya sea que se encuentran en operación o en fase de proyecto. (Chávez, 2018, p. 22)

7.7.1. Objetivos del análisis de modo y efecto de falla

Con la metodología AMEF se enfoca en identificar y evaluar los modos de falla potenciales, relacionadas con el diseño del equipo, y criterios importantes como disponibilidad, seguridad confiabilidad y calidad, en resumen los objetivos de esta herramienta es determinar los efectos de fallas potenciales en el desempeño del sistema, identificar las acciones que podrían prevenir fallas, reducir la ocurrencia con la que suceden los eventos que causan las fallas y determinar cada modo de falla dispone de los medios de detección previstos. (Chávez, 2018, p. 22)

7.7.2. Índice de prioridad de riesgo

Al igual que el método histórico matemático de evaluación de riesgos que utiliza FINE, William T., este índice utiliza los mismos fundamentos. Incorpora detectabilidad en el índice de prioridad para crear un código numérico

adimensional relacionado con la gravedad y la frecuencia. Esta combinación permite que el índice calcule la importancia de un problema y cuántas acciones correctivas se deben tomar. Se utiliza para determinar fallas en todas las causas. (Bestratén, Orriols y Mata, 2004, p. 2)

$$IPR = D.G.F$$

Ecuación 1.

Donde:

- G: índice de gravedad del fallo
- F: índice de frecuencia del fallo
- D: índice de detección del fallo

Es necesario determinar qué aspectos de un producto o proceso deben examinarse a fondo desde el principio. Se puede lograr mejor a través de la observación directa por parte del propio grupo, así como aplicar métodos de análisis básicos como lluvia de ideas, diagramas de causa-efecto de Ishikawa.

“Estos son enfoques simples que son fáciles de usar, ya que se basan en las habilidades y calificaciones del grupo mismo y la naturaleza del producto que se analiza. Además, esta determinación depende del tiempo disponible para el análisis” (Bestratén, Orriols y Mata, 2004, p. 2).

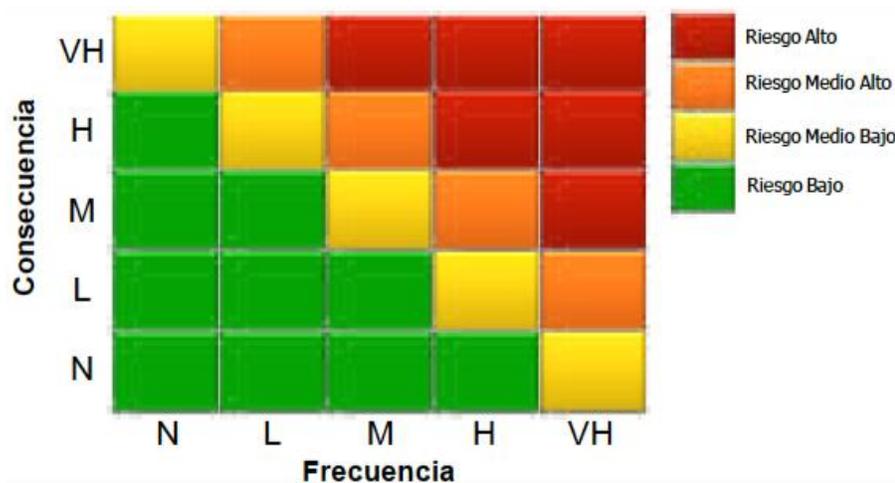
7.8. Análisis de criticidad

El proceso permite determinar el nivel de significado, importancia o jerarquía de un activo, sistema o instalación dados. Esto se logra mediante el establecimiento de rangos que representan las probabilidades y frecuencias de

mal funcionamiento del equipo, así como las consecuencias correspondientes. Tanto las probabilidades como las consecuencias se consideran al determinar los programas de mantenimiento y las clasificaciones basadas en el riesgo descritas en la Norma Norsok Z-008, 2011. (Gutiérrez, Agüero y Calixto, s.f.)

El análisis de criticidad es el proceso de determinar los riesgos y recompensas de un próximo evento o falla. Implica analizar los riesgos y las recompensas asociadas con el fracaso, el éxito o cualquier otro resultado.

Figura 7. **Matriz de criticidad**



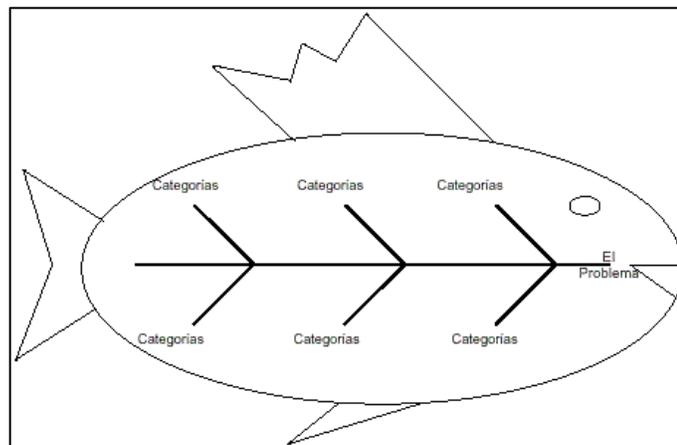
Fuente: Gutiérrez, Agüero y Calixto. (s.f.). *Análisis de Criticidad Integral de Activos*. Consultado el 17 de octubre de 2022. Recuperado de <https://predictiva21.com/analisis-criticidad-integral-activos/#:~:text=El%20análisis%20de%20criticidad%20es,y%20sus%20impactos%20o%20consecuencias.>

7.9. Diagrama de causa y efecto

Los diagramas de efectos y causas ayudan a resolver un problema específico al identificar sus posibles causas. Estos diagramas son visuales, por lo que procesan fácilmente grandes cantidades de datos sobre el problema y encuentran posibles soluciones. Además, aumentan la posibilidad de encontrar la causa principal. (CyTA, 2013)

- Para crear un diagrama de Causa y Efecto, es crucial pensar en las causas del problema. Es por esto por lo que la lluvia de ideas es el primer paso en este proceso. En este paso, los equipos identifican el origen del problema. Se deben considerar las causas fundamentales en lugar de las posibles soluciones al problema. (CyTA, 2013)

Figura 8. **Ejemplo de diagrama de Causa – Efecto**



Fuente: CyTA. (2013). *Diagrama de Causa y Efecto*. Consultado el 17 de octubre de 2022. Recuperado de http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/herramientas_calidad/causaefecto.htm.

7.10. Mantenimiento

El mantenimiento se puede definir como el conjunto de acciones que permiten a un equipo conservar un buen estado, con el propósito de lograr una mayor disponibilidad hasta un tiempo determinado de vida útil, a un costo mínimo. Dicho lo anterior con esta acción se puede mejorar aspectos operativos, así como la reducir los costos por sustitución de equipos dañados. (Chávez, 2018)

Diseñar un adecuado plan de mantenimiento puede lograr la optimización de la disponibilidad de los equipos, disminución de los costos operativos, optimización de los recursos humanos y maximizar la vida útil de los equipos o maquinas. (Chávez, 2018)

7.10.1. Mantenimiento productivo total

Según Chávez (2018), el mantenimiento productivo total en la actualidad es una de las herramientas más importantes para lograr la eficiencia y competitividad, con lo que se logra alcanzar los objetivos de las especificaciones de calidad, tiempo y costo de producción. Es muy eficaz en las empresas que cuentan con operaciones automáticas y secuenciales, y no se requiere de altas inversiones económicas.

El análisis de modo y efecto de falla, criticidad y causa raíz representan una función importante dentro de esta filosofía ya que con estos conceptos se logra aumentar la disponibilidad y eficacia de una maquina o sistema. Por lo tanto, seguir los procedimientos establecidos en estas herramientas pueden conllevar a una empresa a mejorar los procesos de mantenimiento y a reducir costos de operación ocasionados por las fallas recurrentes en equipos.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN MARCO METODOLOGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Estudios previos (recientes)

1.2. Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Transformador de Distribución Monofásico

2.1.1. Aspectos constructivos

2.1.2. Núcleo

2.1.3. Bobinas

2.1.4. Sistema de aislamiento

2.1.5. Aceite Dieléctrico

2.1.6. Accesorios

2.1.6.1. Bushing AT

2.1.6.2. Bushing de BT

2.1.6.3. Válvula de sobrepresión

- 2.1.6.4. Luz indicadora de sobrecarga
 - 2.1.6.5. Cambiador de Derivaciones (TAP)
 - 2.2. Transformador convencional S
 - 2.3. Transformador Autoprotegido CP
 - 2.4. Protecciones de transformadores monofásicos
 - 2.4.1. Descargador de Sobretensiones (pararrayo)
 - 2.4.2. Fusible
 - 2.4.3. Sistema de puesta a tierra
 - 2.5. Tipos de fallas en transformadores monofásicos
 - 2.5.1. Fallas por sobretensión
 - 2.5.2. Fallas por sobrecarga
 - 2.5.3. Fallas por cortocircuitos externos
 - 2.6. Ingeniería de la calidad
 - 2.6.1. Confiabilidad
 - 2.7. Análisis de modo y efecto de falla
 - 2.7.1. Objetivos del análisis de modo y efecto de falla
 - 2.7.2. Índice de prioridad de riesgo
 - 2.8. Análisis de criticidad
 - 2.9. Diagrama de causa y efecto
 - 2.10. Mantenimiento
 - 2.10.1. Mantenimiento productivo total
- 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 3.1. Características del estudio
 - 3.1.1. Diseño
 - 3.1.2. Enfoque
 - 3.1.3. Alcance
 - 3.1.4. Unidad de análisis
 - 3.2. Variables

3.3. Fases del desarrollo de la investigación

3.3.1. Fase 1

3.3.2. Fase 2

3.3.4. Fase 3

3.3.5. Fase 4

3.4. Técnicas de análisis de información

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGIA

La metodología implica una descripción de las técnicas que se utilizarán para desarrollar un estudio o investigación en la parte lógica, cronológica y esencial de los datos y hechos que pueda haber.

9.1. Características del estudio

A continuación, se presenta las características del estudio.

9.1.1. Diseño

El diseño de la presente investigación es de tipo no experimental, debido a que no se posee control de las variables medidas dado que son eventos que han ocurrido. Con base en los criterios de análisis de modo y efecto de falla, se pretende analizar las causas raíz que provocan averías en transformadores monofásicos de distribución, instalados en la red de la empresa Distribuidora de Electricidad de Occidente, S.A., con la finalidad de proponer soluciones y su apropiada implementación para disminuir las incidencias de este tipo, en la red de distribución.

9.1.2. Enfoque

El enfoque del presente estudio es cuantitativo, ya que se recopilarán y analizarán datos del historial de incidencias por quema de transformadores monofásicos instalados en la red de media tensión del departamento de distribución de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A.

La información obtenida se utilizará para realizar el análisis de falla por medio de un estudio de confiabilidad, para lo cual se utilizará como base los procedimientos de la metodología análisis de modo y efecto de falla.

9.1.3. Alcance

El alcance de la presente investigación es del tipo exploratorio, dado que este se centró en analizar aspectos concretos que afectan el buen funcionamiento de transformador monofásico en la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A, que aún no han sido analizados a profundidad, por lo que permitirá proponer acciones preventivas y correctivas para disminuir la tasa de falla en estos equipos.

Debido a la falta de estudios previos de confiabilidad en transformadores de distribución a nivel nacional, este tema tiene una perspectiva innovadora por lo cual servirá de apoyo para futuros estudios de análisis de falla en redes de distribución.

9.2. Unidad de análisis

La población de estudio será las incidencias en la red distribución producidas por falla de transformadores monofásicos instalados en la red de media tensión de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A, para lo cual se utilizará las diferentes causas que producen este tipo de eventos, la frecuencia y criticidad con las que ocurren.

La información será obtenida a través del historial de fallas del departamento de distribución de dicha empresa. Para el análisis se evaluará las regiones que abarca la empresa, clasificándolo por circuitos.

9.3. Variables

¿Cuáles son las causas raíces de falla de transformadores eléctricos monofásicos en la empresa Distribuidora de Electricidad de Occidente, S.A.?

Tabla I. **Clasificación de variables No. 1**

Variable	Definición de la variable	Definición operativa	Indicadores
Sobrecarga	Es el exceso de corriente eléctrica provocado por una carga con una potencia superior a la nominal del equipo	Se mide en Kw (Kilo Watts)	Factor de carga, Factor de simultaneidad
Descargas atmosféricas	Son descargas eléctricas que ocurren en la atmosfera, son consecuencia de la acumulación de cargas eléctricas opuestas entre las nubes, el suelo o el aire	Cantidad de falla por descarga atmosférica (%)	Nivel isoceraunico en Guatemala
Cortocircuitos externos	Son fallas que se producen en la línea de distribución por diferentes causas	Cantidad de falla por Cortocircuitos externos (%)	Cantidad de incidencias por cortocircuitos externos

Fuente: elaboración propia.

¿Qué nivel de criticidad pueden tener los efectos generados por cada falla posible en transformadores eléctricos monofásicos de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A.?

Tabla II. **Clasificación de variables No. 2**

Variable	Definición de la variable	Definición operativa	Indicadores
Tasa de falla	Es la frecuencia de falla de una determinada causa	Esta variable se mide en porcentaje (%)	Historial de falla y análisis causa raíz
Criticidad	Es el nivel de impacto que tiene una maquina dentro de un proceso en una determinada organización	Esta unidad se clasifica en criticidad alta, media y baja	Zonas críticas de falla

Fuente: elaboración propia.

¿Cuál es el índice de prioridad de riesgo de transformadores monofásicos de empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A.?

Tabla III. **Clasificación de variables No. 3**

Variable	Definición de la variable	Definición operativa	Indicadores
Gravedad	Es la cuantificación de la severidad de los efectos de una falla.	Esta variable se mide con una escala de 1 a 10	Daño provocado al equipo por el fallo
Ocurrencia	Es la probabilidad de que suceda un caso particular y resulte en un modo de falla durante la vida útil de un producto.	Esta variable se mide en porcentaje (%)	Repetitividad potencial de determinado fallo.
Detectabilidad	Es la probabilidad de que un control activo detecte la causa de un modo de falla, con la finalidad de prevenir antes que se dañe el equipo.	Esta variable se mide en porcentaje (%)	Sistemas de monitoreo en base a SCADA

Fuente: elaboración propia.

Las variables de estudio se clasifican a continuación.

Tabla IV. **Clasificación de variables**

Variable	Categoría		Numérico		Observabl e	Nivel de medición
	Dicotómic a	Politómic a	Discreta	Continu a		
Sobrecarga			x			Nominal
Descargas atmosféricas			x			Nominal
Cortocircuitos externos			x			Nominal
Obsolescencia			x		x	Nominal
Tasa de falla				x	x	Razón
Criticidad			x		x	Nominal
Gravedad			x		x	Nominal
Ocurrencia				x	x	Razón
Detectabilidad				x		Razón

Fuente: elaboración propia.

9.4. **Fases del desarrollo de la investigación**

A continuación, se detallan las fases del desarrollo de la investigación.

9.4.1. **Fase 1: revisión documental**

En base a el tema de la investigación se buscó y consultó toda la información pertinente, en libros, informes, normas nacionales e internacionales, para determinar cómo abordar el estudio. Con base en la literatura obtenida se definió el diseño y enfoque a seguir en la investigación.

Esta revisión fue de suma importancia para descartar y confirmar toda la información a utilizar en el desarrollo de la investigación, para realizar un adecuado análisis. Las fuentes bibliográficas de investigaciones recopiladas otorgaron un panorama del problema y la manera de precisar las variables a

estudiar, que fueron objeto de medición tanto en el análisis previo, como en el estudio de campo.

9.4.2. Fase 2: recopilación de informes de incidencias por falla en transformadores monofásicos.

Durante el desarrollo de esta fase se realizaron las siguientes acciones:

- Solicitud de permisos para utilizar informe de incidencias por falla en transformadores monofásicos a la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A del periodo del 2020 al 2022.
- Revisión de información proporcionada por la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A del periodo del 2020 al 2022.
- Clasificación de información en base a circuitos que conforma la red de distribución de la empresa.

9.4.3. Fase 3: análisis cuantitativo y estadística descriptiva.

Se realizará los planteamientos matemáticos y estadísticos de cada uno de los modelos y algoritmos necesarios para alcanzar de cada uno de los objetivos planteados, Con base en la metodología del análisis de modo efecto de falla aplicado a transformadores monofásicos de distribución para determinar las causas de estas incidencias y los efectos que estos provocan.

9.4.4. Fase 4: identificación de fallas recurrentes y críticas

Con base a los resultados del análisis modo y efecto de falla en transformadores monofásicos, se determinarán las fallas recurrentes y críticas a partir de la tasa de ocurrencia, criticidad e índice de prioridad de riesgo de cada una con la finalidad de proponer correcciones en los criterios de instalación y en los planes de mantenimientos correctivos y preventivos.

9.5. Resultados esperados

Los resultados esperados en este estudio se plantean con base en los objetivos, que tienen la finalidad de determinar las causas raíz de las fallas que provocan daños a transformadores monofásicos, instalados en la red de media tensión de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente, S.A., para realizar propuestas de mejora en los planes de mantenimiento y criterios de instalación.

Durante la primera fase de la investigación se espera recopilar toda la base teórica necesaria para llevar a cabo el desarrollo de la investigación, en la segunda fase se realizará la solicitud de los historiales de incidencia de los años 2020, 2021 y 2022 a la unidad correspondiente de la empresa eléctrica, en la tercera fase se llevará a cabo el desarrollo numérico necesario para el análisis planteado anteriormente, en la cuarta fase se identificará las fallas recurrentes y críticas, para proponer las mejoras en los criterios de instalación y planes de mantenimientos.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Para el desarrollo de la investigación se utilizarán distintas técnicas de análisis, con que se evaluará los datos recolectados en el historial de fallas proporcionado por el departamento de distribución de la empresa a realizar el estudio, con el propósito de alcanzar los objetivos planteados anteriormente. Como base se aplicará la metodología modo y efecto de falla, en el cual está implícito el análisis de criticidad y causa raíz. La información con la que se respaldar este estudio se describe a continuación:

- Cuadro de incidencias en red de distribución, derivadas de fallas en transformadores monofásicos.
- Reportes de brigadas, con detalles de la incidencia, para establecer las causas de la falla.
- Información técnica del transformador dañado, para determinar características y aspectos de interés.

10.1. Herramientas estadísticas

Con la información recolectada se aplicará diferentes técnicas y herramientas estadísticas para el análisis de los datos, con la finalidad de identificar tendencias y patrones. Algunas de las herramientas a utilizar son:

- Diagrama de Pareto
- Diagrama de causa y efecto
- Probabilidad de falla

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

La investigación será financiada con recursos propios, ya que el estudio es de carácter descriptivo, para realizar la investigación se tomaron en cuenta los siguientes recursos.

Tabla VI. **Presupuesto de la investigación**

Recurso	Descripción	Costo	Cantidad	Total	Fuente de financiamiento
Humano	Honorarios del estudiante / mes	Q 2,500.00	12	Q 30,000.00	Estudiante
Humano	Honorarios del asesor	Q 3,000.00	1	Q 3,000.00	Asesor
Equipo	Equipo de computación	Q 4,500.00	1	Q 4,500.00	Estudiante
Servicio	Internet	Q 350.00	12	Q 4,200.00	Estudiante
Tecnológico	Licencias de Software	Q 800.00	1	Q 800.00	Estudiante
Servicio	Energía eléctrica/mes	Q 300.00	12	Q 3,600.00	Estudiante
Total				Q	46,100.00

Fuente: elaboración propia.

En general el presupuesto está conformado por los gastos administrativos, que deberá costear el estudiante, para el desarrollo de la investigación, el gasto por los honorarios del asesor es simbólico ya que el colegiado está brindando su apoyo sin fines lucrativos, para los servicios de energía eléctrica e internet, se consideró un tiempo estimado de 12 meses que es el periodo en el cual se llevará a cabo el estudio.

13. REFERENCIAS

1. ABB. (2002). *Distribution Transformer Guide*. Missouri: Distribution Transformer Division.
2. Bestratén, M., Orriols, R. y Mata, C. (enero, 2004). NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos. AMFE. *Notas Técnicas de Prevención, Vol. Único, 1-8*. Recuperado de [https://www.insst.es/documents/94886/326775/ntp_679.pdf/3f2a81e3-531c-4daa-bfc2-2abd3aaba4ba#:~:text=%C3%8Dndice%20de%20Prioridad%20de%20Riesgo%20\(IPR\)&text=Por%20tanto%2C%20tal%20%C3%A4Dn%2D%20dice,orden%20de%20las%20acciones%20correctoras](https://www.insst.es/documents/94886/326775/ntp_679.pdf/3f2a81e3-531c-4daa-bfc2-2abd3aaba4ba#:~:text=%C3%8Dndice%20de%20Prioridad%20de%20Riesgo%20(IPR)&text=Por%20tanto%2C%20tal%20%C3%A4Dn%2D%20dice,orden%20de%20las%20acciones%20correctoras).
3. BIRT LH. (31 de marzo de 2020). Protección por sobrepresión. Válvulas de sobrepresión. [Mensaje de blog]. https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/IEA/IDI/IDI02/es_IEA_IDI02_Contenidos/website_252_proteccion_por_sobrepresin_vlvulas_de_sobrepresin.html.
4. Bitransformadores. (3 de marzo de 2018). Las partes del transformador. [Mensaje de blog]. Recuperado de <http://www.bitransformadores.com/2018/03/03/las-partes-del-transformador/#:~:text=Por%20los%20terminales%20o%20Bushin g,un%20voltaje%20a%20otro%20voltaje>.

5. Borja, W. (2019). *Metodología para la evaluación del factor de consecuencia de la falla final de transformadores de distribución* (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17315/1/UPS-CT008261.pdf>.
6. Castillo, R. y Sinchiguano, R. (2013). *Estudio de causas de fallas en transformadores de distribución de la Empresa Eléctrica Quito* (Tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Recuperado de <https://1library.co/document/q05jgogy-estudio-causas-fallas-transformadores-distribucion-empresa-electrica-quito.html>.
7. Chávez, A. (2018). *Propuesta de un programa de mantenimiento preventivo a través de herramientas de confiabilidad para los transformadores de la empresa Teixa de C.V.* (Tesis de maestría). Universidad Veracruzana, México. Recuperado de <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/1944/49335/ChavezCuevasAlejandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
8. CODENSA. (2017). *LAR400 Puesta a tierra. NORMA TÉCNICA*. Colombia: Autor.
9. CyTA. (18 de septiembre de 2013). Diagrama de Causa y Efecto. [Mensaje de blog]. Recuperado de http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/herramientas_calidad/causaefecto.htm.

10. Energética Hoy. (22 de noviembre de 2021). La tasa de falla de los transformadores en aceite podrían aumentar entre 500% en 10 años. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.energeticahoy.com/post/2018/02/15/la-tasa-de-falla-de-los-transformadores-en-aceite-podr-c3-ada-aumentar-500-en-10-a-c3-b1o#:~:text=Es%20predecible%20un%20aumento%20de,ciclo%20de%20vida%20operacional%20esperado.>
11. Gutiérrez, E., Agüero, M. y Calixto, I. (s.f.). Análisis de Criticidad Integral de Activos. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://predictiva21.com/analisis-criticidad-integral-activos/#:~:text=El%20análisis%20de%20criticidad%20es,y%20sus%20impactos%20o%20consecuencias.>
12. Hernández, J. y Guidos, D. (2020). *Análisis de fallas en transformadores de potencia y su prevención* (Tesis de licenciatura). Universidad de El Salvador, El Salvador. Recuperado de <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/21289/1/An%C3%A1lisis%20de%20fallas%20en%20transformadores%20de%20potencia%20y%20su%20prevenci%C3%B3n.pdf>.
13. Hernández, L. (2010). *Análisis técnico – económico de la utilización de fluidos con alto punto de inflamabilidad en transformadores de distribución, considerando su aplicación en transformadores refrigerados con aceite mineral común, por medio de su sustitución* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

14. Holguin, Y. y Villacob, K. (2017). *Seguimiento a los factores incidentes en la vida útil de transformadores de distribución tipo poste* (Tesis de licenciatura). Universidad de la Costa, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/313/45535276-57308604.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
15. Huancollo, B. (2018). *Análisis y alternativas de solución para evitar averías en transformadores de distribución de 5 KVA a causa de descargas atmosféricas en el distrito de Desaguadero* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Del Altiplano, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/9118>.
16. Industrias SICA. (septiembre, 2016). Protección contra sobretensiones. *Revista Ingeniería Eléctrica*, 313, 46-47. Recuperado de https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/ie313_ind_sica_descargadores_sobretension.pdf.
17. López, J. (2012). *Criterios de diseño para arquitectura de red de media tensión a 34,5 kv y baja tensión, en el área rural de Guatemala* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
18. Mago, M., Valles, L., Olaya, J., Espejo, E., Arango, P. y Sierra, M. (marzo, 2017). Análisis de falla en la chapa de acero al silicio en transformadores de distribución. *Efecto de la zona de precedencia de los transformadores*, 30(2), 87-98. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v30n2/0120-100X-rion-30-02-00087.pdf>.

19. Martín, J. (1987). *Diseño de subestaciones eléctricas*. México: McGraw-Hill.
20. Martínez, M. (2008). *Mantenimiento predictivo a transformadores de potencia por medio de análisis de aceite dieléctrico y técnicas complementarias* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
21. Mena, I. y Noroña, D. (2013). Planificación expansión estudio coordinación protecciones sistema occidental ELEPCO S.A. (Tesis de licenciatura). Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador. Recuperado de <https://1library.co/document/q29e9krz-planificacion-expansion-estudio-coordinacion-protecciones-sistema-occidental-elepc.html>.
22. Merla, A. (29 de octubre de 2021). Los Fusibles Y Su Importancia En Los Sistemas De Distribución. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://cursostesla.com/los-fusibles-y-su-importancia-en-los-sistemas-de-distribucion/>.
23. Montané, J., Dorrbercker, S. y Castillo, A. (febrero, 2019) Avances en la evolución del estado y la vida remanente de transformadores de fuerza. *Ingeniería Energética*, 40(3), 245-256. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v40n3/1815-5901-rie-40-03-245.pdf>.
24. Peña, H. y Prentice, J. (2010). Normas de transformadores de distribución. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Recuperado de

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2195/12/UPS-GT000157.pdf>.

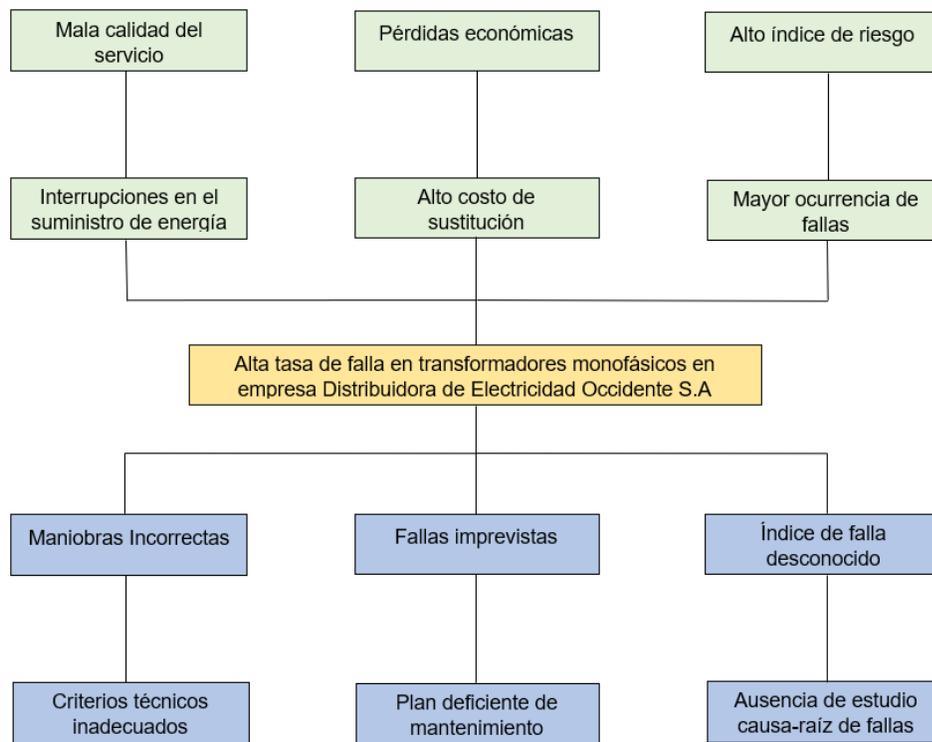
25. Ramos, M. (2014). *Sistemas estocásticos unificados para la predicción confiable de fallas por condiciones ambientales en transformadores de distribución* (Tesis de doctorado). Universidad de Carabobo, Venezuela. Recuperado de <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/1930>.
26. River Glennapts. (s.f.). Fallos externos e internos en el transformador. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://riverglennapts.com/es/protection-scheme/707-external-and-internal-faults-in-transformer.html>.
27. Rueda, L. (s.f.). *Máquinas eléctricas*. Colombia: Ediciones Tecnológicas de Bolívar.
28. Salazar, B. (1 de noviembre de 2019). Análisis del Modo y Efecto de Fallas (AMEF). [Mensaje de blog]. Recuperado de [https://www.ingenieriaindustrialonline.com/lean-manufacturing/analisis-del-modo-y-efecto-de-fallas-amef/#:~:text=El%20An%C3%A1lisis%20del%20Modo%20y%20Efecto%20de%20Fallas%20\(AMEF\)%2C,un%20m%C3%A9todo%20documentado%20de%20prevenci%C3%B3n](https://www.ingenieriaindustrialonline.com/lean-manufacturing/analisis-del-modo-y-efecto-de-fallas-amef/#:~:text=El%20An%C3%A1lisis%20del%20Modo%20y%20Efecto%20de%20Fallas%20(AMEF)%2C,un%20m%C3%A9todo%20documentado%20de%20prevenci%C3%B3n).
29. TECSA. (2 de julio de 2018). Las fallas más comunes en un transformador. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.tecsaqro.com.mx/blog/las-fallas-mas-comunes-en-un-transformador/>.

30. Universidad de Vigo. (2 de marzo de 2012). Dispositivos. [Mensaje de blog]. Recuperado de http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/dispositivos_transformadores.htm.
31. Zapata, J., Cataño, D. y Suárez, H. (enero, 2004). Índices de confiabilidad de transformadores de distribución. *Rev*

14. APÉNDICES

Podremos apreciar las bases de diseño que se utilizaron como suplemento de la investigación, que no tuvieron cabida anteriormente pero que son vitales en el desarrollo del diseño de investigación.

Apéndice 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

Como se muestra, el árbol de problemas nace a raíz de la alta tasa de falla en transformadores monofásicos, por lo que se busca realizar un análisis de las causas que provocan estos incidentes, para reforzar los planes de mantenimiento y criterios de instalación.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

Título	Plantamiento del problema	Preguntas de investigación	Objetivos
		Principal	General
DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ANALISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN LA EMPRESA DISTRIBUIDORA DE ELECTRICIDAD OCCIDENTE C.A	Alta tasa de falla en transformadores monofasicos en empresa distribuidora de electricidad occidente S.A	¿Cómo se desarrolla Realizar un análisis modo y efecto de falla en transformadores monofásicos en la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A?	Realizar un análisis modo y efecto de falla en transformadores monofásicos en la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A
		Auxiliares	Específico
		¿Cuáles son las causas raíces de falla de transformadores eléctricos monofásicos en la empresa distribuidora S.A ?	Determinar las principales causas de falla en transformadores monofásicos de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A
		¿Qué nivel de criticidad pueden tener los efectos generados por cada falla posible en transformadores eléctricos monofásicos de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A?	Estimar el nivel de criticidad pueden tener los efectos generados por cada falla posible en transformadores eléctricos monofásicos de la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A?
		¿Cuál es el indice de prioridad de riesgo de transformadores monofasicos de empresa distribuidora de electricidad occidente S.A?	Calcular el indice de prioridad de riesgo en transformadores monofasicos en la empresa Distribuidora de Electricidad Occidente S.A

Fuente: elaboración propia.