

**Análisis de los avances en la aplicación de pruebas eléctricas de laboratorio para  
Transformadores de media y baja tensión a nivel internacional en los últimos cinco años**

Ronald Enrique Garzón Sánchez

Asesor

Cindy Vanessa Carmona Cadavid

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Ingeniería Electrónica

2024

### **Agradecimientos**

En primer lugar, les agradezco a mis padres, mi esposa, mis grandes amigos Juan Carlos Vélez y Duvier Bedoya, que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos.

Agradezco muy profundamente a mi director por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiese podido lograr llegar a esta instancia.

## Resumen

La confiabilidad de los transformadores condiciona la calidad del suministro de energía eléctrica que afecta a centenares de habitantes y a la industria. Esa situación hace que se deban realizar pruebas idóneas antes de que los transformadores puedan ser instalados en las redes.

En este documento identifican los avances alcanzados en los últimos cinco años a nivel internacional en la aplicación de pruebas eléctricas de laboratorio para transformadores de media y baja tensión. En el ensayo se describe las características de funcionamiento que determinan el desempeño de los transformadores de media y baja tensión, se realiza una búsqueda sistemática de la literatura publicada en los últimos cinco años a nivel internacional sobre la evolución de las pruebas realizadas a esos transformadores en los laboratorios de pruebas eléctricas, y se establece la forma como la electrónica de potencia puede incidir en la evolución de los laboratorios de pruebas eléctricas para transformadores de media y baja tensión.

El trabajo consta de seis capítulos, y en el primero se plantea el problema, se exponen las razones que justifican el desarrollo de la investigación, se definen los objetivos y se establece la metodología necesaria para su cumplimiento. El segundo capítulo contiene el marco conceptual y teórico, lo que da paso al tercer capítulo, en el que se describen las características de funcionamiento de esos transformadores. La evolución de las pruebas que se realizan en laboratorio a los transformadores de media y baja tensión es el propósito del cuarto capítulo, mientras que en el quinto se estudian los equipos y los protocolos utilizados en las mencionadas pruebas. Esa secuencia conduce finalmente a las conclusiones del trabajo, que son objeto del sexto capítulo, en el que también se recomiendan algunos interrogantes que pueden ser objeto de investigación para continuar con el desarrollo de esta temática.

***Palabras clave:*** laboratorio de pruebas eléctricas, transformadores, media y baja tensión, electrónica de potencia, protocolos de prueba, características de desempeño.

## Abstract

The reliability of transformers determines the quality of the electrical power supply, affecting hundreds of residents and industries. This necessitates conducting appropriate tests before transformers can be installed in networks.

This document identifies advancements made internationally in the past five years regarding laboratory electrical testing for medium and low voltage transformers. It describes the operational characteristics influencing the performance of such transformers and conducts a systematic review of literature published in the last five years, globally, regarding the evolution of tests conducted on these transformers in electrical testing laboratories. Additionally, it explores how power electronics may impact the evolution of electrical testing laboratories for medium and low voltage transformers.

The work comprises six chapters. The first outlines the problem, justifies the research, defines objectives, and establishes necessary methodologies. The second chapter provides the theoretical framework, leading to the third chapter detailing transformer operation characteristics. Chapter four focuses on the evolution of laboratory tests for medium and low voltage transformers, while chapter five examines equipment and protocols used in these tests. Finally, sixth chapter presents conclusions and recommends further research topics for the continued development of this field.

**Keywords:** electrical testing laboratory, transformers, medium and low voltage, power electronics, testing protocols, performance characteristics.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	10
Planteamiento del Problema .....	12
Formulación del Problema.....	18
Justificación .....	19
Objetivos.....	23
Objetivo General.....	23
Objetivos Específicos.....	23
Metodología .....	24
Marco Conceptual y Teórico .....	27
Electrónica de Potencia.....	27
Laboratorios de Pruebas Eléctricas.....	31
Transformador.....	35
Cables de Media Tensión.....	38
Características Generales de un Transformador .....	41
Clases de Transformadores .....	44
Características de Funcionamiento que Determinan el Desempeño de los Transformadores de Media y Baja Tensión .....	50
Elementos Esenciales de Protección Para los Transformadores de Media y Baja Tensión.....	50
Interruptores de Baja Tensión.....	50
Fusibles. ....	53
Evolución de las Pruebas Realizadas a Transformadores de Media y Baja Tensión en los Laboratorios de Pruebas Eléctricas .....	62

## Equipos y Protocolos que se Utilizan en los Laboratorios de Pruebas Eléctricas para

Transformadores de Media y Baja Tensión .....	72
Analizador de Redes Eléctricas .....	72
Generador de Alta Tensión .....	74
Cámara Termográfica .....	78
Equipo de Medición de Resistencia de Aislamiento.....	81
Analizador de Gases Disueltos en Aceite .....	84
Equipo de Medición de Pérdidas y Eficiencia .....	87
Ensayos de Aislamiento Dieléctrico .....	89
Ensayos de Resistencia de Aislamiento .....	90
Ensayos de Pérdidas y Eficiencia .....	91
Ensayos de Temperatura y Sobrecalentamiento .....	92
Ensayos de Descargas Parciales.....	93
Otros Protocolos y Equipos Empleados en los Laboratorios.....	94
Conclusiones .....	98
Investigaciones Futuras.....	100
Referencias Bibliográficas .....	101

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Países con Normas y Regulaciones Sobre Pruebas de Transformadores .....</i>	<b>16</b>
<b>Tabla 2</b> <i>Alternativas para Impedir el Aumento de Temperatura del Transformador.....</i>	<b>43</b>
<b>Tabla 3</b> <i>Clases de Transformadores sus Características y Desventajas .....</i>	<b>45</b>

## Listado de Figuras

<b>Figura 1</b>	<i>“Ejemplos de Configuraciones de Laboratorios de Pruebas Eléctricas”</i>	13
<b>Figura 2</b>	<i>“Fases de la Investigación”</i>	25
<b>Figura 3</b>	<i>“Principio de Funcionamiento de Transformador Monofásico”</i>	35
<b>Figura 4</b>	<i>“Transformador Trifásico Distribución Eléctrica Subterránea”</i>	37
<b>Figura 5</b>	<i>“Cable de Media Tensión”</i>	39
<b>Figura 6</b>	<i>“Transporte de Energía Desde la Central Eléctrica Hasta los Usuarios”</i>	40
<b>Figura 7</b>	<i>“Suministro en Baja Tensión por Medio de la Red de Distribución”</i>	41
<b>Figura 8</b>	<i>“Curvas de Disparo de un Interruptor Termomagnético”</i>	52
<b>Figura 9</b>	<i>“Fusible Tipo Bayoneta”</i>	54
<b>Figura 10</b>	<i>“Fusible de Potencia SMD-20 Estilo Aéreo para Punta De Poste”</i>	56
<b>Figura 11</b>	<i>“Fusible de Potencia SMD-20 Estilo Aéreo para Punta De Poste”</i>	58
<b>Figura 12</b>	<i>“A) Coordinación Limitada del Fusible del Transformador con el Fusible Normal. B) Coordinación Completa del Fault Tammer con el Fusible Ramal”</i>	59
<b>Figura 13</b>	<i>“Línea de Tiempo de la Evolución en las Pruebas de los Transformadores”</i>	63
<b>Figura 14</b>	<i>“Generador de Alta Tensión”</i>	75
<b>Figura 15</b>	<i>“Cámara Termográfica”</i>	79
<b>Figura 16</b>	<i>“Analizador de Gases”</i>	85
<b>Figura 17</b>	<i>“Ensayo de Aislamiento Dieléctrico”</i>	89

## Introducción

En un mundo globalizado e intercomunicado constantemente, los transformadores eléctricos de media y baja potencia cumplen una función silenciosa que solamente se nota cuando dejan de estar operando, pues su confiabilidad es una de las características más valiosas, dado que de ella depende que toda la sociedad pueda mantener sus actividades cotidianas.

Los avances en la aplicación de pruebas eléctricas de laboratorio para transformadores de media y baja tensión han sido significativos en los últimos años, impulsados por la creciente demanda de energía eléctrica confiable y eficiente. De acuerdo con Shen et al. (2021), en el pasado, las pruebas de laboratorio para transformadores se centraban principalmente en la resistencia de aislamiento y la capacidad de soportar altas tensiones. Sin embargo, con el desarrollo tecnológico y la evolución de las normativas de seguridad, las pruebas se han vuelto más sofisticadas y completas.

Una de las áreas de avance ha sido la mejora en la precisión de las pruebas. Se han desarrollado métodos más precisos para evaluar el rendimiento y la eficiencia de los transformadores, lo que permite identificar posibles problemas antes de su instalación en la red eléctrica (Shen et al., 2021). Además, se ha prestado una atención especial a la detección temprana de defectos, como las descargas parciales, que pueden ser indicativas de problemas de aislamiento. Las pruebas de descarga parcial se han convertido en una parte integral de las pruebas de laboratorio (Hussain et al., 2021), permitiendo una evaluación más exhaustiva de la integridad del transformador.

La integración de la electrónica de potencia en los sistemas de prueba también ha sido un avance importante. Esto ha permitido una mayor automatización de las pruebas y una mayor capacidad para simular condiciones reales de operación, lo que mejora la precisión y la eficiencia

de las pruebas (Hussain et al., 2021). Otro aspecto clave es la evaluación del sistema de aislamiento para transformadores, que ha cobrado relevancia en aplicaciones de media y baja tensión. Se han desarrollado métodos específicos para evaluar la integridad del sistema de aislamiento y garantizar su funcionamiento seguro y confiable.

El desarrollo de este trabajo busca responder al hecho de que identificar los avances en las pruebas eléctricas permite mejorar la calidad y eficiencia de estos dispositivos, lo que a su vez contribuye a una red eléctrica más robusta y resiliente. Además, el panorama tecnológico está en constante evolución, con nuevos materiales, diseños y técnicas de fabricación que impactan en la eficacia y rendimiento de los transformadores. Por lo tanto, mantenerse al día con los últimos desarrollos permite implementar las mejores prácticas y tecnologías en las pruebas de laboratorio. Otro aspecto relevante es la creciente demanda de energía eléctrica y la necesidad de optimizar la eficiencia energética. Los avances en las pruebas eléctricas pueden ayudar a identificar áreas de mejora en los transformadores, permitiendo diseños más eficientes y sostenibles que se adapten a las demandas cambiantes del mercado y las regulaciones ambientales.

## Planteamiento del Problema

Un laboratorio de pruebas eléctricas suele estar equipado con diversos equipos como generadores de tensión, amperímetros y ohmímetros, y permite probar el funcionamiento correcto de los equipos eléctricos, como: los interruptores, los relés y los motores, los transformadores, los sistemas de protección y seguridad, entre otros (Anderson & Thomas, 2023).

Es decir que, los laboratorios de pruebas eléctricas son importantes para garantizar que los equipos eléctricos sean seguros y que funcionen correctamente, por lo que son utilizados también por las entidades reguladoras para verificar el correcto funcionamiento de los equipos antes de autorizar su instalación e inclusive durante los procesos de diseño, dado que pueden ayudar a los fabricantes a identificar y corregir problemas de diseño o fabricación. También pueden ayudar a los clientes a seleccionar equipos eléctricos seguros y confiables, de acuerdo con sus requerimientos técnicos particulares (Ocoleanu et al., 2022).

Para ser reconocidos, los laboratorios de pruebas eléctricas suelen estar acreditados por organizaciones nacionales o internacionales que acreditan el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos. De acuerdo con Yuan et al. (2022), algunos ejemplos de esas pruebas incluyen:

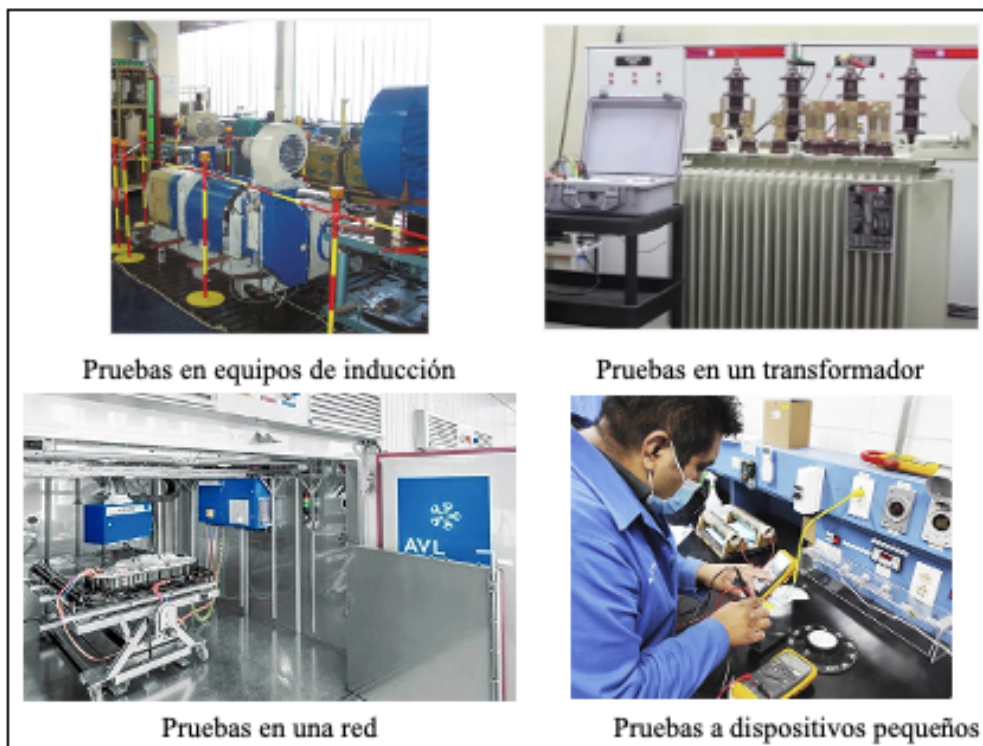
- Pruebas de seguridad: para garantizar que los equipos eléctricos sean seguros de usar. Pueden incluir pruebas de resistencia al aislamiento, resistencia a la tensión y resistencia a la corriente.
- Pruebas de rendimiento: buscan verificar que los equipos eléctricos funcionen correctamente, y se aplican mediante pruebas del funcionamiento de los interruptores, relés y motores, entre otros.

- Pruebas de cumplimiento: para comprobar que los equipos eléctricos cumplan con los estándares de seguridad y rendimiento establecidos por la normatividad que les aplique en cada caso.

En la Figura 1 se ilustran algunos ejemplos de instalaciones de laboratorios de pruebas eléctricas, cada uno con aplicaciones en diferentes equipos y tipos de pruebas.

### Figura 1

#### *Ejemplos de Configuraciones de Laboratorios de Pruebas Eléctricas*



*Fuente.* imágenes tomadas de Electrotec (2023), Direct Industry (2023), Híbridos y Eléctricos (2023), Avanza Ingeniería (2022)

Ahora bien, la electrónica de potencia es un área de la ingeniería que está estrechamente relacionada con los laboratorios de pruebas eléctricas; esta área se ocupa del diseño, análisis y

funcionamiento de dispositivos y sistemas que convierten, controlan y distribuyen energía eléctrica (Garrido, 2022).

Los transformadores son componentes críticos en los sistemas eléctricos, responsables de convertir la energía eléctrica de un nivel de voltaje a otro. Para garantizar su correcto funcionamiento, seguridad y confiabilidad, es fundamental realizar pruebas periódicas a los transformadores de media y baja tensión. Estas pruebas ofrecen diversos beneficios, empezando porque permiten identificar fallas potenciales en los transformadores antes de que provoquen averías catastróficas, interrupciones del servicio eléctrico o incluso accidentes graves; al detectar las fallas de manera temprana, se pueden tomar medidas correctivas oportunas para evitar daños mayores, prolongar la vida útil del transformador y reducir costos de mantenimiento. Así mismo, unos transformadores bien mantenidos y probados regularmente son más confiables y menos propensos a fallas, lo que reduce el riesgo de interrupciones del servicio eléctrico y accidentes, lo que, a su vez, se traduce en una mayor seguridad para las personas y las instalaciones, así como en una menor probabilidad de pérdidas económicas por cortes de energía.

Las pruebas también permiten evaluar el estado general del transformador, incluyendo su aislamiento, la condición de los devanados, el nivel de aceite y otros parámetros importantes. Con base en los resultados de las pruebas, se pueden realizar ajustes o reparaciones para optimizar el rendimiento del transformador y mejorar su eficiencia energética. La detección temprana de fallas y la realización de mantenimiento preventivo permiten evitar averías costosas y prolongar la vida útil del transformador. En muchos países, existen normas y regulaciones que obligan a realizar pruebas periódicas a los transformadores de media y baja tensión. El cumplimiento de estas normas es esencial para garantizar la seguridad de las instalaciones eléctricas y evitar sanciones legales.

En la

Tabla 1 se presenta la información correspondiente a varios de esos países, en diferentes continentes.

**Tabla 1**

*Países con Normas y Regulaciones Sobre Pruebas de Transformadores*

Continente	País	Norma
América	Argentina	Norma Técnica CPN-AR 77:2016 - "Condiciones de Seguridad de los Equipos Eléctricos de Potencia en Instalaciones de Usuarios"
	Brasil	Norma ABNT NBR 5410:2014 "Transformadores de Potência - Terminología"

Continentes	País	Norma
	Chile	Norma Chilena NSEG 16.E.n.78 "Transformadores de Potencia - Características y Requisitos Generales"
	Colombia	Norma NTC- NTC-IEC 60364-8-1:2019 "Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión"
	México	Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE/ENER-2012: "Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución"
	Perú	Norma Técnica Peruana NTP IEC. 60076-1 "Transformadores de Potencia - Métodos de Ensayo"
Europa	España	Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23
	Italia	Norma CEI 11-28:2014 - "Impianti elettrici a bassa tensione - Parte 28: Impianti elettrici in locali a rischio di esplosione o incendio"
	Portugal	Decreto-Lei n.º 185/2010, de 20 de agosto - "Regulamento de Segurança das Instalações e Equipamentos Eléctricos"
Asia	China	GB 11038:2015 - "Power Transformers - General Requirements"
	Japón	JIS C 5701:2016 - "Power Transformers"
	India	IS 2026 (Part 1):2019 - "Power Transformers - Part 1: General Requirements"

*Nota.* Elaboración propia

Los equipos utilizados en laboratorios de pruebas eléctricas incluyen fuentes de alimentación, multímetros, osciloscopios y analizadores de espectro, entre otros. Las técnicas de prueba utilizadas en esos laboratorios pueden variar en función del tipo de componente o sistema que se esté probando (Monzo et al., 2020). Sin embargo, algunas de las técnicas más comunes incluyen pruebas de voltaje, corriente, resistencia y frecuencia.

### **Formulación del Problema**

Por las anteriores razones, en este documento se propone explorar las publicaciones realizadas en países con mayor nivel de desarrollo de estos laboratorios para dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿qué avances se han presentado en los últimos cinco años a

nivel internacional en la aplicación de pruebas eléctricas de laboratorio para transformadores de media y baja tensión?

### **Justificación**

Existen varias razones por las que es importante investigar los avances en la electrónica de potencia en los laboratorios de pruebas eléctricas. En primer lugar, la electrónica de potencia es un campo en rápido y constante desarrollo (Ruiz, 2020), por lo que es deseable que los

laboratorios de pruebas eléctricas estén al tanto de los últimos avances para que puedan garantizar que sus pruebas sean precisas y relevantes. En segundo lugar, la electrónica de potencia se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, desde equipos industriales hasta dispositivos electrónicos de consumo (Cervantes, 2020), de manera que es recomendable que los laboratorios estén preparados para probar una amplia gama de dispositivos para garantizar que sean seguros y funcionen correctamente. En tercer lugar, algunas técnicas que se utilizan en esos laboratorios pueden ser complejas (Petersen et al., 2019), lo que hace necesario que los laboratorios de pruebas eléctricos de forma permanente se actualicen en el campo de la electrónica de potencia para poder realizar pruebas precisas y confiables.

De acuerdo con las anteriores razones, las investigaciones realizadas en temas de electrónica de potencia aplicada en laboratorios de pruebas eléctricas puede conducir al desarrollo de nuevos métodos de prueba que son más precisos y eficientes, el conocimiento de nuevos equipos aptos para probar una gama más amplia de dispositivos, y así entender mejor los dispositivos probados; lo que puede conducir a una interpretación más amplia de los resultados de las pruebas que se realizan, al diseño de nuevos protocolos de prueba y a la adquisición de los equipos más idóneos para las pruebas que se realizan en la actualidad, entre otros potenciales beneficios.

Los resultados del presente trabajo buscan aportar conocimiento que beneficie a los profesionales de la ingeniería electrónica, así como a los ingenieros electricistas, en la medida en que se genere información útil para el mejor desempeño de estas áreas del conocimiento. También se propone contribuir al avance de los laboratorios de pruebas eléctricas, así como a sus usuarios y a las entidades que se encargan de regularlos, de supervisarlos y de aprobar las pruebas que allí se realizan.

De manera específica, esta investigación se centra en las pruebas que se realizan a los transformadores de media y baja tensión, dado que estos equipos tienen diversos campos de utilización, tanto a nivel domiciliario como industrial. En efecto, estos dispositivos se instalan tanto en sectores residenciales como en empresas medianas y pequeñas que los necesitan para garantizar el suministro regulado y confiable de energía eléctrica.

De otro lado, los transformadores de media y baja potencia son componentes esenciales en los sistemas eléctricos, ya que cumplen con diversas funciones cruciales. Su función principal es transformar la energía eléctrica de un nivel de voltaje a otro, permitiendo que la electricidad se distribuya y utilice de manera segura y eficiente. Debe tenerse en cuenta que la electricidad se genera a voltajes altos para minimizar las pérdidas durante la transmisión a largas distancias. Sin embargo, para su uso en hogares, comercios e industrias, se requiere reducir el voltaje a niveles más bajos y seguros (Arora & Mosch, 2022).

Los transformadores proporcionan aislamiento galvánico entre los circuitos de entrada y salida, lo que significa que no hay conexión física entre ellos. Esto es crucial para la seguridad, ya que evita que la corriente eléctrica de alta tensión circule por los dispositivos conectados al circuito de baja tensión, protegiendo a las personas y equipos de posibles descargas eléctricas (Ragonese et al., 2021). Estos transformadores de media y baja tensión permiten adaptar la energía eléctrica a las necesidades específicas de diferentes dispositivos y aplicaciones. Por ejemplo, los transformadores de baja potencia se utilizan en electrodomésticos, herramientas eléctricas, iluminación y equipos electrónicos, mientras que los transformadores de media potencia se emplean en sistemas de distribución eléctrica en edificios, comercios e industrias.

Al transformar la energía eléctrica a voltajes más altos para su transmisión, se reducen las pérdidas de energía por calor en los cables conductores, lo que se traduce en un uso más eficiente

de la energía eléctrica y menores costos de transmisión. Adicionalmente, los transformadores ayudan a regular el voltaje en los sistemas eléctricos, asegurando que los dispositivos conectados reciban un suministro de energía estable y constante (Alfonso et al., 2024); esto es fundamental para el correcto funcionamiento de equipos electrónicos sensibles a las variaciones de voltaje.

Las pruebas de laboratorio en transformadores de baja y media tensión buscan garantizar su funcionamiento seguro y confiable en la red eléctrica; en primer lugar, esas pruebas contribuyen a la seguridad del suministro eléctrico al asegurar que los transformadores operen dentro de los parámetros establecidos, con lo que se evitan interrupciones en el suministro que podrían afectar a usuarios industriales, comerciales y residenciales. Además, las pruebas de laboratorio permiten identificar defectos ocultos en los transformadores, que podrían no ser visibles a simple vista. Detectar estos problemas antes de que causen fallas catastróficas es crucial para evitar costosas reparaciones y tiempos de inactividad no planificados.

Estas pruebas también son importantes para optimizar el rendimiento de los transformadores, dado que proporcionan información detallada sobre su eficiencia energética, capacidad de carga y resistencia al estrés. Esto permite a los operadores y propietarios maximizar la vida útil de sus transformadores y minimizar los costos operativos. Además, aplicar pruebas de laboratorio ayuda a cumplir con las normativas y estándares de seguridad, que requieren pruebas periódicas de transformadores para garantizar su conformidad con los requisitos establecidos. En caso de problemas de funcionamiento, las pruebas de laboratorio permiten diagnosticar la causa subyacente con precisión, lo que facilita la toma de medidas correctivas adecuadas y la prevención de futuras incidencias.

Todo lo anterior indica que las pruebas de laboratorio son fundamentales para garantizar la seguridad, confiabilidad y rendimiento óptimo de los transformadores de baja y media tensión

en la red eléctrica, debido a que proporcionan información crítica para su mantenimiento y operación adecuados.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar los avances en la aplicación de pruebas eléctricas de laboratorio para transformadores de media y baja tensión a nivel internacional en los últimos cinco años.

### **Objetivos Específicos**

Describir las características de funcionamiento que determinan el desempeño de los transformadores de media y baja tensión.

Realizar una búsqueda sistemática de literatura publicada en los últimos cinco años a nivel internacional sobre la evolución de las pruebas realizadas a transformadores de media y baja tensión en los laboratorios de pruebas eléctricas

Caracterizar los equipos y protocolos que se utilizan actualmente a nivel internacional en los laboratorios de pruebas eléctricas para transformadores de media y baja tensión.

### **Metodología**

Para este trabajo se realizó la búsqueda, selección, análisis y síntesis de la literatura (Paul et al., 2021), tanto en idioma español como en inglés, para identificar publicaciones especializadas y/o académicas en las que se dé cuenta del tema objeto del presente trabajo. Esta búsqueda se centró en publicaciones realizadas durante los últimos cinco años, con el propósito de garantizar la vigencia de los hallazgos.

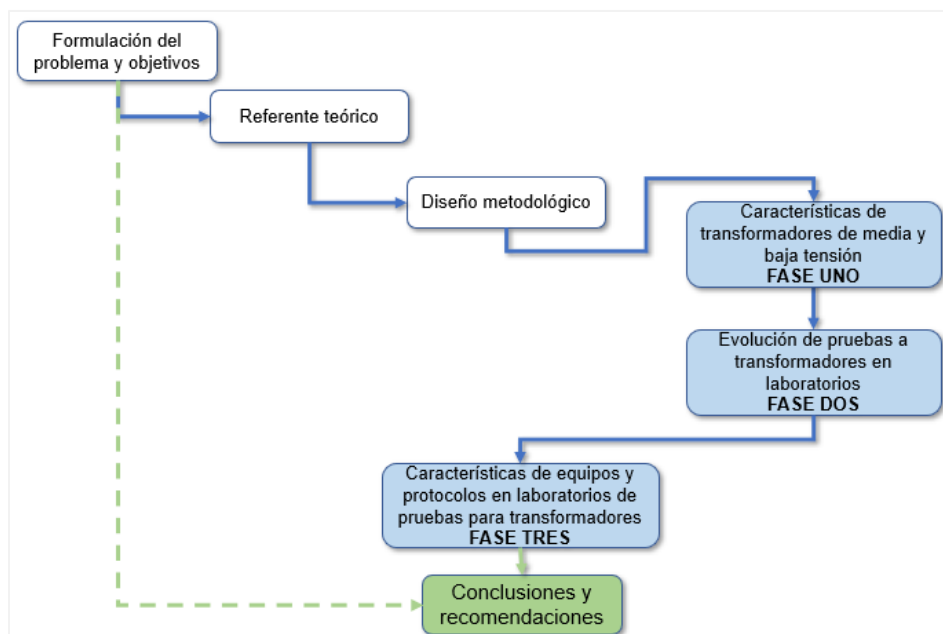
La técnica investigativa seleccionada es la revisión sistemática bajo el modelo Prisma (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), un enfoque metodológico utilizado para realizar revisiones sistemáticas de la literatura científica (Sánchez et

al., 2022). Se escoge este modelo debido a que proporciona pautas detalladas para la planificación, ejecución y presentación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. La revisión sistemática es un método de síntesis de la evidencia científica disponible sobre un tema específico; su objetivo principal es realizar una búsqueda exhaustiva y sistemática de la literatura, identificar y evaluar críticamente todos los estudios relevantes, y resumir la evidencia de manera objetiva (Zhang et al., 2020).

La secuencia que se siguió para el desarrollo de los objetivos previstos, se muestra en la Figura 2.

## Figura 2

### *Fases de la Investigación*



*Nota.* Elaboración propia

Este proceso permitió identificar las principales tendencias, teorías, enfoques metodológicos, hallazgos y debates dentro del campo de estudio abordado, así como identificar

procesos actuales o tendencias futuras de investigación para el desarrollo de pruebas de transformadores de media y baja tensión.

## Marco Conceptual y Teórico

Teniendo en cuenta que el presente trabajo busca analizar los avances en la aplicación de pruebas eléctricas de laboratorio para transformadores de media y baja tensión a nivel internacional en los últimos cinco años, se presenta a continuación el marco conceptual y teórico que se requiere para este fin.

### Electrónica de Potencia

La sociedad moderna, con sus comodidades, depende en gran medida de la disponibilidad ubicua de energía eléctrica. La electricidad se utiliza para realizar la mayor parte del trabajo físico, proporciona calefacción e iluminación, activa procesos electroquímicos y facilita la recopilación, el procesamiento, el almacenamiento y el intercambio de información (Paliza et al., 2021).

La electrónica de potencia puede definirse como una rama de la ingeniería eléctrica dedicada a la conversión y control de la energía eléctrica, utilizando convertidores electrónicos basados en interruptores de potencia semiconductores. La red eléctrica entrega un voltaje de CA de frecuencia y magnitud fijas. Por lo general, los hogares, oficinas, tiendas y otras instalaciones pequeñas se abastecen de líneas eléctricas monofásicas de bajo voltaje, mientras que en plantas industriales y otras grandes empresas comerciales se encuentran disponibles sistemas de suministro trifásicos con varios niveles de voltaje. La energía eléctrica de voltaje fijo de 60 Hz (50 Hz en la mayor parte del resto del mundo) puede considerarse como energía bruta, que para muchas aplicaciones debe acondicionarse (Ehsani et al., 2021)<sup>1</sup>. El acondicionamiento de energía

---

<sup>1</sup> La frecuencia estándar de 60 Hz se utiliza principalmente en países de América del Norte, América Central y algunas partes de América del Sur, así como en algunas partes de Asia y África. Por ejemplo, países como Estados Unidos, Canadá, México, Colombia, Venezuela, Taiwán, Filipinas y Arabia Saudita, entre otros, utilizan una

involucra la conversión, de CA a CD o viceversa, y el control de la magnitud y/o frecuencia de voltajes y corrientes.

Utilizando la iluminación eléctrica como ejemplo sencillo, se puede alimentar directamente una bombilla incandescente con la energía bruta, es decir, energía sin transformar (Sheng et al., 2021). Sin embargo, una lámpara fluorescente requiere de un balastro electrónico que inicia y estabiliza el arco eléctrico. El balastro es, por tanto, un acondicionador de energía, necesario para el correcto funcionamiento de la lámpara. Si se usa en una sala de cine, la bombilla incandescente mencionada anteriormente se abastece desde un controlador de voltaje de CA que permite atenuar la luz justo antes de que comience la película. Nuevamente, este controlador constituye un ejemplo de acondicionador de potencia o convertidor de potencia. El suministro de energía continua suele obtenerse de baterías y, cada vez más, de fuentes fotovoltaicas y pilas de combustible. Los sistemas de energía fotovoltaica suelen estar conectados a la red, y el acondicionamiento de la señal implica la conversión de voltaje de CC a CA y el control del voltaje de CA. Si una fuente de CC alimenta un motor eléctrico, es necesario un convertidor electrónico de potencia entre la batería y el motor, el cual realiza el control de voltaje y facilita el flujo inverso de energía durante el frenado o el descenso.

El nacimiento de la electrónica de potencia se remonta a principios del siglo XX, cuando se inventaron los primeros rectificadores de arco de mercurio (Tan, 2020). Sin embargo, para la conversión y el control de la energía eléctrica, en el pasado se utilizaban principalmente convertidores de electromáquinas rotativas. Un convertidor de electromáquinas rotativas es un dispositivo que permite convertir la energía eléctrica en energía mecánica o viceversa en

---

frecuencia de 60 Hz para la generación de energía eléctrica. En Europa y la mayor parte del resto del mundo, la frecuencia estándar es de 50 Hz (Alamri et al., 2021).

sistemas que involucran máquinas rotativas, como motores eléctricos, generadores y servomotores. Estos convertidores son utilizados en una variedad de aplicaciones industriales, desde sistemas de tracción en vehículos eléctricos hasta control de velocidad en maquinaria industrial. Los convertidores pueden tener diferentes configuraciones según su aplicación específica. A principios del Siglo XX en los motores eléctricos de corriente continua (CC) se empleaban conmutadores para convertir la corriente eléctrica en movimiento mecánico. Los generadores de corriente continua también eran comunes en esa época. Convertían la energía mecánica en energía eléctrica mediante la rotación de un rotor dentro de un campo magnético, produciendo corriente continua en el proceso (Zhang et al., 2021).

Un convertidor para una electromáquina era un generador eléctrico accionado por un motor eléctrico. Si, por ejemplo, se deseaba obtener voltaje de CC ajustable a partir de un voltaje de CA fijo, un motor de CA accionaba un generador de CC con voltaje de salida controlado. Por el contrario, si se requería voltaje de CA y la energía suministrada provenía de un paquete de baterías, se empleaba un motor de CC con velocidad controlada y un generador síncrono de CA. De acuerdo con Iqbal et al. (2023), la conveniencia, eficiencia y confiabilidad de tales sistemas eran inferiores en comparación con los convertidores electrónicos de potencia estática actuales que realizan conversión y control de energía inmóvil.

La electrónica de potencia actual comenzó con el desarrollo del rectificador controlado por silicio (en inglés, SCR), también llamado tiristor, por parte de General Electric Company en 1958. El SCR es un interruptor de potencia semiconductor unidireccional que se puede encender (“cerrar”) mediante un impulso eléctrico de baja potencia aplicado a su electrodo de control. Las clasificaciones de voltaje y corriente disponibles de los SCR son muy altas, pero el SCR es inconveniente para su uso en convertidores electrónicos de potencia de entrada de CC. Es un

interruptor semi controlado que, cuando conduce corriente, no se puede apagar (“abrir”) mediante una señal de puerta, como lo describe Shah (2020).

En las últimas décadas, se han introducido en el mercado varios tipos de interruptores de potencia semiconductores totalmente controlados que se pueden encender y apagar. La introducción generalizada de convertidores electrónicos de potencia en la mayoría de las áreas de distribución y uso de energía eléctrica es común en todos los países desarrollados. Los convertidores acondicionan la energía eléctrica para una variedad de aplicaciones, como accionamientos de motores eléctricos, sistemas de alimentación ininterrumpida, calefacción e iluminación, procesos electroquímicos y electrotérmicos, soldadura por arco eléctrico, líneas de transmisión de CC de alto voltaje, filtros de potencia activa y potencia reactiva, compensadores en sistemas de energía y fuentes de suministro de alta calidad para computadoras y otros equipos electrónicos (Alhamrouni et al., 2019).

Se estima que al menos la mitad de la energía eléctrica generada en Estados Unidos fluye a través de convertidores electrónicos de potencia, y se espera un aumento de esta proporción hasta cerca del 100% en las próximas décadas (İnci et al., 2021). La introducción de convertidores electrónicos de potencia en todas las etapas de la generación, transmisión y distribución de energía, junto con un amplio intercambio de información (“red inteligente”), permite un aumento espectacular de las capacidades de la red sin invertir en nuevas plantas de energía y líneas de transmisión.

También cabe destacar el importante papel de la electrónica de potencia en los sistemas de energía renovable y en los vehículos eléctricos e híbridos. Se puede decir con seguridad que prácticamente todo ingeniero electricista se encuentra con algunos convertidores de electrónica de potencia en su carrera profesional, como lo registra Rivera (2023).

La electrónica de potencia y las pruebas de laboratorio de transformadores de media y baja tensión están interconectadas en varios aspectos. Las pruebas de laboratorio de transformadores requieren fuentes de alimentación de alta potencia para aplicar voltajes y corrientes de prueba. En algunos casos, la electrónica de potencia se utiliza para generar estos voltajes y corrientes de forma controlada y precisa. Igualmente, la electrónica de potencia se utiliza para controlar los dispositivos de medición y los equipos de prueba utilizados en el laboratorio. Por ejemplo, los convertidores de señal pueden ser utilizados para acondicionar las señales de medición antes de ser registradas por los sistemas de adquisición de datos. En algunas pruebas de transformadores, se simulan cargas utilizando bancos de resistencias o cargas electrónicas controladas por electrónica de potencia. Estas cargas simuladas permiten evaluar el rendimiento del transformador bajo diferentes condiciones de carga (Ozdemir et al., 2021).

La electrónica de potencia también puede desempeñar un papel en la protección y seguridad durante las pruebas de transformadores. Por ejemplo, se pueden utilizar relés de protección electrónica para detectar condiciones anormales durante las pruebas y desconectar rápidamente el transformador para evitar daños (Ozdemir et al., 2021).

### **Laboratorios de Pruebas Eléctricas**

El proceso de desarrollo económico implica adquirir capacidades en el sector manufacturero local y apoyar a la industria con los recursos necesarios para cumplir con las exigencias internacionales impuestas por la competencia, como lo menciona Ramayah et al. (2020); además, las instalaciones locales son ahora más importantes para competir con otros países. Así mismo, el crecimiento industrial y económico de las sociedades modernas depende en gran medida de un suministro de energía ininterrumpido, que sólo es posible con una red confiable de transmisión y distribución alimentada por estaciones de red robustas. Una estación

de red consta de diferentes componentes, y la confiabilidad del equipo está garantizada mediante pruebas de control de calidad previas a la instalación y pruebas de mantenimiento posteriores a la instalación. Se ofrecen estas instalaciones de prueba en laboratorios especializados en ingeniería eléctrica, debidamente equipados con los últimos equipos de prueba y novedosas metodologías de prueba.

Los laboratorios, son responsables de mantener las pruebas y los estándares que cumplen con los requisitos de calidad internacionales y permiten que el equipo compita en los mercados globales. Además, a partir de las operaciones convencionales, los laboratorios también mejoran la seguridad económica a través de la competitividad industrial localizada y la innovación con tecnología avanzada en la industria eléctrica y electrónica, lo que conduce a un aumento de las exportaciones y, en última instancia, a un aumento de la calidad de vida.

Los laboratorios son esenciales para garantizar el cumplimiento del marco regulatorio y la conformidad con los requisitos del mercado. Estos laboratorios proporcionan datos e información importantes para una toma de decisiones confiable y transparente. Sus principales servicios incluyen inspección y certificación, garantizando al mismo tiempo consideraciones financieras, sociales y ambientales. Por lo tanto, la mayoría de las economías desarrolladas y en desarrollo mejoran sus capacidades de laboratorio mediante la extensión y el aumento para el desarrollo industrial y económico sostenible (Marchionni et al., 2020).

Siguiendo el cumplimiento de calidad, todos los equipos eléctricos en diferentes niveles de voltaje deben estar adecuadamente aislados, separando los circuitos de las conexiones a tierra para proteger las operaciones. Los materiales aislantes se componen de líquido, gas, aire, vacío o una base sólida (San Martín, 2022). Muchas normas que rigen las características de los equipos y el aislamiento eléctrico son responsabilidad de los fabricantes; sin embargo, los perfiles de nivel

de baja y alta tensión están sujetos a pruebas para garantizar la funcionalidad y protección del equipo. Aunque, el nivel de alta tensión – AT - varía para distintas regiones; según la Comisión Internacional de Electrónica IEC, un nivel de tensión superior a 1 kV se define como AT (en inglés HV) (Palacios, 2023).

Los numerosos beneficios que ofrece el sistema AT han llevado al desarrollo de sistemas de energía con tensiones de hasta 1200 kV. También exige la correspondiente progresión de la ingeniería de alta tensión, una ciencia experimental que requiere diversas pruebas de alta tensión para la validación de los equipos y la verificación de los cálculos. Cada equipo eléctrico de alta tensión tiene un nivel de alta tensión de funcionamiento/soporte estándar, hasta el cual el equipo puede soportar diversas sobretensiones y condiciones anormales sin degradar su rendimiento. Todos los equipos eléctricos, desde niveles de voltaje bajo hasta ultra alto, requieren aislamiento eléctrico para aislar los circuitos entre sí y de la tierra. Por lo tanto, las pruebas de alta tensión se realizan para medir el rendimiento de estos aislamientos en condiciones anormales/sobretensiones (Kuchanskyi et al., 2019). Las pruebas de alta potencia o cortocircuito (SC) validan la capacidad de conmutación, las tensiones térmicas y el rendimiento dinámico de los equipos eléctricos de alta tensión.

Los distintos componentes que constituyen un sistema de AT (generación, transmisión, subestaciones, etc.) deben someterse a diversas pruebas (de rutina, de tipo y especiales) para garantizar su rendimiento confiable al nivel de tensión requerido y su capacidad para soportar sobretensiones. como resultado de eventos como rayos o SC. En el contexto de sistemas de alta tensión, como generación, transmisión y subestaciones, se realizan diversas pruebas para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de los componentes. Las de rutina, son pruebas realizadas de manera regular durante la fabricación, instalación o mantenimiento de equipos

eléctricos; se centran en verificar la calidad y el funcionamiento básico de los componentes, e incluyen pruebas de continuidad, resistencia de aislamiento, pruebas de funcionamiento mecánico, pruebas de hermeticidad, etc. Estas pruebas se realizan según estándares y normativas específicas (Khan et al., 2022).

Por su parte, las pruebas de tipo son realizadas en un prototipo representativo de un tipo particular de equipo eléctrico, para demostrar que el equipo cumple con los estándares y especificaciones establecidas. Estas pruebas comprueban el rendimiento y la seguridad del equipo en condiciones específicas de operación e incluyen pruebas de cortocircuito, pruebas de carga, pruebas de estabilidad térmica, pruebas de vibración, etc. A su vez las pruebas son realizadas en situaciones específicas o para verificar características particulares del equipo. Pueden ser pruebas de diagnóstico, pruebas de aceptación en el sitio, pruebas de puesta en servicio, etc.; se adaptan a las necesidades particulares del proyecto o del equipo e incluyen pruebas de respuesta a sobretensiones, pruebas de impacto ambiental, pruebas de calidad de la energía, etc. (Valencia et al., 2023). Los laboratorios AT y SC proporcionan una plataforma para realizar estas pruebas de forma independiente para garantizar la confiabilidad de los equipos eléctricos AT fabricados.

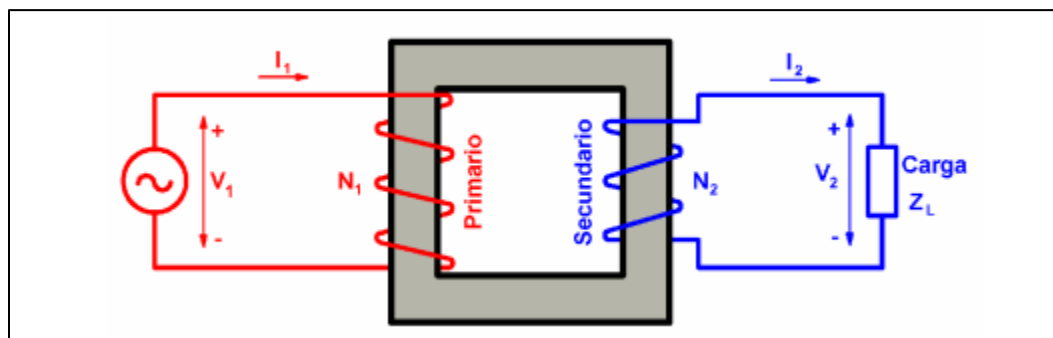
Según la norma ISO/IEC-17025, un laboratorio moderno de alta tensión y SC debe estar equipado con instalaciones de prueba capaces de determinar el diseño, la configuración y los materiales de diversos equipos de alta tensión, como generadores, disyuntores, transformadores, materiales de líneas de transmisión, estaciones de control y aisladores, cables y motores, para garantizar la confiabilidad, el rendimiento anticipado y la seguridad. Los equipos recién fabricados se pueden probar para garantizar la conformidad con las especificaciones de diseño con las normas nacionales e internacionales (Blaško et al., 2023).

## Transformador

De acuerdo con la descripción de Werle y Brendel (2021), se puede señalar que los transformadores corresponden a máquinas estáticas con dos devanados que poseen corriente alterna, y se encuentran arrollados sobre un núcleo magnético. El devanado por donde ingresa energía al transformador se llama primario, y el devanado a través del cual sale energía hacia las cargas<sup>2</sup>, las cuales son nutridas por el transformador que se llama secundario. El devanado primario posee  $N_1$  espiras y el secundario cuenta con  $N_2$  espiras. El circuito magnético de esta máquina lo conforma un núcleo magnético que no posee entrehierro, el cual no está hecho con hierro sólido sino con chapas de acero al silicio empaquetadas y separadas entre sí, como se puede observar en la Figura 3 a continuación.

### Figura 3

*Principio de Funcionamiento de Transformador Monofásico*



*Fuente.* Rodríguez (2018)

<sup>2</sup> La palabra carga hace alusión en este caso, a un componente que consume potencia. Se le denomina también carga de un transformador a la potencia que brinda. Por lo tanto, se manifiesta que un transformador se encuentra en carga cuando está brindando una potencia que no es nula por su devanado secundario.

Cuando se conecta una tensión alterna  $V_1$  al primario, corre o circula una corriente por el transformador que genera un flujo alterno en el núcleo magnético. Este flujo, con base en la Ley de Faraday, provoca en el secundario una fuerza electromotriz  $E_2$  que genera una tensión  $V_2$  en los bornes de este devanado. De esta forma, se logra transformar una tensión alterna de valor eficaz  $V_1$  en otra de valor eficaz  $V_2$  y de la misma frecuencia (Rodríguez, 2018).

Un transformador recibe la potencia nominal, cuando por medio de los bornes del devanado secundario viaja o pasa una corriente nominal debido a que se ha aplicado un voltaje nominal al devanado primario. El transformador deberá funcionar permanentemente de acuerdo con su capacidad nominal y bajo condiciones normales de trabajo u operación, y no deberá exceder los límites de incremento de temperatura, se expresa habitualmente en la unidad de potencia kilo voltamperio kVA o en Unidad de Capacidad del Transformador MVA (Granados, 2022).

Existen diversas estructuraciones de conexiones en un transformador trifásico de los devanados de media tensión y baja tensión, de acuerdo con el cual se categorizan por el grupo de conexión, y donde se señala la conexión de los devanados y la diferencia en ángulo entre las fases.

De igual forma, existen dos maneras más usadas de aislamiento en los transformadores de media tensión: i) transformador con aislamiento seco: la parte activa de los transformadores (es decir, el circuito magnético y los arrollamientos) se encuentra imbuido con resina epóxica; ii) transformadores que se encuentran sumergidos en aceite: se puede utilizar aceite vegetal o sintético (Granados, 2022).

Existen algunos transformadores de media tensión que pueden operar en condiciones de intensas de lluvia, polvo y humedades elevadas, y otros no; lo cual está supeditado al Índice de

Protección (IP) con que ellos cuenten. Los niveles de protección que deben cumplir las cubiertas que envuelven los equipos deben estar especificadas en las normas relativas a estos niveles de protección, a fin de impedir que sólidos y líquidos ingresen a dichos equipos generando perjuicios, y se encuentran clasificados para transformadores instalados en interiores y exteriores (Granados, 2022).

De acuerdo con el Grupo Inproel citado por Bravo y Ochoa (2022), solamente para la distribución eléctrica subterránea se usan transformadores, bien sea de clase monofásica o trifásica; en ambas clases se utilizan transformadores de tipo sumergible o de pedestal, estos últimos se conocen como *pad mounted*, los cuales poseen una protección que está incorporada en el primario, y a su vez tiene montado un pararrayos como salvaguarda frente a las sobretensiones, de los cuales se muestra un ejemplo en la Figura 4 a continuación.

#### **Figura 4**

*Transformador trifásico distribución eléctrica subterránea*



*Fuente.* Bravo y Ochoa (2022)

De igual forma, para esas redes eléctricas de configuración subterránea, se utilizan los materiales que se señalan a continuación.

Los transformadores de media tensión se utilizan para modificar el voltaje de electricidad de niveles altos a niveles intermedios, es decir, reduce la tensión de la electricidad. Por lo general, toma electricidad de la red de alta tensión (por ejemplo, 11 kV a 33 kV) y la reduce a un nivel más manejable para su distribución, que podría ser de 400 V a 1000 V (Kaczmarek & Stano, 2021). Estos transformadores se utilizan en subestaciones y en redes de distribución eléctrica para alimentar áreas residenciales, comerciales e industriales.

Por otro lado, el transformador de baja tensión es el que reduce aún más la tensión de electricidad para hacerla segura para su uso en hogares, comercios e industrias. Toma electricidad de la red de media tensión y la reduce a niveles que generalmente son de 230 V o 120 V, dependiendo del país y de la configuración del sistema eléctrico (Moutis & Alizadeh, 2020). Estos transformadores suelen estar ubicados en postes de electricidad cerca de los edificios o dentro de las instalaciones para alimentar los sistemas internos.

### **Cables de Media Tensión**

De igual forma, los transformadores para su funcionamiento poseen cables de media tensión, los cuales se muestran en la Figura 5. De acuerdo con el libro blanco de la instalación de cables de baja tensión (Prismian Group, 2018), la combinación de la tecnología utilizada para fabricar cables de alta tensión y la experiencia de dicho grupo empresarial, ha posibilitado la generación de un aislamiento para ser utilizado en la media tensión, que se realiza a base de Etileno-Propileno de Alto Módulo (HEPR), e inclusive lo han podido rebasar, ya que han podido funcionar a una temperatura de servicio de  $105^{\circ}\text{C}$ <sup>3</sup>, estos cables pueden transmitir más potencia

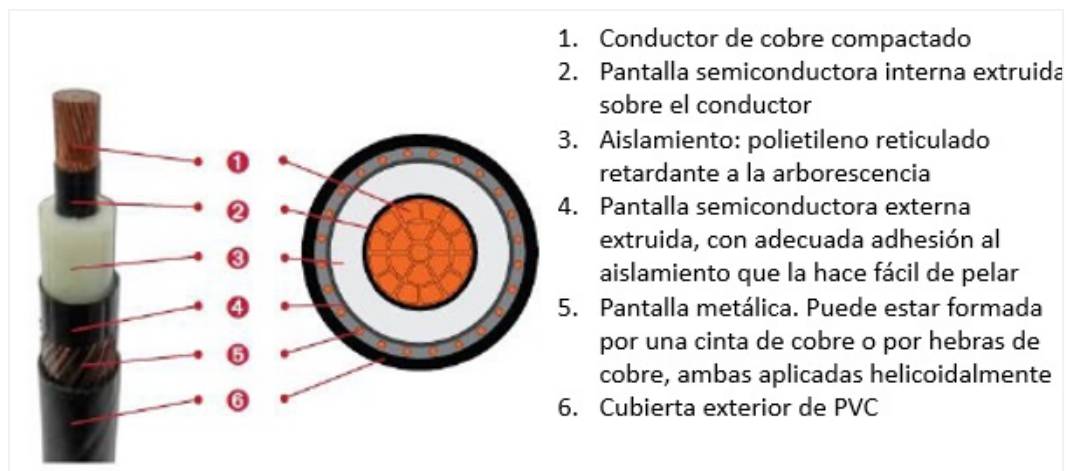
---

<sup>3</sup> La temperatura normal de funcionamiento de los transformadores de media y baja tensión depende de varios factores, incluyendo el diseño del transformador, la carga a la que está sometido, la temperatura ambiente y las condiciones de ventilación. Sin embargo, en general, se considera que la temperatura normal de funcionamiento de estos transformadores se encuentra entre los  $60^{\circ}\text{C}$  y los  $90^{\circ}\text{C}$ , con un punto caliente que puede alcanzar hasta  $105^{\circ}\text{C}$ . Estos son rangos generales y que la temperatura específica de operación normal puede variar según las

que cualquier otro cable de la misma sección, puesto que cuentan con unas dimensiones menores las cuales les permiten que el cable sea menos pesado y tenga mayor portabilidad y manejabilidad.

### Figura 5

#### *Cable de Media Tensión*



*Fuente.* Bravo y Ochoa (2022)

Esas redes eléctricas de baja tensión surgen de los centros de transformación para abastecer a los consumidores finales dentro de una zona geográfica pequeña, puesto que las pérdidas son bastante considerables cuando se maneja baja tensión. Casi siempre, el consumo final se realiza en baja tensión debido a motivos patentes de seguridad para los usuarios. En contraposición a las redes de distribución, diversos consumos en baja tensión son de tipo monofásico, primordialmente los que tienen que ver con usuarios de tipo tanto residencial como comercial, los cuales realizan la conexión entre dos fases o entre fase y neutro. Para ámbitos

---

especificaciones del fabricante y las condiciones de instalación del transformador. El monitoreo regular de la temperatura permite detectar anomalías y tomar medidas preventivas para evitar sobrecalentamiento, daños en el aislamiento y fallas prematuras del transformador. Es importante mantener la temperatura de los transformadores dentro de los rangos normales de operación para garantizar su correcto funcionamiento, prolongar su vida útil y evitar fallas.

rurales, las redes de baja tensión que provienen de un centro de transformación nutren de energía a un grupo o conjunto residencial, mientras que en un ámbito urbano a menudo alimentan a un bloque de pisos o apartamentos (Conejo et al., 2007). En la Figura 6 se presenta un esquema que ilustra el proceso desde la central eléctrica hasta los usuarios finales.

### Figura 6

*Transporte de Energía Desde la Central Eléctrica Hasta los Usuarios*

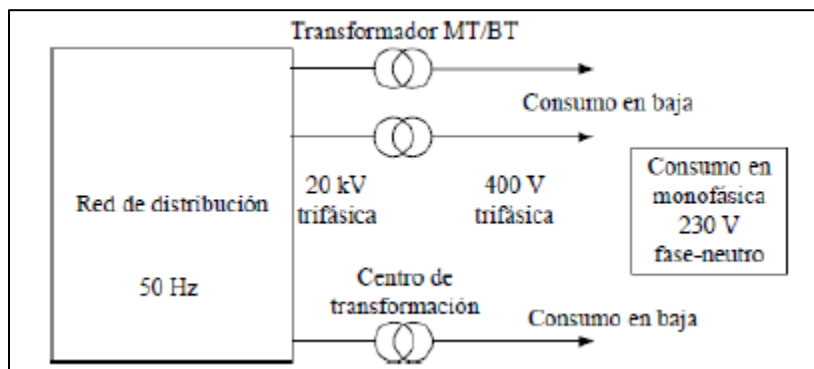


*Fuente.* Elaboración propia a partir de Tecno blog San Martín (2010)

Uno de los aspectos fundamentales en las redes de baja tensión, según Conejo, et al. (2007) tiene que ver con el sistema de salvaguarda de los usuarios, tal como se puede observar en la Figura 7 a continuación.

**Figura 7**

*Suministro en Baja Tensión por Medio de la Red de Distribución*



*Fuente.* Conejo, et al. (2007)

Los sitios de suministro a los clientes y sus respectivas redes de baja tensión integran de forma mecánica la protección distintiva y las salvaguardas para prever las sobretensiones y sobre corrientes, al igual que las apropiadas puestas a tierra de aquellos elementos que no posean energía (es decir accesibles al usuario), de los aparatos de consumo. La construcción de las redes de baja tensión se realiza con líneas subterráneas de cable aislado, al igual que con líneas aéreas, bien sea con conductor desnudo o con cable aislado (Bravo & Ochoa, 2022).

Con esos elementos básicos, se pasa ahora a las características generales de los transformadores.

### **Características Generales de un Transformador**

A fin de poder escoger el transformador apropiado, existen diversos fabricantes que brindan distintos modelos de acuerdo con los requerimientos de la instalación.

Uno de los aspectos que se deben considerar a la hora de escoger un transformador, es la clase de refrigeración externa. En el momento en que se presenta una sobrecarga, debido a un incremento en la tensión o la corriente que le aplica, o a causa de la temperatura del ambiente en

el entorno del transformador, la parte activa de éste (es decir el circuito magnético y los arrollamientos), se puede ver perjudicada por el aumento de la temperatura, generando una reducción del desempeño del transformador y poniendo en marcha la protección térmica; provocando, si se requiere, que se paralice el transformador. A fin de impedir este efecto, según Méndez (2018) se ha preferido tener en cuenta las alternativas que se señalan en la Tabla 2 a continuación.

**Tabla 2***Alternativas Para Impedir el Aumento de Temperatura del Transformador*

Alternativa	Descripción
Ventilación natural	Los transformadores que operan con esta clase de ventilación trabajan de acuerdo con el principio efecto chimenea. El aire caliente es menos denso que el frío, y éste se incrementa de manera natural combinándose con el aire del ambiente. Por lo tanto, es común poner un ingreso de aire frío en la parte más baja que se pueda del muro de entrada y salida de aire caliente. Conseguir que exista una ventilación natural, hace que se minimice el calentamiento del transformador, posibilitando lograr de éste su máximo beneficio. El sistema de ventilación del transformador se encuentra constituido por rejillas laterales conformadas por lamas, las cuales poseen un diseño que impide que ingrese agua de lluvia; de igual forma, tiene un costo menor que con la instalación de ventiladores. Como desventaja de este sistema, es que no siempre se puede aplicar en ambientes que presenten humedad elevada o bastante cantidad de polvo.
Ventilación forzada	Conlleva instalar unos ventiladores que posibiliten refrigerar el transformador frente a sobrecargas y sobrecalentamientos. En el momento de la instalación, si la carga o temperatura ambiente se exceden, existe una protección térmica que está conformada por una sonda que se encarga de medir de forma permanente la temperatura de las partes activas que integran el transformador. Esta sonda debe tener total alcance, a fin de que se encargue de generar la respuesta frente a un incremento de la temperatura con relación a su régimen nominal, y es la que se ocupa de dar la indicación para que entren en funcionamiento los ventiladores

*Nota.* En la tabla se muestran alternativas de ventilación, de acuerdo con Méndez (2018)

Ahora bien, existen diversas clases de transformadores, como se puede ver a continuación.

### **Clases de Transformadores**

**Otro de los aspectos que se deben analizar a la hora de escoger un transformador, es el modelo de construcción para su diseño, ya que, por medio de la descripción de las particularidades esenciales de los modelos constructivos de mayor uso, es que se puede tomar la determinación de cuál es el más conveniente. Dentro de los más utilizados están: transformador en baño de silicona, en baño de aceite mineral y en aislamiento en resina o seco, de los cuales se describen sus características en la**

Tabla 3 a continuación.

**Tabla 3***Clases de Transformadores sus Características y Desventajas*

Clase	Características y desventajas
Transformadores en baño de aceite	<p data-bbox="597 1115 1325 1354">La clase de elemento refrigerante de estos transformadores es aceite mineral. Las partes internas de estos transformadores se encuentran sumidas dentro de este material dieléctrico para mitigar el calor generado por el núcleo y para reducir las pérdidas a causa del calentamiento.</p> <p data-bbox="597 1365 1325 1654">Dentro de los aspectos ventajosos de este modelo, es que son económicos y son resistentes a las sobretensiones y sobrecargas. De igual forma, brindan más rendimientos que otras opciones de transformadores; también son más silenciosos y se pueden instalar a la intemperie, su construcción brinda flexibilidad de diseño.</p> <p data-bbox="597 1665 1325 1820">Sin embargo, el aceite refrigerante del cual está conformado posee una determinada reducida temperatura de inflamación, debido a que existe un riesgo de incendio con una</p>

Clase	Características y desventajas
Transformadores en baño de silicona líquida	<p>considerable liberación de humo; esto demanda que se deba incurrir en costos por mantenimiento, ya que se necesita realizar una supervisión del aceite a fin de controlar el proceso de envejecimiento con relación al aumento de la temperatura.</p> <p>Cuando existe presencia de líquido en el interior del transformador, demanda que haya un depósito en el cual se pueda recoger todo el aceite de éste, a fin de que, si existen fisuras, todo quede recogido dentro del depósito, y esto acarrea un aumento considerable del costo en la implantación o elaboración de dicho transformador.</p> <p>El elemento refrigerante de dichos transformadores son los aceites de silicona. Poseen excelentes propiedades eléctricas, las cuales son constantes al incrementarse la temperatura. Poseen un punto de inflamación más elevado que los aceites minerales. Tienen la particularidad de contar con buena estabilidad frente al calor y la antigüedad, por lo tanto, se puede utilizar en instalaciones que tengan el peligro de inflamación, ya que tiene una cualidad positiva frente a un incendio.</p> <p>Aunque, el costo que puede tener cada equipo es de un 30% o 40% más que los transformadores de aceite, también los transformadores con aceite de silicona líquida son bastante higroscópicos, es decir, tienen la capacidad de embeber o atraer humedad del medio circundante en forma de vapor.</p>
Transformadores en seco	<p>Estos transformadores tienen una tecnología que no necesita de líquidos tóxicos o dañinos. Dentro de sus características, es que tienen una estabilidad térmica que les posibilita contar con una vida útil más extensa, y también impedir el riesgo de incendios. Esta estabilidad térmica, posibilita que la productividad sea mejor, incluso, en un 40% por encima si se</p>

Clase	Características y desventajas
Transformador integral en aceite vegetal	<p>trabaja con enfriamiento forzado. No requieren mantenimiento.</p> <p>Desde la perspectiva eléctrica, su comportamiento es óptimo frente a los corto circuitos, aunque, posee una resistencia más reducida frente a las sobretensiones. Son transformadores compactos y silenciosos, por lo cual, se pueden ubicar cerca de los puntos donde se van a utilizar. De igual forma, brindan solidez y firmeza, por lo cual son elegidos casi siempre para entornos hostiles como, por ejemplo: elevada humedad, contaminación, salinidad, etc.</p> <p>Esta clase de transformadores son seguros para el medio ambiente, ya que como no tienen líquidos que contaminen, posibilitan que su labor sea efectuada sin que existan fugas, lo cual aporta a que el reciclaje sea más fácil.</p> <p>Dentro de las desventajas fundamentales, es que son costosos y generan bastante polución acústica. Se deben instalar dentro de paredes, ya que no se pueden instalar a la intemperie.</p> <p>Esta clase de transformador posee particularidades que respetan el medio ambiente. Esta nueva opción, consiste en un transformador hermético que está totalmente lleno de un fluido natural biodegradable, conformado por aceites vegetales de semillas de colza, soja y girasol.</p> <p>Dentro de las particularidades fundamentales de esta clase de aceites, se encuentra la capacidad térmica y sus propiedades de transmisión de calor, las cuales son mejores que las de los aceites minerales habituales, lo cual les posibilita que sean menos inflamables que el aceite mineral que se usa comúnmente. Además, la viscosidad es tres veces mejor que la de los aceites minerales; sin embargo, en su operatividad, este aspecto no es tan esencial. Una viscosidad superior, puede restringir las propiedades de refrigerante del</p>

---

Clase	Características y desventajas
	<p data-bbox="597 247 1198 327">fluido dieléctrico y hacer que se presenten mayores temperaturas al interior del transformador.</p> <p data-bbox="597 348 1318 730">Otras de las características esenciales, es que estos aceites son bastante higroscópicos, por lo tanto, se genera menor degradación del aceite por oxidación o absorción de la humedad. También, al ser este aceite un fluido biodegradable y poseer un punto de combustión e inflamación elevado, no se debe considerar la elaboración de fosos colectores, paredes de barrera y extintores automáticos de incendio, lo cual posibilita que se minimicen los costos económicos.</p> <p data-bbox="597 751 1318 1184">Un aspecto para considerar es el hecho de que el contacto con el oxígeno de la atmósfera provoca un efecto negativo, reduciendo las propiedades del dieléctrico, por lo cual, se ha escogido diseñarlo en sistemas herméticos. Esto, posibilita que se puedan instalar sin riesgo en sitios donde habitualmente no se imagina que se puedan utilizar, porque se pueden cumplir normas ambientales rigurosas. Este tipo de transformadores no requiere de mantenimiento y es más compacto, por lo tanto, su peso total es más reducido.</p> <p data-bbox="597 1205 1318 1688">Se puede señalar como desventaja, es que son transformadores que se encuentran en permanente evolución y no se conoce su fiabilidad con el tiempo, lo cual provoca que aún tienen un costo elevado y no tienen una buena aceptación aún. Así mismo, tienen la dificultad de que no poseen experiencia en cuanto a las concentraciones de gases y vida útil del aceite vegetal a largo plazo. Estos aceites están en maduración para transformarse en un apropiado y accesible líquido dieléctrico aislante hacia un futuro no tan lejano.</p> <p data-bbox="597 1709 1276 1835">Esta clase de ésteres naturales surgen como una responsabilidad que se tiene con la salvaguarda del medio ambiente, puesto que después de que los esterres naturales</p>

---

Clase	Características y desventajas
	cumplen con su vida útil como dieléctricos, se pueden reciclar con cierta facilidad para crear productos sustitutos como biodiesel y jabón.

*Nota.* En la tabla se muestran las clases de transformadores, sus características y desventajas, de acuerdo con Méndez (2018)

En vista de todas estas características, ventajas y desventajas, es necesario realizar un análisis detallado para seleccionar de manera óptima el transformador que se ajuste a los requerimientos específicos en este ámbito.

## **Características de Funcionamiento que Determinan el Desempeño de los Transformadores de Media y Baja Tensión**

El presente capítulo corresponde al desarrollo del primer objetivo específico de este trabajo.

### **Elementos Esenciales de Protección para los Transformadores de Media y Baja Tensión**

Habitualmente para los transformadores hasta 5 megavoltamperios (MVA) que se utilizan para media y baja tensión, se buscan proteger a través de fusibles para el lado de alta y un interruptor termomagnético para el lado de baja. Las protecciones se estiman en consideración con la curva del daño del transformador y el punto *inrush*<sup>4</sup>. Estas protecciones se realizan a través de un diseño especial y son: i) protegen el transformador del lado de la carga contra las condiciones de sobrecarga o cortocircuito; ii) Protegen al sistema contra las fallas internas del transformador.

Para la primera clase, es decir la protección del transformador del lado de la carga, se cuenta con dos tipos de protección: interruptores de baja tensión y fusibles, los cuales se muestran a continuación.

#### ***Interruptores de Baja Tensión***

Corresponden a interruptores térmicos o termomagnéticos, están supeditados a la capacidad del transformador, posee una manija para operarlo desde el exterior y una luz que indica su operatividad. El componente de clase térmica es susceptible a las corrientes de carga. El componente de tipo magnético identifica las corrientes de corto circuito en el secundario; según la capacidad y clase, muchos de estos interruptores se acoplan tanto en el disparo por

---

<sup>4</sup> Es la corriente transitoria de excitación que surge como una corriente de tipo pulsante cuyo valor máximo, habitualmente rebasa varias veces la magnitud de la corriente nominal del transformador.

sobre corriente (disparador a), en el disparo por cortocircuito (disparador n) o con retardo de tiempo (disparador z). Dentro de estos interruptores se encuentran los señalados a continuación.

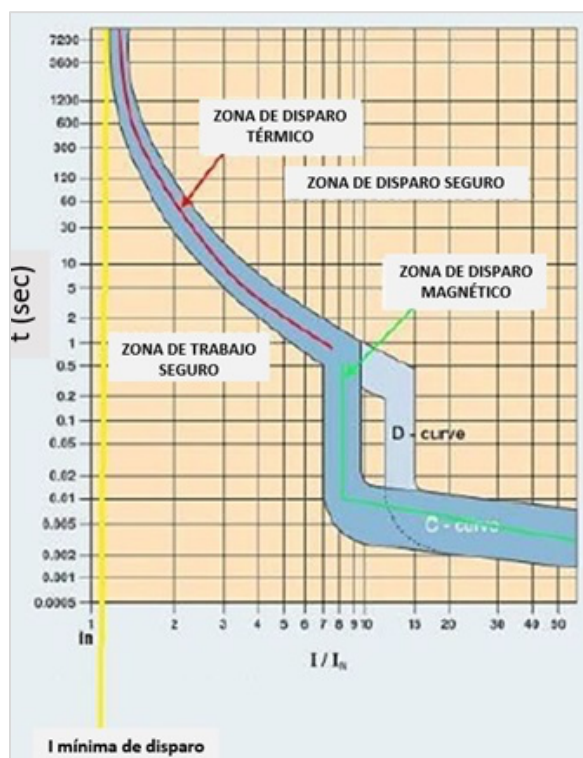
Los interruptores termomagnéticos corresponden a mecanismos usados para proteger los circuitos eléctricos contra cortocircuitos y sobrecargas, el funcionamiento de estos se fundamenta en dos de los efectos generados por la circulación de la corriente eléctrica en un circuito: el efecto magnético y el térmico (efecto Joule). Estos interruptores brindan protección térmica y protección magnética. La primera es aquella que protege al circuito contra sobrecargas, tiene la particularidad de que su disparo es a tiempo dependiente o inverso, lo que significa que, a mayor valor de corriente, es menor el tiempo de su actuación. La protección magnética es la que protege al circuito contra cortocircuitos, tiene la particularidad de que su disparo es a tiempo independiente, lo que significa que, a partir de determinado valor de corriente de falla, la protección se genera siempre al mismo tiempo de actuación.

De otra parte, estos interruptores presentan curvas de disparo, en las cuales se muestra el tiempo de disparo con base en la corriente de falla en amperios. Estas curvas están conformadas por dos partes; el disparo de protección contra sobrecarga es un mecanismo de disparo térmico, y cuanto más elevada sea la corriente, es más corto el tiempo del disparo. Y el disparo de protección contra cortocircuito: mecanismo de disparo magnético, si la corriente sobrepasa el umbral de su mecanismo de protección, el tiempo de corte será menor a 10 milisegundos.

En la Figura 8 a continuación se muestra como son las curvas de disparo de un interruptor termomagnético, en la cual se muestra una curva particular para un interruptor termomagnético, donde el eje vertical simboliza el tiempo de disparo ( $t$ ) y el eje horizontal la relación entre la corriente que pasa por el interruptor y la corriente nominal de éste ( $I/I_n$ ).

**Figura 8**

*Curvas de Disparo de un Interruptor Termomagnético*



*Fuente.* López y Sandoval (2021)

En el eje horizontal, el punto 1 simboliza la corriente nominal del interruptor, la línea amarilla muestra la corriente mínima de disparo, la cual es un poco superior que la corriente nominal. En esta curva se puede ver el área de disparo térmico y el de disparo magnético.

La curva inferior simboliza el tiempo mínimo para que las protecciones se disparen con base en la corriente que pasa por el interruptor, y la curva superior, simboliza el máximo tiempo que el interruptor tardará en dispararse. Para una intensidad fija, el lapso de tiempo que puede tardar el interruptor en dispararse se determina por el área entre las curvas inferior y superior (zona gris oscura de la curva), la cual se distingue como zona de incertidumbre.

La zona de trabajo seguro conforma el área que se encuentra por debajo de la curva inferior, el interruptor opera de manera segura sin dispararse, protegiendo el circuito si se llega a presentar una sobrecarga o cortocircuito. La zona de disparo seguro constituye el área por encima de la curva superior, cuando se llega a esta área, el interruptor ya debe estar abierto a fin de proteger el circuito, bien sea para contrarrestar sobrecargas o cortocircuitos

### ***Fusibles***

Hay variedad de clases de fusibles para efectuar las labores concretas de protección, según el uso para el cual se necesiten. Por ejemplo: para proteger un transformador se debe tener en cuenta: la curva de daño del transformador, la corriente transitoria de energización Inrush y la corriente de instauración o establecimiento de frio, es decir en el momento en que se energice bajo carga. A fin de proteger ramificaciones de circuitos (preferencialmente no deben ser utilizados en circuitos trifásicos), se estiman para la carga de la ramificación y según la adecuación de protecciones.

A continuación, se describen algunos de los fusibles que existen.

### ***Fusibles de Expulsión***

Estos fusibles, mientras dure la operación, realiza expulsión de gases para apagar el arco, y debe detener la falla en un intervalo igual o inferior que el tiempo que dura el primer ciclo para aislar el sistema. Esta clase de fusibles son de una capacidad baja de interrupción, se encuentran sumergidos en aceite y pueden ser de clase bayoneta (extraíble desde el exterior), como se muestra en la Figura 9, también puede operar al interior. Se instala en el lado de media tensión. Sus interruptores nominales son de 3500 A simétricos a 8,3 kv; 2500 A simétricos a 15,5kv, 1000 A @23kV.

## Figura 9

### *Fusible Tipo Bayoneta*



*Fuente.* López y Sandoval (2021)

Estos fusibles de acuerdo con su función se clasifican en fusibles sensibles a la corriente: únicamente a la corriente, como por ejemplo sobre corrientes y fallas en el secundario. Y fusibles sensibles a sobrecargas y a la temperatura del aceite: sensible a fallas secundarias, a corrientes exageradas de carga, corrientes de falla del transformador y a la temperatura del aceite.

De acuerdo con las características de construcción y los valores nominales, estos fusibles se clasifican como se señala a continuación.

### ***Fusibles Tipo K***

Se llaman fusibles con elemento veloz, poseen una relación de velocidad que cambia de 6 para sistemas de 6 amperios y 8 para los sistemas de 200 amperios.

### ***Fusibles Tipo T***

Poseen elemento lento. Tienen una relación de velocidad que es igual para todos los regímenes, de 10 y 13, respectivamente.

### ***Fusibles Tipo H***

Se denominan fusibles de elemento extra rápido. Tienen una relación de velocidad de 4 y 6.

### ***Fusibles Tipo Dual***

Son fusibles extra lentos, y tienen una relación de velocidad de 13 y 20 para 0,4 y 21 amperios respectivamente.

La relación de velocidad corresponde a la relación entre la corriente de fusión a 0,1 segundos y la de 300 segundos (para fusibles de capacidad superior a 100 amperios, se toma el valor de 600 segundos).

Del estudio de las características de los interruptores y fusibles convencionales, se puede señalar que, para la protección total del sistema se necesitan dos fusibles: uno para el transformador y otro para el sistema. Por lo cual, la solución corresponde a un fusible tipo DUAL, denominado de esta forma porque en el mismo elemento, están recopiladas la protección contra cortos y sobrecargas, cuyo provecho es que no se subutiliza la capacidad del transformador. El fusible de tipo Dual posee la característica de que en relación con el tiempo-corriente, es el mejor de todos los fusibles que se han desarrollado actualmente. También, posibilita que se utilice el transformador en su máxima capacidad de sobrecarga, con esta clase de fusible se respalda el poder remover de manera inminente el circuito si se llega a presentar una falla en el transformador. Por lo tanto, se recomienda su uso para conseguir la óptima protección e impedir salidas innecesarias y poder sobrecargar el transformador con su capacidad máxima.

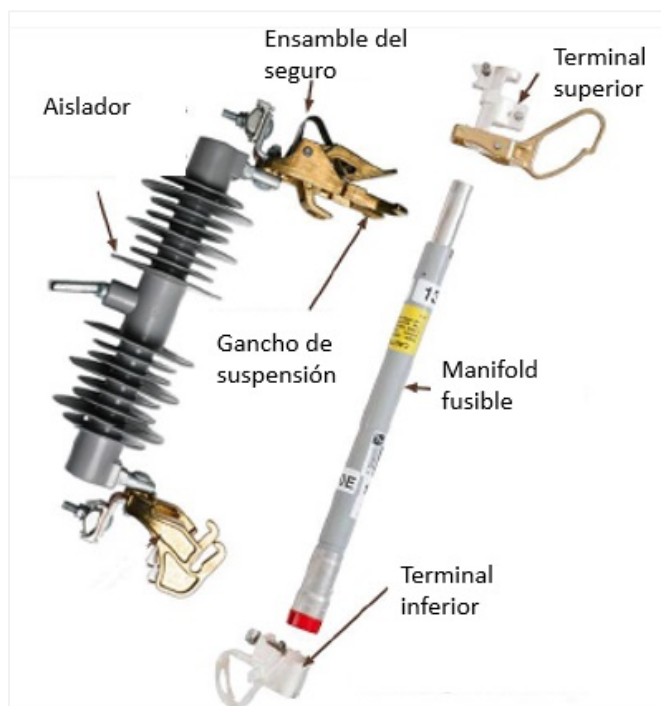
Para la segunda clase de protección (protección del sistema contra fallas internas del transformador), se cuenta con dos tipos de accesorios: Fusibles limitadores de potencia y fusibles limitadores de corriente.

### ***Fusibles limitadores de potencia***

Los cortacircuitos fusibles de potencia de clase SMD (Surface Mount Device) que significa dispositivo de montaje superficial, se usan para proteger los transformadores, las líneas, cables y bancos de capacitores ya a nivel de subestaciones de distribución y alimentadores aéreos. Los fusibles de potencia SMD-20 (ver Figura 10) con sus unidades de fusibles SMU, brindan protección a diversas fallas, localizan y detienen todas las fallas bien sea grandes, medianas o pequeñas hasta la corriente de fusión más pequeña, con voltaje de línea a línea o de línea a tierra en el fusible, si la falla se presenta en el lado primario o secundario del transformador sin tener en cuenta la clase de conexión de los devanados de dicho transformador.

#### **Figura 10**

*Fusible de Potencia SMD-20 Estilo Aéreo Para Punta de Poste*



*Fuente.* López y Sandoval (2021)

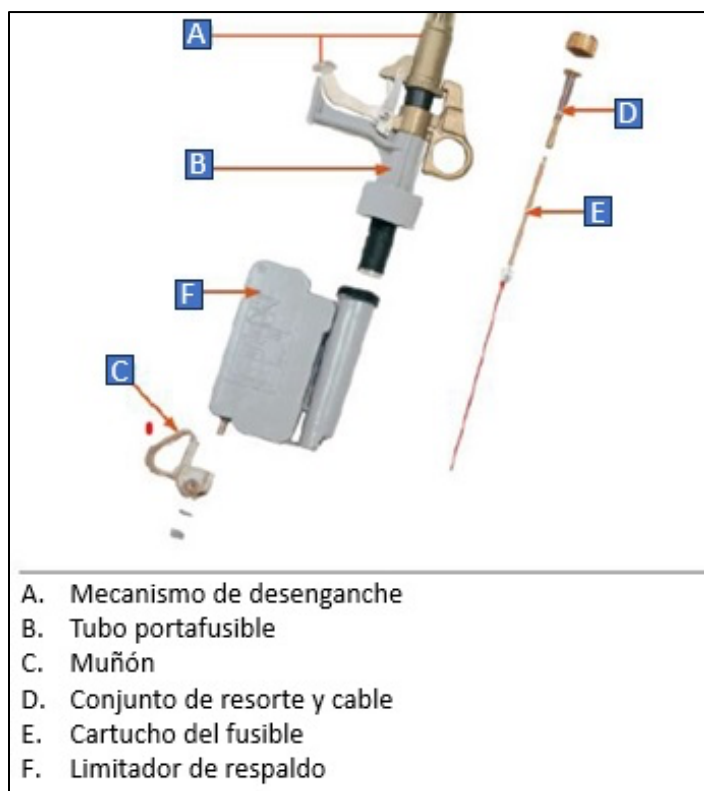
Estos fusibles SMD-20 poseen diseños de modalidad de montaje en los postes para utilizarlos en líneas aéreas, al igual que en tres distintos modelos tipo estación, se pueden usar para cargas hasta de 200 amperios a tensiones del sistema hasta de 34,5 kV. Usan tecnología de material sólido y baja energía para interrumpir fallas que provoca una expulsión inferior de gases y únicamente un 20% de la energía del arco de un cortocircuito habitual.

### ***Fusibles limitadores de corriente***

Los fusibles limitadores de corriente, entre tanto, se llaman así por el tiempo ágil de operación con que cuentan, tiene la capacidad de quitarle la energía al circuito en falla antes de que la corriente llegue a su máximo valor, a raíz de lo cual, los tiempos de fusión y apagado del arco eléctrico son menores a un cuarto de ciclo (5ms). Se utiliza en las instalaciones donde existe alta corriente de cortocircuito y no se puede generar una articulación apropiada, ya que diversos fusibles se disparan. Utilizar Fault Tammer restringe la corriente de cortocircuito haciendo más sencilla la articulación o coordinación. A fin de respaldar que los transformadores y cables de una subestación de potencia se debe contar con fusibles limitadores de corriente. En la Figura 11 se presenta un fusible limitador de corriente Fault Tammer

**Figura 11**

*Fusible de Potencia SMD-20 Estilo Aéreo Para Punta de Poste*



*Fuente.* López y Sandoval (2021)

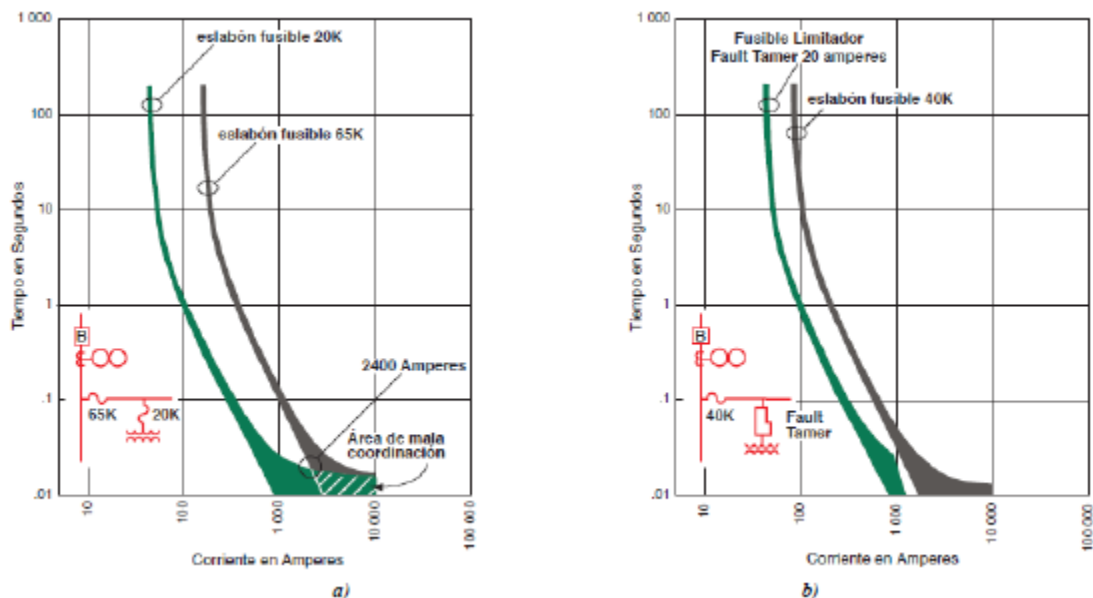
El Fault Tammer corresponde a un mecanismo que limita la energía para interrumpir fallas, se brinda una protección contra cortocircuitos al sistema, restringe la corriente de arco a un nivel que reduce al mínimo las fallas desastrosas en los transformadores generadas por fallas internas de grandes proporciones, y para reducir los daños provocados por fallas externas de magnitud elevada como los flameos en las boquillas. A raíz de lo cual, este tipo de fusibles son los que presentan una opción viable para las empresas que se encargan de distribuir energía frente a las operaciones de los cortacircuitos habituales mientras dura la suspensión por las fallas.

En la Figura 12 a y b se realiza un ejemplo gráfico del hecho de poseer un limitador de corriente Fault Tammer, el cual puede hacer que mejore la permanencia del servicio en caso de falla.

### Figura 12

a) *Coordinación Limitada del Fusible del Transformador con el Fusible Normal. B)*

*Coordinación Completa del Fault Tammer con el Fusible Ramal*



Fuente. López y Sandoval (2021)

Todas estas características de protección, especialmente en lo referente a los transformadores, son de vital importancia para la vida útil y desempeño de estos mecanismos que se deben tener en cuenta con total profundidad, para el óptimo funcionamiento de éstos.

Con base en lo registrado en este capítulo, se puede señalar que las características relevantes del desempeño de los transformadores de voltaje incluyen una variedad de aspectos que afectan su funcionamiento, eficiencia y confiabilidad. Algunas de las características más importantes son:

### ***Relación de transformación***

es la relación entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida del transformador y determina cómo el transformador ajusta el voltaje según las necesidades del sistema eléctrico. Se expresa de forma adimensional, por ejemplo 10:1.

### ***Eficiencia***

la eficiencia del transformador se refiere a la cantidad de energía eléctrica que se convierte de la entrada a la salida, en comparación con la energía perdida en forma de calor durante el proceso. Los transformadores más eficientes generan menos pérdidas y son más económicos de operar. Se expresa en porcentaje.

### ***Regulación de voltaje***

la capacidad del transformador para mantener un voltaje de salida constante dentro de un rango de carga especificado. Una baja regulación de voltaje significa que el transformador puede mantener el voltaje de salida estable incluso cuando la carga varía. La regulación de voltaje de los transformadores de corriente se expresa típicamente en porcentaje (%).

### ***Pérdidas***

los transformadores experimentan pérdidas de energía, principalmente en forma de pérdidas en el núcleo magnético y pérdidas en el devanado. Minimizar estas pérdidas es importante para mejorar la eficiencia del transformador. Las pérdidas de los transformadores de corriente se expresan típicamente en vatios (W).

### ***Capacidad de sobrecarga***

la capacidad del transformador para manejar cargas temporales o permanentes que exceden su capacidad nominal sin dañarse. Esto es importante para manejar picos de demanda en

el sistema eléctrico sin interrupciones. Esta capacidad de sobrecarga de los transformadores de corriente se expresa típicamente en porcentaje (%).

### ***Resistencia a cortocircuitos***

la capacidad del transformador para soportar corrientes de cortocircuito sin sufrir daños graves. Esto implica la protección del aislamiento y la capacidad de limitar las corrientes de cortocircuito para proteger el sistema eléctrico en su conjunto. La resistencia a cortocircuitos en transformadores de corriente se expresa en términos de impedancia, típicamente en ohmios ( $\Omega$ )

### ***Factor de potencia***

los transformadores ideales tienen un factor de potencia de 1, lo que significa que toda la energía entregada al transformador se convierte en energía útil. Sin embargo, en la práctica, los transformadores pueden tener un factor de potencia ligeramente inferior a 1 debido a las pérdidas. El factor de potencia de los transformadores de corriente se expresa como un valor adimensional, es decir, no tiene unidades asociadas. Es simplemente un número que indica la relación entre la potencia activa (en vatios) y la potencia aparente (en voltamperios).

### ***Nivel de ruido***

algunos transformadores pueden generar ruido debido a la vibración del núcleo magnético o del devanado. Un nivel de ruido bajo es importante en aplicaciones donde el ruido puede ser molesto o interferir con otros equipos sensibles. El nivel de ruido de los transformadores de corriente se expresa comúnmente en decibelios (dB).

## **Evolución de las Pruebas Realizadas a Transformadores de Media y Baja Tensión en los Laboratorios de Pruebas Eléctricas**

Para desarrollar este objetivo, cabe mencionar que existen diversas investigaciones que incorporan el desarrollo de pruebas y ensayos eléctricos especializados, como por ejemplo análisis de barrido de frecuencia (Pérez & Hernández, 2024), espectroscopia dieléctrica en dominio de frecuencia (Martínez, 2020), tangente delta (Arévalo & Espinoza, 2020), corriente de excitación (Núñez Ó. et al., 2023), análisis de gases disueltos en aceite y análisis físico químicos (Freire et al., 2023), las cuales buscan hallar una falla particular dentro de la parte activa del transformador (el circuito magnético y los arrollamientos) antes de poner a trabajar éste, inclusive para mejorar su vida útil durante el tiempo en que sea utilizado. Los investigadores analizados, presentaron distintos métodos auténticos y eficaces para ser utilizados, a través de metodologías, análisis, demostraciones, cálculos y ensayos, con un óptimo impacto dentro del sector energético en relación con la detección de fallas de los transformadores.

Sin embargo, la línea de tiempo de esta evolución se presenta en la Figura 13.

**Figura 13***Línea de Tiempo de la Evolución en las Pruebas de los Transformadores*

Año	Hito
1831	Michael Faraday descubre la inducción electromagnética, principio fundamental para el funcionamiento de los transformadores.
1881	Lucien Gaulard y William Gilbert presentan el primer transformador práctico, aunque con baja eficiencia.
1885	William Stanley inventa un transformador con núcleo de hierro, mejorando significativamente la eficiencia.
1900	Se estandarizan las pruebas de transformadores para garantizar su seguridad y rendimiento.
1910	Se desarrollan las primeras pruebas de alta tensión para evaluar la capacidad de aislamiento de los transformadores.
1930	Se introducen las pruebas de impulso para simular las sobretensiones transitorias que pueden dañar los transformadores.
1940	Se desarrollan métodos de análisis armónico para evaluar el impacto de las corrientes armónicas en los transformadores.
1950	Se introducen las pruebas de vibración para evaluar la resistencia de los transformadores a las vibraciones mecánicas.
1960	Se desarrollan técnicas de diagnóstico avanzadas, como la cromatografía de gases y la prueba FRA (Frequency Response Analysis), para identificar fallas en los transformadores.
1970	Se introducen las pruebas de ruido acústico para detectar fallas mecánicas en los transformadores.
1980	Se desarrollan simuladores de red eléctrica para evaluar el rendimiento de los transformadores en diferentes condiciones de operación.
1990	Se introducen las pruebas de infrarrojos para detectar puntos calientes en los transformadores, lo que permite identificar fallas incipientes.
2000	Se desarrollan sistemas de monitoreo remoto para monitorear continuamente el estado de los transformadores en tiempo real
2010	Se introducen las pruebas de descarga parcial para detectar defectos en el aislamiento de los transformadores.

Año	Hito
2020	Se desarrollan técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático para analizar datos de pruebas de transformadores y predecir fallas potenciales.

*Nota.* Elaboración propia con base en Han et al. (2022) y Kahawatte (2020)

De acuerdo con Solorzano, G. (2018) las pruebas y ensayos que se efectúan a un transformador para detectar fallas en una fase anticipada, se deben llevar a cabo en la etapa anterior a la entrada en operación del equipo, destacando la realización de pruebas y ensayos habituales como: resistencia de aislamiento, relación de transformación, factor de potencia y rigidez dieléctrica para definir las condiciones laborales del transformador antes de su implementación.

De igual manera, con relación al uso de estas pruebas y ensayos rutinarios Parraga (2019) manifestó que el uso de estas pruebas respalda la determinación real de la vida útil del transformador, y señaló para su modelo de gestión de proceso indefinido como una fase inicial, y a este proceso lo llamó índice de salud del transformador.

Otro de los aspectos que se deben analizar a través de los ensayos o pruebas, tiene que ver con el hecho de la preservación de las condiciones del aceite dieléctrico, ya que es fundamental en la parte activa del transformador como medio aislante y refrigerante. La calidad de este aceite se definió a través de ensayos eléctricos como estudios físicos químicos y estudios de gases disueltos, o los análisis cromatográficos; de donde Carruitero y Otiniano (2020) consideraron que para poner en marcha el transformador, el aceite se debe recircular y precalentar a través del proceso de termo vacío para suprimir todas las impurezas que pueda tener el aceite o aquellas circunstancias que no son propias de la composición química del aceite dieléctrico, proceso que se debe efectuar antes de que el transformador se ponga en funcionamiento.

De igual forma, Carruitero y Otiniano (2020) estiman que es fundamental realizar el ensayo de ruptura dieléctrica, el cual define la cantidad de aguante del aceite sin que se presenten desintegraciones o rompimientos; así como efectuar otras pruebas fisicoquímicas, como: tensión interfacial, índice de neutralización, color, para definir la calidad del aceite dieléctrico antes de que entre en funcionamiento. Para efectuar estas pruebas, los autores usaron los parámetros de admisión de condiciones de aceptación que brinda la normativa de la American Society for Testing and Materials (ASTM) por sus siglas en inglés, es decir la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales<sup>5</sup>.

Cáceres (2017) señaló que parte del proceso referente a la toma de muestras del aceite dieléctrico se debe efectuar en el momento en que el aceite se encuentre caliente, para impedir valoraciones con un índice de error aumentado. Manifestó, igualmente que, las pruebas de gases disueltos se efectúan de forma directa con la temperatura que tiene cada gas generado, primordialmente los gases de mayor criticidad como: monóxido, dióxido de carbono, acetileno y etileno, lo cual se corrobora con la norma del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) IEEE C57.104.2019.

En relación con la temperatura, Quispe y Cabrera (2018) manifestaron que la gradiente temperatura se presentan igualmente, debido a las pérdidas en el entre hierro y en el núcleo, las cuales se presentan naturalmente en el transformador y se reflejan en la generación de calor. Aunque al presentarse una temperatura fuera de la norma de operación, estas temperaturas las pueden estudiar a través de ensayos o pruebas fisicoquímicas o cromatográficas.

---

<sup>5</sup> Humedad en el aceite: Método Normalizado ASTM D 1533. Número de Neutralización: Método Normalizado ASTM D 974, D 664 ó D 1534. Tensión Interfacial: Método Normalizado ASTM D 971 ó D 2285. Color; Método Normalizado ASTM D 1500 ó D 1524.

Sin embargo, García, Anyosa y Russel (2019) utilizaron diversidad de métodos como el método Duval, Rogers, IEC, Rogers Difuso, métodos enfocados para hallar una falla incipiente en la parte activa del transformador con base en los gases disueltos. Al respecto, Gouda, Salah y Hassan (2019) se encargaron de demostrar que el método de Duval es el más efectivo debido a su sencillez y eficacia en relación con la detección de fallas de gases. En dicho estudio se pudo demostrar que, por áreas en el triángulo de Duval transformado, esta prueba tuvo un nivel de certeza de un 85% a diferencia de otros métodos utilizados para identificar gases formados por el aceite dieléctrico de los transformadores, dentro de su investigación consideraron los gases como el acetileno y el etileno.

Con relación a ensayos especializados que define la humedad y la condición del papel o celulosa, se encuentra la investigación de Sidambarompoulé, et al. (2020) quienes manifestaron que utilizar el método de espectroscopia dieléctrica en dominio de la frecuencia, constituye uno de los métodos más eficientes, ya que su valoración no solamente abarca la frecuencia nominal de los 60 Hz de operación normal; sino que igualmente, en un nivel de frecuencia desde los 20mHz hasta los 100mHz, incrementando la variedad de estudios más exhaustivamente, de tal forma que se conseguirá más información con relación a las propiedades del aceite dieléctrico, como por ejemplo: la conductividad eléctrica, coeficiente de difusión y movilidad de aceite.

En la investigación de Jadav, Chandyma y Tapán (2014) se corrobora la conexión directa en cuanto a la humedad que se encuentra comprometida y el nivel de antigüedad del transformador o una falla de fábrica, a causa de que, a mayor humedad valorada en el papel, es una señal de que al transformador no se le ha efectuado un secado correcto y sellado en la fábrica; o en caso contrario, el transformador no ha sido valorado por ninguna clase de prueba habitual de mantenimiento durante su uso. Por lo tanto, Brncal, et al. (2020) dejan ver la

interpretación de la curva de humedad para el estudio de espectroscopia en el dominio de la frecuencia, donde cada nivel de la traza simboliza un punto que se puede estudiar en su función, y su evaluación se efectuó con base en el equipo de prueba Idax Megger, el cual se enfoca en la definición de la humedad comprometida y la conductividad del aceite.

Todas las anteriores pruebas eléctricas y ensayos especializados señalados permiten hallar con mayor eficacia, credibilidad y confianza las fallas en la parte activa del transformador de forma incipiente, es decir en su fase más temprana o anticipada, dejando ver la condición total de la parte activa del transformador antes de ponerlo en marcha, y le prestan atención y le otorgan prelación a la vida útil del transformador, aspecto fundamental en el sector de la energía (Rodríguez A. , 2022).

Por otra parte, se encuentra el estudio efectuado por Peñafiel, Otero y Pérez (2023), en el cual se efectúa un estudio correspondiente a la metodología utilizada por el Sistema de Análisis de Respuesta de Frecuencia (SFRA). Los autores señalan que el método respalda el descubrimiento de los más mínimos detalles y datos en toda la estructuración del equipo, que sirven de garantía de un apropiado diagnóstico de éste, y a través de dicho estudio se generan los mantenimientos proyectados de tiempos y costos más reducidos. El SFRA constituye una prueba que no es invasiva ni devastadora, posibilita definir el estado mecánico del transformador, utilizando señales de amplio espectro de frecuencia y baja energía, según lo señala el Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE) citado por Peñafiel et al. (2023).

La realización de la prueba en los transformadores de distribución que se escogió para este estudio permite corroborar la particularidad de alta sensibilidad de SFRA. En diversas oportunidades, las pruebas habituales de diagnóstico que realizan las industrias no logran evidenciar pequeños cambios en la estructura del equipo, generando que estas alteraciones

provoquen fallas e inclusive hagan que se deba retirar el equipo de la red. Si se logran determinar esas pequeñas fallas, los mantenimientos pueden llegar a corregir estas falencias, y de esta forma, respaldar que el transformador opere de manera idónea durante toda su vida útil. En observancia de estos aspectos positivos de este tipo de pruebas, se puede señalar que el ensayo SFRA brinda la ventaja de estudiar todas las estructuras del transformador, posibilitando que los tiempos usados en tareas de mantenimiento se reduzcan de manera importante, y, por lo tanto, también se reduzcan costos (Peñañiel et al., 2023).

Existe también una metodología de evaluación de los transformadores de potencia que sugiere definir la condición general del transformador a través de un índice de salud. Como primera medida, se debe señalar que el transformador de potencia (TP) conforma uno de los elementos fundamentales de las subestaciones de los sistemas eléctricos de potencia y simbolizan una inversión bastante costosa, llegando a valer hasta un 60% del costo total de la subestación (Ghoneim & Taha, 2020). Evaluar las condiciones de esta clase de transformadores, permite incrementar su disponibilidad al respaldar un seguimiento apropiado para extender su vida útil a través de procedimientos sistemáticos de mantenimiento y reparación (Bohatyrewichz et al., 2019). El estado de condición de un transformador que también se llama “estado de salud”, tiene incidencia por diversos factores, que abarcan; requerimientos de tipo químico, eléctrico y mecánico que trabajan de forma paralela (Gómez, 2015).

Distintos autores han sugerido soluciones para enfrentar los retos relacionados con la evaluación de un transformador de potencia durante su vida útil, al usar un criterio sin dimensiones como lo es el índice de salud (HI). El propósito es efectuar el seguimiento de la condición de los transformadores a través de un encausamiento total que relaciona resultados de observaciones en la parte operativa, inspecciones de campo, pruebas de laboratorio, cambiando

todo en información que sea útil y efectiva para tomar determinaciones (Selva, 2021). Evaluar o cuantificar un HI acarrea múltiples labores como, abarcar mediciones conseguidas de las pruebas, al tener en cuenta la clase y trascendencia de cada una de estas pruebas para valorar el estado del transformador.

Los sistemas de valoración de la condición del transformador están supeditados a la ejecución de diversas pruebas de dictamen eléctrico, físico y químico, que valoran criterios como: pruebas dieléctricas, valoración de descargas parciales, análisis de gases disueltos, temperatura del punto caliente, criterios de la calidad del aceite, vibraciones del tanque, así como del devanado y movimientos de este último (Benhmed et al., 2017). Por ejemplo, autores como Acuña y Gómez (2020), o Li y Dong (2019) han sugerido metodologías de valoración indirectas que estudian el material dieléctrico para estimar la vida útil del transformador.

Se define la vida útil de un transformador básicamente por su sistema de aislamiento que está vinculado con la clase de materiales dieléctricos que se usan, así como la manera en que fue fabricado éste (Prasojo et al., 2019). El sistema de aislamiento se diseña en fundamento a factores definidos por la forma y las particularidades de la parte activa (núcleo y devanados) y los gradientes de temperatura correspondientes (Jiménez & Gómez). La clásica vida útil de un transformador de potencia va entre unos 25 a 40 años, la cual está supeditada a la forma en cómo se trabaje dicho transformador (Soni & Mehta, 2021).

La vida útil que se espera de un transformador está vinculada a las fallas a las que se encuentre sometido éste, ya que estas fallas poseen la capacidad de acelerar el envejecimiento, al incrementar la posibilidad de falla y al minimizar el tiempo en que éste puede operar (Soni & Mehta, 2021). El Cigre se encargó de efectuar un estudio sobre las causas fundamentales de fallas de los transformadores en potencia, seguidas de una consecuencia catastrófica (Tenbohlen

& al., 2015). Este estudio mostró datos que señalan que el 45% de los cortes obligados de los transformadores, tenían que ver con modos de falla de tipo dieléctrico. De tal forma que, la evaluación del estado de los transformadores de potencia a través de HI les interesa a las entidades de servicios de energía a fin de mejorar su labor técnica y financiera, porque impiden, si es posible que se presenten fallas catastróficas (Islam et al., Calculating a health index for power transformers using a subsystem-based GRNN approach, 2018).

Dentro de la literatura se han generado planteamientos diversos para calcular un HI que tienen que ver con la supervisión del estado de esta clase de transformadores (Prasojo et al., 2019), (De la Fuente et al., 2018), (Li et al., 2018), (Islam et al., 2018). Los métodos que existen para realizar este cálculo, se pueden dividir en dos enfoques: i) enfoques tradicionales, que se fundamentan en una función lineal, donde, el HI se estima usando el promedio ponderado de distintas pruebas habituales y de diagnóstico, método que se distingue como la suma de puntajes ponderados (SPP) (Azmi et al., 2017); esta clase de enfoques deben enfrentarse a la falta de certeza para definir el peso de cada prueba (Ibrahim et al., 2016). ii) se han efectuado diversas sugerencias para estimar el HI usando métodos de inteligencia artificial (IA) (Benhmed et al., 2017).

Los enfoques que se basan en IA necesitan usar métodos de categorización o regresión fundamentados en datos, como por ejemplo, redes neuronales artificiales (Prasojo et al., 2019) (Ahmed et al., 2015), sistemas de inferencia neuro difusa adaptativos (Zeinoddini & Vahidi, 2016), máquinas de vectores de soporte (Mohamadeen et al., 2014) o parecidos. Los HI fundamentados en SPP son suficientemente admitidos e implantados por empresas de servicios públicos de energía; y los HI que se fundamentan en algoritmos de IA han sido usados dentro del medio académico.

Para un grupo de factores de diagnóstico, se diseña una base de datos de numerosos transformadores. Un HI determina la condición de cada transformador en dicha base de datos. La categorización HI puede ser efectuada por especialistas en servicios públicos, proveedores de servicios o métodos IA. La base de datos se fracciona en datos de entrenamiento y de prueba, los datos de entrenamiento se usan para el proceso de aprendizaje del método de IA. Dentro de dicho proceso, según Kittan, et al. (2018) los métodos de IA admiten el vínculo entre los factores de diagnóstico escogidos y el HI de los transformadores; después de que la fase de aprendizaje sea exitosa, el modelo de IA se hace válido a través de la equiparación entre el HI calculado del método de IA, con el valor de HI de los datos de prueba.

En la investigación se propuso la metodología novedosa para calcular un HI de los transformadores de potencia fundamentado en un enfoque de SPP, usando una base de datos que abarca pruebas diagnósticas de campo, acopiadas entre los años 1996 y 2018, efectuadas por una empresa de servicio. Los datos se obtuvieron de transformadores de potencia que operan en empresas de servicio público e industriales. Los datos se usaron tanto para establecer los HI de cada transformador, al igual que para efectuar el análisis de resultados. Los valores que se obtuvieron de los HI se compararon con los registros de cada transformador para estudiar la efectividad de dicha metodología, con el encausamiento del criterio de expertos. Se corroboró la efectividad del HI, al determinar de forma correcta la condición de los transformadores analizados, de acuerdo con los datos registrados de pruebas y estudios efectuados (Núñez et al., 2023).

## **Equipos y Protocolos que se Utilizan en los Laboratorios de Pruebas Eléctricas para Transformadores de Media y Baja Tensión**

Los laboratorios de pruebas eléctricas para transformadores de media y baja tensión son instalaciones especializadas diseñadas para llevar a cabo una serie de ensayos y análisis destinados a evaluar la calidad, seguridad y rendimiento de estos dispositivos esenciales en las redes eléctricas. Estos laboratorios emplean una variedad de equipos y protocolos específicamente diseñados para cumplir con los estándares internacionales y garantizar la fiabilidad de los transformadores. A continuación, se detallan los principales equipos y protocolos utilizados en estos laboratorios.

### **Analizador de Redes Eléctricas**

Este equipo permite realizar mediciones precisas de parámetros eléctricos como voltaje, corriente, frecuencia, potencia y factor de potencia, tanto en régimen permanente como transitorio. Este dispositivo es capaz de medir y registrar una variedad de variables eléctricas clave, incluyendo voltaje, corriente, frecuencia, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia y armónicos (Ding et al., 2020).

El analizador de redes eléctricas consta de varios componentes, como sondas de corriente y voltaje, un módulo de adquisición de datos, un procesador de señales digitales y una interfaz de usuario intuitiva. Estos componentes trabajan en conjunto para capturar datos precisos sobre el comportamiento eléctrico de un sistema, permitiendo a los ingenieros realizar diagnósticos precisos y tomar decisiones informadas sobre la gestión y optimización de la red eléctrica.

Una de las principales funciones del analizador de redes eléctricas es la monitorización en tiempo real del consumo de energía, lo que permite identificar patrones de carga, picos de demanda y posibles problemas de eficiencia energética (Ding et al., 2020). Además, este equipo es capaz de detectar y registrar eventos transitorios, como caídas de voltaje o sobretensiones, que pueden afectar la calidad y estabilidad del suministro eléctrico.

Otra función importante del analizador de redes eléctricas es la realización de análisis de armónicos, que permite identificar y cuantificar la presencia de armónicos en la red eléctrica. De acuerdo con Du et al. (2021), los armónicos pueden causar problemas como sobrecalentamiento de equipos, interferencias en sistemas de comunicación y degradación de la calidad de la energía, por lo que su detección temprana es crucial para prevenir daños y asegurar un funcionamiento óptimo del sistema eléctrico.

El uso de analizadores de redes eléctricas para realizar mediciones precisas de parámetros eléctricos como voltaje, corriente, frecuencia, potencia y factor de potencia, tanto en régimen permanente como transitorio, está regulado por varias normas técnicas internacionales que busca asegurar la precisión y consistencia de las mediciones y establecen los requisitos y métodos de prueba para estos dispositivos.

Esas normas son:

***IEC 61000-4-30***

Técnicas de Medición de la Calidad de Energía: define los métodos de medición y los niveles de precisión para parámetros de calidad de energía en sistemas de distribución de electricidad (Isotest, 2023).

***IEC 61010***

Requisitos de Seguridad para Equipos de Medición Eléctrica. Establece los requisitos de seguridad para los equipos de medición, control y laboratorio (Sirioired, 2023).

***IEEE 519***

Prácticas y Requisitos para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos. Proporciona directrices para el control de armónicos y la calidad de la energía en sistemas eléctricos (Electrofial, 2022).

***IEC 61557***

Requisitos para Equipos de Medición y Supervisión de Seguridad Eléctrica. Aplica a los equipos de prueba y medición para supervisar la seguridad de los sistemas eléctricos de baja tensión (Ditel, 2024).

***ISO 50001***

Sistemas de Gestión de Energía. Certificación del sistema de gestión energética ISO 50001. Proporciona un marco para gestionar la energía en las organizaciones (Pce Instruments, 2024).

Respecto de la metodología para la realización de las pruebas mediante el uso del analizador de redes eléctricas, ésta depende de la variable que se desee medir.

**Generador de Alta Tensión**

Utilizado para aplicar tensiones de prueba de alta intensidad a los transformadores, este equipo es esencial para evaluar la resistencia dieléctrica y la capacidad de aislamiento de los devanados y otros componentes internos. El generador de alta tensión es un equipo diseñado para generar tensiones de prueba de alta intensidad que se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo pruebas de resistencia dieléctrica y ensayos de aislamiento en componentes eléctricos

y sistemas de potencia (Pérez E. , 2021). Este dispositivo permite evaluar la capacidad de aislamiento y la resistencia dieléctrica de los equipos eléctricos, así como para garantizar su seguridad y fiabilidad en condiciones de operación reales (ver Figura 14).

### Figura 14

#### *Generador de Alta Tensión*



*Fuente.* Tomado de Electronic Diener (2023)

El generador de alta tensión consta de varios componentes, incluyendo un transformador de potencia, un sistema de control y protección, un rectificador de alta tensión y un circuito de salida. El transformador de potencia aumenta la tensión de la fuente de alimentación hasta alcanzar el nivel deseado, mientras que el rectificador convierte la energía de corriente alterna en corriente continua de alta tensión. El sistema de control y protección supervisa y regula el funcionamiento del generador, garantizando su operación segura y confiable (Pérez E. , 2021).

Una de las principales aplicaciones del generador de alta tensión es la realización de pruebas de resistencia dieléctrica en cables, transformadores, interruptores y otros equipos eléctricos. Durante estas pruebas, se aplica una tensión de prueba específica al equipo bajo

prueba y se monitorea su respuesta para detectar posibles fallos o debilidades en el aislamiento (Khamlichi et al., 2021). Esto permite identificar y corregir problemas de manera proactiva, evitando posibles fallos catastróficos en el futuro.

Además de las pruebas de resistencia dieléctrica, el generador de alta tensión también se utiliza en ensayos de aislamiento, donde se aplica una tensión continua durante un período prolongado para evaluar la capacidad de los materiales aislantes para soportar tensiones extremas sin perder sus propiedades eléctricas. Estos ensayos buscan garantizar la seguridad y fiabilidad de los equipos eléctricos en condiciones de operación normales y de emergencia.

El uso de generadores de alta tensión para aplicar tensiones de prueba de alta intensidad a los transformadores con el objetivo de evaluar la resistencia dieléctrica y la capacidad de aislamiento de los devanados y otros componentes internos está regulado por varias normas técnicas, a saber:

### ***IEC 60076-3***

Power Transformers - Part 3: Insulation Levels, Dielectric Tests, and External Clearances in Air. Define los niveles de aislamiento y las pruebas dieléctricas que deben realizarse en los transformadores de potencia (Enel, 2004).

### ***IEEE C57.12.90***

IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. Proporciona los procedimientos para realizar pruebas de transformadores de potencia y distribución (Amperis, 2024).

### ***IEC 60296***

Fluids for Electrotechnical Applications - Unused Mineral Insulating Oils for Transformers and Switchgear. Se centra en los aceites aislantes, esta norma también incluye

especificaciones sobre la capacidad de aislamiento y las pruebas necesarias para garantizar que el aceite cumple con los requisitos dieléctricos necesarios para su uso en transformadores (Enel, 2004).

### ***NTC 2207***

Transformadores de Tensión Inductivos. Esta norma colombiana establece los requisitos para transformadores de tensión inductivos, incluyendo definiciones y métodos de prueba para asegurar la integridad dieléctrica y la capacidad de aislamiento (ICONTEC, 2004).

La metodología para utilizar un generador de alta tensión en las pruebas a transformadores de baja y media tensión incluye los siguientes pasos principales:

#### ***Preparación del Equipo***

Revisión y calibración.

#### ***Configuración del Transformador***

conexión del transformador a prueba al generador de alta tensión. En transformadores trifásicos, cada fase debe ser probada individualmente.

#### ***Aplicación de la Tensión***

Incremento gradual de la tensión aplicada al transformador hasta alcanzar el nivel especificado por las normas aplicables y mantener esta tensión durante un tiempo predeterminado, generalmente un minuto, para evaluar la capacidad del aislamiento bajo condiciones de alta tensión.

#### ***Medición y Registro***

Medir y registrar la corriente de fuga y otros parámetros relevantes.

#### ***Análisis de Resultados:***

comparar los datos obtenidos con los valores de referencia y especificaciones técnicas (IME, 2018).

### **Cámara Termográfica**

Permite detectar y visualizar áreas de sobrecalentamiento en los transformadores, lo que puede indicar problemas como conexiones sueltas o deterioro de los aislamientos. La cámara termográfica es diseñada para detectar y visualizar diferencias de temperatura en objetos y superficies (Herraiz et al., 2020). Utilizando tecnología infrarroja, este equipo convierte las diferencias de temperatura en imágenes térmicas que pueden ser analizadas y utilizadas para identificar posibles problemas de sobrecalentamiento en equipos eléctricos.

La cámara termográfica consta de un sensor infrarrojo de alta resolución, una lente óptica, un procesador de imágenes y una pantalla de visualización. El sensor infrarrojo detecta la radiación térmica emitida por los objetos y la convierte en señales eléctricas, que luego son procesadas y convertidas en imágenes térmicas por el procesador de imágenes (Herraiz et al., 2020). Estas imágenes muestran diferentes colores o niveles de brillo para representar las variaciones de temperatura, permitiendo a los usuarios identificar fácilmente áreas de sobrecalentamiento o anomalías térmicas.

**Figura 15***Cámara Termográfica*

*Nota.* Tomado de Isotest (2023)

Una de las principales aplicaciones de la cámara termográfica en el sector eléctrico es la inspección de equipos y componentes eléctricos, como tableros de distribución, interruptores, cables y conexiones. Durante estas inspecciones, se utilizan las imágenes térmicas para identificar puntos calientes que pueden indicar problemas como conexiones sueltas, sobrecargas, deterioro de aislamientos o problemas de ventilación (Ullah et al., 2020). La detección temprana de estas anomalías permite a los técnicos tomar medidas correctivas antes de que se produzcan fallas catastróficas o interrupciones en el suministro eléctrico.

De acuerdo con Ullah et al. (2020), además de las inspecciones de equipos, la cámara termográfica también se utiliza en la inspección de instalaciones eléctricas, como subestaciones y líneas de transmisión. Estas inspecciones ayudan a identificar áreas de sobrecalentamiento causadas por cargas desbalanceadas, pérdidas de energía o problemas de diseño, lo que permite a los ingenieros optimizar la eficiencia y la fiabilidad de la red eléctrica.

El uso de cámaras termográficas para detectar y visualizar áreas de sobrecalentamiento en los transformadores está regulado por varias normas:

### ***IEEE Std 1188***

Proporciona pautas para la realización de inspecciones termográficas de transformadores y otros equipos eléctricos (Carr, 2020).

### ***IEC 60076-3***

Norma de la Comisión Electrotécnica Internacional que se centra en la evaluación térmica de los transformadores (Yelamanchi & Pandian, 2023).

### ***NFPA 70B***

De la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego de Estados Unidos incluye recomendaciones sobre el mantenimiento predictivo y preventivo de equipos eléctricos, incluyendo el uso de termografía infrarroja para identificar y corregir problemas antes de que ocurran fallos (White & Jamil, 2020).

### ***ISO 18434-1***

Ofrece una guía sobre la monitorización de la condición de los equipos mediante termografía infrarroja (Fernández et al., 2021).

## ***IEEE 142***

también conocida como la "Guía Verde", proporciona recomendaciones para la protección de sistemas de energía eléctrica, incluyendo el uso de termografía para la inspección de transformadores y otros componentes eléctricos (Hosseini et al., 2021).

La metodología para utilizar una cámara termográfica en la detección y visualización de áreas de sobrecalentamiento en los transformadores implica, en primer lugar, una inspección visual previa para identificar posibles áreas de interés, como conexiones, aisladores y otros componentes que podrían estar sujetos a fallos térmicos. Una vez identificadas las áreas a inspeccionar, se debe calibrar la cámara termográfica según las condiciones ambientales, como la temperatura ambiente y la emisividad de las superficies a examinar. Durante la inspección, es importante mantener una distancia constante y adecuada entre la cámara y el objeto, para asegurar la consistencia en las imágenes térmicas capturadas. La cámara puede moverse lentamente para permitir una captura completa y detallada de las posibles anomalías térmicas. Las imágenes obtenidas se analizan en tiempo real y se registran para un análisis posterior. Áreas con temperaturas significativamente más altas que el promedio circundante indican posibles problemas, como conexiones flojas o deterioro del aislamiento (Tractian, 2024). Estos puntos calientes son señales de advertencia de que es necesario un mantenimiento preventivo inmediato.

## **Equipo de Medición de Resistencia de Aislamiento**

Utilizado para medir la resistencia de aislamiento entre los devanados y entre los devanados y tierra, este equipo es esencial para evaluar la integridad de los aislamientos y detectar posibles problemas de humedad o contaminación. Este equipo realiza mediciones precisas de la resistencia eléctrica entre dos puntos de un material aislante, como cables,

transformadores o motores, proporcionando información crítica sobre su capacidad para prevenir fugas de corriente y cortocircuitos (Kang & Kim, 2020).

El equipo de medición de resistencia de aislamiento consta de un generador de corriente continua, un voltímetro de alta impedancia, una fuente de alimentación y un sistema de control y visualización. Durante una prueba de resistencia de aislamiento, se aplica una tensión continua entre los conductores o entre los conductores y tierra, y se mide la corriente resultante (Kang & Kim, 2020). La resistencia de aislamiento se calcula entonces dividiendo la tensión aplicada entre la corriente medida.

Una de las principales aplicaciones del equipo de medición de resistencia de aislamiento es la realización de pruebas de aislamiento en equipos recién instalados o en servicio para verificar su integridad y seguridad eléctrica (Haque et al., 2021). Estas pruebas ayudan a detectar posibles defectos de fabricación, daños mecánicos o contaminación que puedan comprometer el aislamiento y provocar fallas eléctricas.

Además de las pruebas de aislamiento en equipos individuales, el equipo de medición de resistencia de aislamiento también se utiliza en la inspección de sistemas completos, como paneles de distribución, subestaciones y líneas de transmisión. Estas pruebas permiten identificar áreas de riesgo potencial y tomar medidas preventivas para garantizar la seguridad y la fiabilidad del sistema eléctrico en su conjunto (Haque et al., 2021). Este equipo proporciona datos críticos para garantizar un funcionamiento seguro y confiable en diversas aplicaciones industriales y comerciales.

Las normas técnicas que se aplican en el uso de un equipo de medición de resistencia de aislamiento para medir la resistencia entre los devanados y entre los devanados y tierra son:

***IEEE Std 43-2000 (R2006)***

Proporciona los métodos estándar para realizar pruebas de resistencia de aislamiento en maquinaria rotativa (Mulyana et al., 2021).

***IEC 60034-27***

Especifica los procedimientos para la medición de la resistencia de aislamiento en máquinas eléctricas rotativas (Sedding et al., 2022).

***IEEE Std 400-2001***

Conocida como la "Guía para pruebas de campo y diagnóstico de cables eléctricos", incluye métodos para medir la resistencia de aislamiento y pruebas de índice de polarización (Merev et al., 2022).

***Resolución 180466 de 2007 del Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2007)***

Establece medidas para garantizar la seguridad en la operación de equipos eléctricos, incluyendo directrices para las pruebas de resistencia de aislamiento.

La metodología para utilizar un equipo de medición de resistencia de aislamiento implica la preparación del equipo y del entorno, asegurándose de que el equipo de medición esté calibrado, apagar y desconectar el equipo a probar para garantizar la seguridad, conectar el medidor de resistencia de aislamiento a un devanado y el otro terminal al devanado adyacente o entre los devanados y tierra, seleccionar la tensión de prueba adecuada en el medidor, generalmente en el rango de 500V a 5000V dependiendo del equipo, y finalmente aplicar la tensión y espere el tiempo predeterminado, generalmente de uno a diez minutos, para obtener una lectura estable. Se leen y registran los valores de resistencia mostrados por el equipo y se

comparan con las normativas y valores de referencia establecidos para determinar la condición del aislamiento. Los valores bajos de resistencia indican posibles problemas de humedad o contaminación en el aislamiento (Prado & Leonardy, 2022).

### **Analizador de Gases Disueltos en Aceite**

Este equipo permite analizar la composición de los gases disueltos en el aceite aislante de los transformadores, lo que proporciona información sobre posibles fallos internos y ayuda a prevenir averías mayores.

Este dispositivo realiza análisis del aceite aislante utilizado en los transformadores para detectar la presencia y la concentración de gases disueltos, los cuales son indicadores clave de posibles problemas internos en el transformador. El analizador de gases disueltos en aceite consta de un sistema de muestreo de aceite, un sistema de extracción de gases, un sistema de análisis y un sistema de visualización de resultados. El sistema de muestreo recoge muestras de aceite del transformador, mientras que el sistema de extracción elimina los gases disueltos de la muestra.

**Figura 16***Analizador de Gases*

*Nota.* Tomado de Proinstra (2023)

Luego, el sistema de análisis separa y cuantifica los gases disueltos presentes en la muestra, utilizando técnicas como cromatografía de gases o espectrometría de masas (Ali et al., 2023). Finalmente, los resultados se muestran en un informe que proporciona información sobre la condición del transformador y posibles problemas internos.

Una de las principales aplicaciones del analizador de gases disueltos en aceite es la detección de fallas incipientes en el transformador, como sobrecalentamiento, arcos eléctricos, deterioro del aislamiento o contaminación. Los gases disueltos, como el hidrógeno, el metano y el etileno, se generan como resultado de estas fallas y se disuelven en el aceite aislante, lo que permite detectarlas antes de que causen daños mayores o fallos catastróficos en el transformador (Syafuruddin & Nugroho, 2020).

Además de la detección de fallas incipientes, el análisis de gases disueltos en aceite también se utiliza para evaluar la calidad del aceite y el estado general del transformador. Los cambios en la concentración y la composición de los gases disueltos pueden indicar la presencia de contaminantes, como agua, partículas sólidas o productos de degradación del aceite, que pueden afectar el rendimiento y la vida útil del transformador.

Para el uso de un equipo analizador de gases disueltos en aceite para analizar la composición de los gases disueltos en el aceite aislante de los transformadores, se aplican varias normas técnicas:

#### ***IEC 60599:2015***

Equipos eléctricos llenos de aceite mineral en servicio - Guía para la interpretación del análisis de gases disueltos y libres: proporciona directrices para la interpretación de los resultados del análisis de gases disueltos en el aceite (Fernández C. , 2022).

#### ***IEEE C57.104-2019***

Guía para la interpretación de gases generados en transformadores inmersos en aceite mineral: ofrece un marco para interpretar los gases generados en los transformadores y utiliza la cromatografía de gases disueltos en aceite para detectar y diagnosticar problemas potenciales (Gálvez, 2022).

#### ***ASTM D3612***

Método estándar de prueba para el análisis de gases disueltos en aceite aislante eléctrico mediante cromatografía de gases: define los métodos de prueba para medir la concentración de gases disueltos en el aceite, utilizando la cromatografía de gases para obtener resultados detallados sobre la condición del transformador (Juris, 2020).

La metodología para utilizar un equipo analizador de gases disueltos en aceite para analizar la composición de los gases en transformadores empieza con la extracción de una muestra representativa del aceite aislante del transformador en condiciones controladas para evitar contaminaciones externas. El aceite se prepara según las especificaciones del equipo analizador, generalmente filtrado y desgasificado para eliminar impurezas y gases libres. La muestra se introduce en el analizador, donde se lleva a cabo la cromatografía de gases. Este proceso separa y cuantifica los diferentes gases disueltos como hidrógeno, metano, etano, entre otros, presentes en el aceite. Los resultados se comparan con las normativas y guías establecidas, para evaluar la condición del transformador (Globecore, 2024). La presencia y cantidad de ciertos gases pueden indicar posibles fallas o degradaciones en el aislamiento.

### **Equipo de Medición de Pérdidas y Eficiencia**

Utilizado para medir las pérdidas de potencia y la eficiencia de los transformadores bajo diferentes condiciones de carga, este equipo es esencial para evaluar el rendimiento energético de los dispositivos. Este equipo permite medir las pérdidas de potencia y la eficiencia del transformador bajo diferentes condiciones de carga, proporcionando información crítica sobre su eficacia energética y su capacidad para cumplir con los requisitos de rendimiento especificados (Lee et al., 2022).

El equipo de medición de pérdidas y eficiencia consta de varios componentes, incluyendo un medidor de potencia, un medidor de corriente y voltaje, un sistema de carga y descarga, y un sistema de control y visualización de datos. Durante una prueba de pérdidas y eficiencia, el transformador se somete a cargas controladas y se mide la potencia de entrada y salida, así como las corrientes y voltajes en los devanados (Lee et al., 2022). A partir de estas mediciones, se

calculan las pérdidas de potencia y la eficiencia del transformador en diferentes condiciones de operación.

Una de las principales aplicaciones del equipo de medición de pérdidas y eficiencia es la evaluación del rendimiento energético de los transformadores durante su vida útil. Esta información se utiliza para determinar la idoneidad del transformador para su aplicación específica, así como para identificar posibles problemas de diseño, fabricación o instalación que puedan afectar su eficiencia y fiabilidad (Moutis & Alizadeh, 2020).

Además de la evaluación del rendimiento energético, el equipo de medición de pérdidas y eficiencia también se utiliza en el mantenimiento preventivo de los transformadores, permitiendo detectar posibles problemas de funcionamiento, como sobrecalentamiento, desequilibrio de cargas o pérdidas excesivas, antes de que causen daños mayores o fallas catastróficas en el transformador.

Las normas técnicas que se aplican en el uso de equipos de medición de pérdidas y eficiencia para transformadores incluyen:

***Norma IEC 60076***

Cubre los requisitos generales para los transformadores de potencia (Enel, 2004).

***NTC 1031***

Establece los ensayos necesarios para determinar las pérdidas y la corriente sin carga en transformadores (ICONTEC, 2022).

***IEC 60214***

Se aplica a los cambiadores de derivaciones bajo carga en transformadores, los cuales afectan directamente las pérdidas y la eficiencia durante su operación (Enel, 2004).

Para medir las pérdidas de potencia y la eficiencia de los transformadores se sigue el siguiente método. Una vez el transformador esté correctamente instalado y aislado, se conecta el equipo a los terminales del transformador y se le aplica la tensión nominal en el lado primario; las pérdidas en vacío se miden con el transformador sin carga en el secundario. Se aplica luego una carga resistiva o inductiva en el lado secundario del transformador y se mide la corriente y la tensión en ambos lados para calcular las pérdidas de carga, que son las pérdidas en los devanados debido a la resistencia del conductor. La eficiencia del transformador se calcula comparando la potencia de salida con la potencia de entrada ( $\% \text{ de Eficiencia} = \text{Potencia de salida} / \text{Potencia de entrada}$ ). A continuación, se comparan los resultados obtenidos con las especificaciones del fabricante y los estándares aplicables (ICONTEC, 2022).

### Ensayos de Aislamiento Dieléctrico

Estos ensayos incluyen la prueba de resistencia dieléctrica, la prueba de tensión aplicada y la prueba de impulso de rayo, que evalúan la capacidad de aislamiento de los transformadores frente a tensiones de alta intensidad.

### Figura 17

#### *Ensayo de Aislamiento Dieléctrico*



*Nota.* Tomado de Tecsagro (2019)

Durante los ensayos de aislamiento dieléctrico, se aplican tensiones eléctricas de alta intensidad entre los diferentes devanados del transformador y entre los devanados y tierra. Estas tensiones se mantienen durante un período de tiempo específico mientras se monitorea la corriente de fuga y se registran los datos (Nsengiyumva et al., 2022). La prueba se repite en diferentes condiciones, como temperatura ambiente y niveles de humedad, para evaluar la robustez del aislamiento en diversas situaciones de operación.

Uno de los ensayos más comunes de aislamiento dieléctrico es la prueba de resistencia dieléctrica, también conocida como prueba de rigidez dieléctrica. En esta prueba, se aplica una tensión eléctrica significativamente mayor que la tensión nominal del transformador durante un período corto de tiempo, mientras se monitorea la corriente de fuga. La capacidad del aislamiento para resistir esta tensión sin fallos o fugas indica su calidad y fiabilidad (Nsengiyumva et al., 2022).

Otro ensayo importante es la prueba de impulso de rayo, que evalúa la capacidad del aislamiento para soportar picos de tensión repentinos y transitorios, como los generados por descargas atmosféricas. Durante esta prueba, se aplica un impulso de alta tensión al transformador y se evalúa su respuesta ante estas condiciones extremas.

### **Ensayos de Resistencia de Aislamiento**

Estos ensayos incluyen la medición de la resistencia de aislamiento en frío y en caliente, la prueba de polarización inducida y la prueba de absorción dieléctrica, que evalúan la integridad de los aislamientos internos y externos sin fallos ni fugas de corriente (Tibanlombo et al., 2020).

Durante los ensayos de resistencia de aislamiento, se aplican tensiones eléctricas de alta intensidad entre diferentes partes del transformador, como los devanados y la carcasa, o entre los devanados y tierra. Estas tensiones se mantienen durante un período de tiempo específico,

mientras se mide la corriente de fuga y se registran los datos. La resistencia de aislamiento se calcula dividiendo la tensión aplicada entre la corriente medida.

Uno de los ensayos más comunes de resistencia de aislamiento es la medición de la resistencia de aislamiento en frío y en caliente (Tibanlombo et al., 2020). Durante esta prueba, se aplica una tensión eléctrica continua al transformador mientras se monitorea la resistencia de aislamiento entre los devanados y entre los devanados y tierra. Esta prueba se realiza tanto a temperatura ambiente como a temperatura elevada para evaluar la influencia de la temperatura en la resistencia del aislamiento.

Otro ensayo importante es la prueba de polarización inducida, que evalúa la capacidad del aislamiento para retener su carga eléctrica bajo tensiones continuas. Durante esta prueba, se aplica una tensión continua al transformador y se mide la resistencia de aislamiento en intervalos regulares para evaluar su estabilidad a largo plazo.

### **Ensayos de Pérdidas y Eficiencia**

Estos ensayos incluyen la medición de las pérdidas en vacío y en carga, la prueba de cortocircuito y la prueba de eficiencia a diferentes niveles de carga, que evalúan el rendimiento energético y térmico de los transformadores.

Durante los ensayos de pérdidas y eficiencia, se somete al transformador a cargas controladas y se mide la potencia de entrada y salida, así como las corrientes y los voltajes en los devanados (Grau et al., 2023). A partir de estas mediciones, se calculan las pérdidas de potencia en vacío y en carga, así como la eficiencia del transformador en condiciones normales de operación.

Uno de los ensayos más comunes es la medición de las pérdidas en vacío, que evalúa las pérdidas de potencia del transformador cuando no está conectado a ninguna carga. Durante este

ensayo, se aplica una tensión nominal al transformador y se mide la potencia consumida por el núcleo del transformador y otros elementos internos.

Otro ensayo importante es la medición de las pérdidas en carga, que evalúa las pérdidas de potencia del transformador cuando está conectado a una carga nominal. Durante este ensayo, se aplica una carga específica al transformador y se mide la potencia de entrada y salida para determinar las pérdidas de potencia debidas a la resistencia interna del transformador y otros factores.

### **Ensayos de Temperatura y Sobrecalentamiento**

Estos ensayos incluyen la medición de la temperatura de los devanados y del aceite aislante bajo diferentes condiciones de carga y ambiente, que evalúan la capacidad de disipación de calor y la resistencia a la sobrecarga de los transformadores. Estos ensayos se centran en medir y controlar las temperaturas de los devanados, el aceite y otros componentes críticos del transformador durante diversas condiciones de carga y ambiente (Rueda, 2023).

Durante los ensayos de temperatura, se registran las temperaturas de los devanados y del aceite aislante del transformador utilizando termopares y sensores de temperatura ubicados en puntos estratégicos. Estos datos se recopilan mientras el transformador está funcionando bajo diferentes niveles de carga y se comparan con los límites de temperatura especificados por los estándares industriales y las especificaciones del fabricante.

Por otro lado, los ensayos de sobrecalentamiento se centran en evaluar la capacidad del transformador para disipar el calor generado durante su funcionamiento normal y bajo condiciones de carga extremas. Durante estos ensayos, se somete al transformador a cargas por encima de su capacidad nominal y se monitorea el aumento de temperatura de los devanados y

del aceite aislante. Esto permite identificar posibles puntos calientes y evaluar la eficacia de los sistemas de refrigeración y ventilación del transformador.

### **Ensayos de Descargas Parciales**

Estos ensayos incluyen la medición de las descargas parciales en los devanados y en el aceite aislante, que detectan posibles defectos en los aislamientos y ayudan a prevenir fallas prematuras en los transformadores. Estos ensayos se centran en detectar y medir las descargas parciales que pueden ocurrir dentro del aislamiento del transformador, indicativas de posibles defectos o debilidades que podrían comprometer su funcionamiento (Leelachariyakul & Yutthagowith, 2021).

Durante los ensayos de descargas parciales, se aplican tensiones eléctricas controladas al transformador mientras se monitorean las señales de descargas parciales utilizando sensores de alta sensibilidad. Estos sensores detectan las señales electromagnéticas generadas por las descargas parciales y las registran para su posterior análisis.

Uno de los métodos comunes para realizar estos ensayos es el método de medición de descargas parciales en línea, donde los sensores se colocan estratégicamente en el transformador mientras está en funcionamiento. Esto permite detectar descargas parciales que pueden ocurrir durante condiciones normales de operación, proporcionando información valiosa sobre la integridad del aislamiento del transformador en situaciones reales.

Otro método es el ensayo de descargas parciales en línea con tensión aumentada, donde se aplica una tensión de prueba más alta al transformador para inducir descargas parciales. Esto puede revelar defectos ocultos que pueden no ser detectados durante las operaciones normales del transformador.

## Otros Protocolos Y Equipos Empleados En Los Laboratorios

El protocolo del ensayo de ruptura dieléctrica comienza preparando el transformador para la prueba, asegurándose de que esté correctamente conectado y aislado para evitar riesgos eléctricos. Se selecciona la tensión de prueba adecuada, que suele ser significativamente mayor que la tensión nominal del transformador, para inducir condiciones extremas de estrés en el aislamiento.

Para realizar el ensayo, se utilizan varios equipos especializados, incluyendo un generador de alta tensión, un sistema de medición y control, y dispositivos de seguridad. El generador de alta tensión proporciona la tensión de prueba necesaria, que se aplica gradualmente al transformador mientras se monitorea su respuesta. El sistema de medición y control registra las corrientes y voltajes durante el ensayo, permitiendo calcular la resistencia dieléctrica y detectar posibles anomalías. Además, se instalan dispositivos de seguridad, como interruptores de emergencia y sistemas de desconexión, para proteger al personal y al equipo en caso de falla durante el ensayo (Palumbo et al., 2020).

Durante la prueba, se aplica la tensión de prueba al transformador durante un período de tiempo específico, generalmente varios minutos, mientras se registran las corrientes y los voltajes. Se observa cualquier evidencia de ruptura dieléctrica, como chispas o arcos eléctricos, y se registra la tensión en la que ocurre la ruptura. Este valor se compara con los estándares y especificaciones para determinar si el aislamiento del transformador cumple con los requisitos de seguridad y rendimiento.

El protocolo para los ensayos especializados para definir la humedad y la condición del papel o celulosa en transformadores eléctricos de mediana y baja tensión comienza con la preparación del transformador (Ngwenyama & Gitau, 2024). Luego, se realizan mediciones

iniciales de la humedad ambiental y la temperatura del transformador antes de iniciar los ensayos.

Uno de los ensayos más comunes es el análisis de la humedad del papel o celulosa en el transformador. Para este fin, se utilizan equipos como analizadores de humedad y dispositivos de muestreo de aceite. Se extrae una muestra de aceite del transformador y se analiza para detectar la presencia de agua y otros contaminantes que puedan afectar la calidad del aislamiento.

Otro ensayo es la evaluación de la condición del papel aislante en el transformador. Esto se realiza mediante técnicas como la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) o la cromatografía de gases (GC), que permiten detectar cambios en la composición química del papel que puedan indicar degradación o contaminación (Li et al., 2020).

Además, se pueden realizar ensayos de envejecimiento acelerado para simular las condiciones de funcionamiento del transformador a lo largo del tiempo y evaluar el efecto de la humedad y otros factores ambientales en la degradación del papel aislante.

El equipo de prueba Idax Megger es una herramienta especializada utilizada en la evaluación de transformadores eléctricos de mediana y baja tensión, centrándose en la definición de la humedad comprometida y la conductividad del aceite, dos factores críticos que afectan la calidad y el rendimiento del aislamiento. El Idax Megger emplea un método de prueba basado en la técnica de impedancia dieléctrica, que permite medir con precisión la humedad y la conductividad del aceite aislante dentro del transformador. Este equipo aplica una tensión alterna de alta frecuencia al transformador y mide la respuesta dieléctrica del aceite, proporcionando información sobre su integridad y contaminación (Brncal et al., 2020).

Para realizar la prueba, se conectan electrodos al transformador y se introduce el aceite aislante en una celda de prueba dentro del equipo. Luego, se aplica la tensión alterna y se registra

la impedancia dieléctrica en función de la frecuencia. Este proceso permite detectar la presencia de humedad comprometida en el aceite, así como la conductividad eléctrica causada por contaminantes.

Los resultados obtenidos con el Idax Megger proporcionan información crucial sobre el estado del aislamiento del transformador y su capacidad para funcionar de manera segura y confiable. Una alta humedad comprometida o una conductividad excesiva del aceite pueden indicar la presencia de contaminantes o la necesidad de un mantenimiento preventivo para evitar posibles fallas en el futuro.

El Sistema de Análisis de Respuesta de Frecuencia (SFRA, por sus siglas en inglés) se basa en la medición de la respuesta de frecuencia del transformador ante una señal de prueba, lo que proporciona información valiosa sobre su integridad estructural y la condición de sus devanados (Mugarra et al., 2021).

El SFRA funciona emitiendo una señal de prueba a través de los devanados del transformador a diferentes frecuencias, generalmente en un rango de kilohercios. La respuesta del transformador a esta señal se registra y se compara con una referencia conocida. Cualquier desviación significativa en la respuesta de frecuencia puede indicar problemas estructurales, como deformaciones o desplazamientos en los devanados, que pueden afectar su rendimiento y confiabilidad.

Este sistema es especialmente útil para detectar anomalías internas en el transformador que pueden ser difíciles de detectar mediante otros métodos de prueba. Por ejemplo, puede identificar daños causados por eventos como sobrecargas, cortocircuitos o impactos mecánicos, que pueden comprometer la integridad del transformador y poner en riesgo su funcionamiento seguro (Mugarra et al., 2021).

El SFRA se utiliza durante diferentes etapas del ciclo de vida del transformador. Durante la fabricación, se puede utilizar para verificar la integridad de los devanados y detectar posibles defectos de fabricación. Durante la instalación y puesta en servicio, puede ayudar a garantizar que el transformador esté en condiciones óptimas para su funcionamiento. Y durante el mantenimiento y la inspección periódica, puede proporcionar información sobre el estado de salud del transformador y detectar problemas incipientes antes de que se conviertan en fallas costosas.

Como se observa en este capítulo, los laboratorios de pruebas eléctricas para transformadores de media y baja tensión emplean una amplia gama de equipos y protocolos especializados para evaluar la calidad, seguridad y rendimiento de estos dispositivos críticos en las redes eléctricas. Estos equipos y protocolos garantizan que los transformadores cumplan con los estándares internacionales y proporcionen un funcionamiento confiable y eficiente en diversas condiciones de operación.

## Conclusiones

El desarrollo de los objetivos planteados permite concluir, en primer lugar, que existen unos elementos esenciales para la protección de los transformadores de media y baja tensión. Para el lado de la carga se cuenta con interruptores de baja tensión y con fusibles. Ambos sistemas se describen en el capítulo 0. Así mismo se estableció que las características de funcionamiento más relevantes para estos transformadores son la relación de transformación, la eficiencia, la regulación de voltaje, las pérdidas generadas, la capacidad de sobrecarga, la resistencia a cortocircuitos, el factor de potencia y el nivel de ruido.

Así mismo, la búsqueda sistemática de literatura publicada en los últimos cinco años a nivel internacional permite concluir que la evolución de las pruebas realizadas a transformadores de media y baja tensión en los laboratorios de pruebas eléctricas ha permitido la realización de análisis de barrido de frecuencia, tangente delta, corriente de excitación, ruptura dieléctrica, Sistema de Análisis de Respuesta de Frecuencia (SFRA), análisis de gases disueltos en aceite, índice de salud, y análisis físico químicos. Esas pruebas permiten, entre otros beneficios, determinar la vida útil del transformador, y también pueden incluir la humedad y la condición el papel o celulosa.

Así mismo se caracterizaron los equipos y protocolos que se utilizan actualmente a nivel internacional en los laboratorios de pruebas eléctricas para transformadores de media y baja tensión; esa caracterización incluyó el analizador de redes eléctricas, la cámara termográfica, el equipo de medición de resistencia del aislamiento, el analizador de gases disueltos en el aceite de los transformadores, el equipo de medición de pérdidas y eficiencia, los ensayos de aislamiento

dieléctrico, los ensayos de temperatura y sobrecalentamiento, los ensayos de descargas parciales, entre otros.

El trabajo ofrece una descripción completa de las características de funcionamiento de los transformadores de media y baja tensión, lo que proporciona una base sólida para comprender la importancia de las pruebas eléctricas. La búsqueda sistemática de literatura es un aspecto positivo, ya que garantiza la inclusión de estudios relevantes y actualizados. Sin embargo, el análisis crítico del trabajo revela algunas limitaciones, como que la descripción de las pruebas realizadas en los laboratorios de pruebas eléctricas puede resultar superficial, sin entrar en detalles sobre los principios físicos involucrados en cada prueba. El trabajo no explora en profundidad los avances tecnológicos como las pruebas no destructivas y el uso de inteligencia artificial. Adicionalmente, el trabajo no compara los diferentes equipos y protocolos utilizados en los laboratorios de pruebas eléctricas, lo que dificulta identificar las mejores prácticas y las tendencias emergentes.

### **Investigaciones Futuras**

Teniendo en cuenta la irrupción que ha tenido en los años recientes el tema de inteligencia artificial, se sugieren como interrogantes a responder mediante investigaciones futuras los siguientes: ¿qué datos y metadatos relacionados con la operación de los transformadores eléctricos pueden registrarse y gestionarse para predecir sus fallas y optimizar su vida útil? ¿qué tipo de redes neuronales artificiales se pueden emplear para el análisis predictivo, identificación de patrones y diagnóstico de problemas en tiempo real de los transformadores eléctricos?

### Referencias Bibliográficas

- Acuña, L., & Gómez, G. (2020). Metodología indirecta para la estimación de vida útil residual de transformadores de potencia a partir de la evaluación de los materiales dieléctricos. *Revista Tecnológica en Marcha*, 33(3), 45-56.
- Ahmed, M., Elkhatib, M., Salama, M., & Shaban, K. (2015). *Transformer health index estimation using orthogonal wavelet network*. Retrieved from ieeexplore.ieee.org: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7379937>
- Alamri, B., Hossain, M., & Asghar, M. (2021). Electric power network interconnection: A review on current status, future prospects and research direction. *Electronics*, 10(17), 2179, 21-60.
- Alfonso, M., Alejandro, G., & Manuel, R. (2024). Mejora de las perturbaciones de un sistema eléctrico mediante la automatización de los elementos de regulación . *Ingeniería Investigación y tecnología*, 25(2), 1-13.
- Alhamrouni, I., Hamzah, M., Salem, M., Jusoh, A., Khairuddin, A., & Sutikno, T. (2019). A bidirectional resonant converter based on wide input range and high efficiency for photovoltaic application. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 10(3), 44-69.
- Ali, M., Omar, A., Jaafar, A., & Mohamed, S. (2023). Conventional methods of dissolved gas analysis using oil-immersed power transformer for fault diagnosis: A review. *Electric Power Systems Research*, 216, 109-132.
- Amperis. (2024). *Pruebas a transformadores de potencia*. <https://amperis.com/recursos/articulos/pruebas-transformadores-potencia/>

- Anderson, M., & Thomas, D. (2023). Best Practices for Non-Nationally Recognized Testing Laboratory Utilization Equipment Inspection Processes . *IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW)*, 1-8.
- Arévalo, J., & Espinoza, D. (2020). *Análisis de Fallas en Transformadores de Potencia y su Prevención*. Universidad de El Salvador.
- Arora, R., & Mosch, W. (2022). *High voltage and electrical insulation engineering*. John Wiley & Sons.
- Avanza Ingeniería. (2022). *Proyectos industriales*. <https://avanzaing.com/ingenieria/nuestros-proyectos/proyectos-industriales/>
- Azmi, A., Jasni, J., Azis, N., & Kadir, M. (2017). Evolution of transformer health index in the form of mathematical equation. *Renewable and sustainable energy reviews*, 76, 687-700.
- Benhmed, A., Mooman, A., Younes, A., Shaban, K., & El-Hag, A. (2017). Feature selection for effective health index diagnoses of power transformers. *IEE Transactions on Power Delivery*, 33(6), 3223-3226.
- Blaško, P., Šolc, M., Petřík, J., Girmanová, L., & Blašková, A. (2023). Application of the FMEA Tool in an Accredited Testing Laboratory in the Context of the ISO/IEC 17025: 2017 Standard. *Standards*, 3(1), 57-69.
- Bohatyrewichz, J., Plowucha, J., & Subocz, J. (2019). Condition assessment of power transformers based on health index value. *Applied sciences*, 9(22).
- Bravo, J., & Ochoa, A. (2022). *Diseño de redes eléctricas en medio voltaje, voltaje y alumbrado público para urbanizaciones*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana.

- Brncal, P., Gutten, M., Cefer, V., Korenciak, D., & Jarzebowicz, L. (2020). Frequency diagnostics of transformer insulating parameters. *2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika)*, 85-102.
- Brncal, P., Miroslav, G., Orenciak, D., Sebok, M., Koltunowicz, T., & Zukowski, P. (2020). *Analysing of insulating system oil-paper of power transformers by frequency dielectricspectroscopy*. Retrieved from [ieeexplore.ieee.org](https://ieeexplore.ieee.org):  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9130279/authors>
- Cáceres, J. (2017). *Análisis fisicoquímico y cromatográfico en transformadores de potencia y de distribución en la planta de licuefacción de gas melchorita- Perú*. Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- Carr, K. (2020). Clearing Time Considerations for dc Arc-Flash Hazards: An Analysis of Battery Banks. *IEEE Industry Applications Magazine*, 26(3), 60-65.
- Carruitero, L., & Otiniano, C. (2020). *Diseño de un equipo de procesos de trmovació para mejorar las propiedades del aceite contaminado en transformadores de hasta 10000 KVA*. Trujillo: Perú.
- Cervantes, X. (2020). La Ingeniería Electrónica del Siglo XXI. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 5(1), 488-501.
- Conejo, A., Arroyo, J., Milano, F., Alguacil, N., Polo, J., García, R., . . . López, L. (2007). *Instalaciones Eléctricas*. España: McGraw Hill.
- De la Fuente, A., Guillén, A., Crespo, A., Sola, A., Gómez, J., Moreau, P., & González, V. (2018). View of an assets health index for making long-trm decision in different industries. In e. a. Haugen, *Safety and reability- Safe societies in a changing world* (pp. 1151-1156). London: Taylor & Francis Group.

Diener Electronic. (2023). *Generador de alta tensión*. Retrieved from Plasma.com:

<https://www.plasma.com/es/glosario-de-tecnologia-del-plasma/generador-de-alta-tension/>

Ding, M., Jin, Z., Chen, J., & Wu, G. (2020). Photonic network analyzer based on optical sampling. *IEEE Photonics Technology Letters*, 32(4), 212-215.

Direct Industry. (2023). *Sistema de prueba de laboratorio*.

<https://www.directindustry.es/prod/koncar-electrical-engineering-institute-inc/product-163431-1943696.html>

Ditel. (2024). *Analizadores de Redes Eléctricas: Beneficios, Tipos y Aplicaciones*. Ditel:

<https://www.ditel.es/analizadores-de-redes-electricas-beneficios-tipos-y-aplicaciones/>

Du, M., Li, Y., Dai, Q., & Ouyang, Z. (2021). An Online Extraction Method of Noise Source Impedance Based on Network Analyzer. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 97, 35-44.

Ehsani, M., Singh, K., Bansal, H., & Mehrjardi, R. (2021). State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 967-984.

Electrofial. (2022). *Analizadores de redes eléctricas*. Retrieved from Electrofial:

<https://electrofial.com/electricidad-electronica/analizadores-de-redes-electricas/>

Electrotec. (2023). *Tipos de pruebas eléctricas en los transformadores*. Retrieved 2023, from

<https://electrotec.pe/blog/PruebasElectricasTransformadores>

Enel. (2004). *Especificación técnica transformadores de potencia 500 / 115 kV*. Enel.

Fernández, C. (2022). *Caracterización de la degradación de materiales dieléctricos sólidos en transformadores de potencia*. Universidad de Cantabria.

- Fernández, M., Jimenez, E., Martínez, I., & Castellote, M. (2021). Evaluation of changes in surface temperature of TiO<sub>2</sub> functionalized pavements at outdoor conditions. *Energy and Buildings*, 237, 110-117.
- Freire, A., Astudillo, J., Quinatoa, C., & Arias, F. (2023). Interpretación de Gases Disueltos en Aceite Dieléctrico Mediante Bosques Aleatorios Para la Detección de Anomalías en Transformadores de Potencia. *Revista Técnica energía*, 19(2), 90-98.
- Gálvez, J. (2022). *Evaluación de transformadores de potencia basado en pruebas eléctricas, pruebas fisicoquímicas y análisis de gases disueltos; basado en los transformadores del Sistema Central de la empresa de transporte y control de energía*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- García, A., Anyosa, G., & Russel, F. (2019). *Diagnóstico de transformadores de potencia utilizando lógica difusa para el análisis de gases en el aceite*. Perú: Universidad Nacional del Callao.
- Garrido, J. (2022). *Research on demand-side flexibility in Smart Grids: direct load control*. Universidad de Córdoba.
- Ghoneim, S., & Taha, I. (2020). Comparative study of full and reduced feature scenarios for health index computation of power transformers. *IEE Access*, 7, 181326-181339.
- Globecore. (2024). *Análisis de gases disueltos en aceite del transformador*.  
<https://globecore.com/es/instrumentos/dissolved-gas-analysis-of-transformer-oil/>
- Goda, O., Salah, H., & Hassan, H. (2019). Condition assessment of power transformers based on dissolved gas analysis. *The Institute of Engineering and Technology*, 13, 2299-2310.
- Gómez, G. (2015). Metodología para el análisis y retiro de activos: transformadores de potencia. *Revista Tecnología en Marcha*, 28(3), 116-126.

- Granados, C. (2022). *Diseño e implementación de un sistema de utilización en media tensión, en un laboratorio farmacéutico en el distrito de Lince, Lima, Perú*. Lima: Universidad Tecnológica del Perú.
- Grau, F., Hernández, O., López, F., Sierra, E., & Olivares, J. (2023). Modelo para simular el efecto de la distorsión armónica en las pérdidas de transformadores monofásicos. *Ingeniería Energética*, 44(2), 132-141.
- Han, K., Wang, Y., Chen, H., Chen, X., Guo, J., Liu, Z., & Tao, D. (2022). A survey on vision transformer. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 45(1), 87-110.
- Haque, S., Ardila, A., Umar, Y., Muhammad, F., Jume, B., & Bani, N. (2021). Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment. *Energies*, 14(10), 27-58.
- Herraiz, Á., Marugán, A., & Márquez, F. (2020). Photovoltaic plant condition monitoring using thermal images analysis by convolutional neural network-based structure. *Renewable Energy*, 153, 334-348.
- Híbridos y Eléctricos. (2023). *Conoce cómo se ponen a prueba las baterías de los vehículos eléctricos*. [https://www.hibridosyelectricos.com/coches/asi-prueban-baterias-vehiculos-electricos\\_29401\\_102.html](https://www.hibridosyelectricos.com/coches/asi-prueban-baterias-vehiculos-electricos_29401_102.html)
- Hosseini, M., Shivaie, M., & Golmohammadi, A. (2021). An efficient earthing system design for different sections of Alborz electricity distribution company using IEEE Std. 142. *25th Electrical Power Distribution Conference (EPDC)*, 84-88.
- Hussain, M., Refaat, S., & Abu, H. (2021). Overview and partial discharge analysis of power transformers: A literature review. *IEEE Access*, 9, 645-672.

- Ibrahim, K., Sharkawy, R., Temraz, H., & Salama, M. (2016). Selection criteria for oil transformer measurements to calculate the health index. *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, 23(6), 3397-3404.
- ICONTEC. (2004). *Transformadores de Media. Transformadores de tensión inductivos*. ICONTEC.
- ICONTEC. (2022). *Transformadores. Ensayos para la determinación de pérdidas y corriente sin carga*. ICONTEC.
- IME. (2018). *Pruebas de Media Tensión IME*. Obtenido de IME: <https://ime.com.co/index.php/media-tension-ime/>
- İnci, M., Büyük, M., Demir, M., & İlbey, G. (2021). A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 17-30.
- Iqbal, M., Benmouna, A., Claude, F., & Becherif, M. (2023). Efficient and Reliable Power-Conditioning Stage for Fuel Cell-Based High-Power Applications. *Energies*, 16(13), 15-49.
- Islam, M., Lee, G., & Hettiwatte, S. (2018). A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformer. *Electric Engineering*, 581-605.
- Islam, M., Lee, G., Hettiwatte, S., & Williams, K. (2018). Calculating a health index for power transformers using a subsystem-based GRNN approach. *IEEE Transactions on power delivery*, 33(4), 1903-1912.

- Isotest. (2023). *Analizadores de redes eléctricas*. Retrieved from Isotest:  
<https://isotest.net/productos/analizadores-de-redes-electricas/>
- Isotest. (2023). *Cámara termográfica*. Obtenido de isotest.net:  
<https://isotest.net/productos/camara-termografica/>
- Jadav, R., Chandima, E., & Tapan, K. (2014). Understanding the impact of moisture and ageing of transformer insulation on frequency. *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*, 21(1), 369-379.
- Jiménez, G., & Gómez, G. (s.f.). Comportamiento de los aislamientos sólidos de transformadores de potencia en condiciones ambientales no controladas. *Tecnología en marcha*, 29(3), 99-116.
- Juris, J. (2020). *Evaluación de fallas de aislamiento en transformadores de potencia utilizando Análisis de Cromatografía por Gases Disueltos (DGA)*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Kaczmarek, M., & Stano, E. (2021). Why should we test the wideband transformation accuracy of medium voltage inductive voltage transformers? *Energies*, 14(15), 32-44.
- Kahawatte, N. (2020). *Digital business model development and validation for real-time monitoring solution for electrical power transformers*. Massachusetts Institute of Technology.
- Kang, S., & Kim, J. (2020). Investigation on the insulation resistance characteristics of low voltage cable. *Energies*, 13(14), 11-36.
- Khamlichi, A., Garnacho, F., Rovira, J., & Simón, P. (2021). Registrador universal de alta tensión para los laboratorios de ensayo. *Revista Tecnología en Marcha*, 5(1), 25-38.

- Khan, S., Amjad, M., Gilani, I., Larkin, S., Shareef, H., & Sher, W. (2022). High Voltage & Short Circuit Testing Laboratories in Economic Growth of African Region: A Prospect for Prosperity. *International Journal of Engineering Trends and Techno. International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(10), 67-78.
- Kittan, S., Komhuber, S., Kästel, P., Nitsche, G., Valtin, G., & Weise, M. (2018). *Review and implementation of transformer health index methods in line with the development of a condition assessment tool*. Retrieved from [ieeexplore.ieee.org](https://ieeexplore.ieee.org):  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8526034>
- Kuchanskyi, V., Nesterko, A., Rubanenko, O., & Hunko, I. (2019). *Modes of electrical systems and grids with renewable energy sources*. LAMBERT Academic Publishing.
- Lee, E., Park, J., Kim, M., & Lee, J. (2022). High efficiency integrated transformer design in DAB converters for solid-state transformers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(7), 7147-7160.
- Leelachariyakul, B., & Yutthagowith, P. (2021). Resonant power frequency converter and application in high-voltage and partial discharge test of a voltage transformer. *Energies*, 14(7), 2014, 14-26.
- Li, S., & Dong, H. (2019). Transformer apparent age estimation based on probabilistic health index. *IEE PES Innovative Smart Grid Technologies(1)*, 3936-3940.
- Li, S., Hu, G., Gao, B., Yang, Y., & Wu, G. (2018). *A probabilistic framework for transformer health condition assessment*. Retrieved from [ieeexplore.ieee.org](https://ieeexplore.ieee.org):  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8401221>

- Li, Y., Zhang, Y., Zhang, W., Xu, Y., & Zhang, G. (2020). Comparative study of partial least squares and neural network models of near-infrared spectroscopy for aging condition assessment of insulating paper. *Measurement Science and Technology*, 31(4), 45-61.
- López, O., & Sandoval, J. (2021). *Propuesta de diseño de laboratorios para la asignatura instalaciones eléctricas I; de la escuela de ingeniería eléctrica, faculta de ingeniería y arquitectura de la Universidad de el Salvador*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Marchionni, M., Bianchi, G., & Tassou, S. (2020). Review of supercritical carbon dioxide (sCO<sub>2</sub>) technologies for high-grade waste heat to power conversion. *SN Applied Sciences*, 2, 1-13.
- Martínez, M. (2020). *Avance en el diagnóstico del aislamiento en transformadores de potencia basado en técnicas RVM (Recovery Voltage Measurements)*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Méndez, D. (2018). *Acometida en media tensión y centro de transformación de cliente*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Merev, A., Özer, S., & Dedeoglu, S. (2022). Implementation and characterization of reference measuring system for the calibration of high voltage source at very low frequency (VLF). *Electrical Engineering*, 104(6), 769-777.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2007). *Resolución 180466*. Por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, RETIE.
- Mohamadeen, K., Sharkawy, R., & Salama, M. (2014). *Binary cat swarm optimization versus binary particle swarm optimization for transformer health index determination*. Retrieved from [ieeexplore.ieee.org: https://ieeexplore.ieee.org/document/7016812](https://ieeexplore.ieee.org/document/7016812)

- Monzo, C., Cobo, G., Morán, J., Santamaría, E., & García, D. (2020). Lab@ home: The open university of catalonia hands-on electronics laboratory for online engineering education. *Electronics*, 9(2), 22-50.
- Moutis, P., & Alizadeh, O. (2020). Digital twin of distribution power transformer for real-time monitoring of medium voltage from low voltage measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(4), 1952-1963.
- Mugarra, A., Mayora, H., Guerrero, J., & Platero, C. (2021). Frequency response analysis (FRA) fault diagram assessment method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(1), 336-344.
- Mulyana, E., Hasbullah, D., & Sayefullah, D. (2021). Analysis of Results of Test Resistance Isolation Power Transformator Based on Polarization Index Test and Delta Tanngen. *Gunahumas*, 3(2), 43-48.
- Ngwenyama, M., & Gitau, M. (2024). Application of back propagation neural network in complex diagnostics and forecasting loss of life of cellulose paper insulation in oil-immersed transformers. *Scientific Reports*, 14(1), 60-80.
- Nsengiyumva, W., Zhong, S., Wang, B., Zheng, L., Zhang, Z., Zhang, Q., & Peng, Z. (2022). Terahertz spectroscopic study of optical and dielectric properties of typical electrical insulation materials. *Optical Materials*, 123, 118-137.
- Núñez, Ó., Gómez, G., Acuña, F., & González, C. (2023). Metodología para Evaluar la Condición de Transformadores Eléctricos de Potencia Basada en un Índice de Salud. *Ingeniería*, 33(1), 48-65.
- Ocoleanu, D., Salceanu, C., Ionescu, M., Nicola, M., Iovan, D., & Enache, S. (2022). Automatic Redundant Power Supply System for the Dynamic Braking System, Used for the Quick

- and Controlled Stopping of Wound-Rotor Asynchronous Power Motors Specific to the High Power Testing Laboratories. *International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*, 326-331.
- Ozdemir, S., Altin, N., Nasiri, A., & Cuzner, R. (2021). Review of standards on insulation coordination for medium voltage power converters. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2, 236-249.
- Palacios, Y. (2023). *Metodología para la determinación de los requisitos mínimos en los descargadores de sobretensiones de tipo oxido de metal sin explosores para circuitos de alimentación AC (> 1kV)*. Universidad de Antioquia.
- Paliza, L., Caballera, K., & Francisco, C. (2021). La demanda de electricidad residencial y el cambio climático en Argentina, Brasil, Chile y Colombia. *Revista Chilena de Economía y Sociedad*, 15(2), 12-25.
- Palumbo, F., Wen, C., Lombardo, S., Pazos, S., Aguirre, F., Eizenberg, M., & Lanza, M. (2020). A review on dielectric breakdown in thin dielectrics: silicon dioxide, high-k, and layered dielectrics. *Advanced Functional Materials*, 30(18), 190-257.
- Parraga, J. (2019). *El índice de salud y su influencia en la gestión del ciclo de vida de los transformadores del istema eléctrico de la mina cobriza*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Paul, J., Lim, W., O’Cass, A., Hao, A., & Bresciani, S. (2021). Scientific procedures and rationales for systematic literature reviews (SPAR-4-SLR). *International Journal of Consumer Studies*, 45(4), 1-16.

- Pce Instruments. (2024). *Analizador de redes eléctricas*. [https://www.pce-instruments.com/colombia/instrumento-medida/medidor/analizador-de-redes-elctricas-kat\\_162757.htm](https://www.pce-instruments.com/colombia/instrumento-medida/medidor/analizador-de-redes-elctricas-kat_162757.htm)
- Peñafiel, S., Otero, P., & Pérez, F. (2023). Diagnóstico del estado de transformadores de distribución mediante el ensayo de análisis de respuesta en frecuencia. *Revista técnica "energía"*(20), 26-32.
- Pérez, E. (2021). *Dimensionamiento del sistema de control para un generador de alta tensión multipropósito tipo Kit CA/CD/impulso*. Universidad Nacional de Colombia.
- Pérez, R., & Hernández, O. (2024). Aplicación de la técnica del barrido de frecuencia, en el diagnóstico de los devanados de dos autotransformadores de potencia. *Ingeniería Energética*, 45(1), 25-33.
- Petersen, L., Martin, I., Moschetti, W., Kershaw, C., & Tsongalis, G. (2019). Third-generation sequencing in the clinical laboratory: exploring the advantages and challenges of nanopore sequencing. *Journal of clinical microbiology*, 58(1), 131-149.
- Prado, A., & Leonardy, J. (2022). *Estrategias tácticas y métodos para la medición y diagnóstico de sistemas eléctricos*. Universidad de Pamplona.
- Prasojo, R., Maulidevi, N., Soedjarno, B., & Suwarno, S. (2019). Health index analysis of power transformer with incomplete paper condition data. *4th international conference on condition assessment techniques in electrical systems*, 3-6.
- Prasojo, R., Setiawan, A., Maulidevi, N., & Anggoro, B. (2019). *Development of analytic hierarchy process technique in determining weighting factor for power transformer health index*. Indonesia: 2nd. international conference on high voltage engineering and power systems: towards sustainable and reliable power delivery.

- Prismian Group. (2018). *Libro blanco de la instalación de cables de baja tensión*. Barcelona: Prismian Cables Spain S.A.
- Proinstra. (2023). *Analizador de Gases Disueltos en Aceite de Transformador Arnel*. Obtenido de proinstra.com: <https://proinstra.com/producto/analizador-de-gases-disueltos-en-aceite-de-transformador-toga/>
- Quispe, M., & Cabrera, R. (2018). *La gradiente de temperatura y su relación on las características operativas del transformador de distribución*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Ragonese, E., Spina, N., Parisi, A., & Palmisano, G. (2021). An experimental comparison of galvanically isolated DC-DC converters: Isolation technology and integration approach. *Electronics, 10(10)*, 11-26.
- Ramayah, T., Soto, P., Kheng, K., & Mahmud, I. (2020). Developing process and product innovation through internal and external knowledge sources in manufacturing Malaysian firms: the role of absorptive capacity. *Businnes Process Management Journal, 26(5)*, 1021-1039.
- Rivera, E. (2023). *Control predictivo de sistemas hibridos de generacion electrica con energias renovables y almacenamiento de energia*. Universidad de Cádiz.
- Rodríguez, A. (2022). *Evaluación de la parte activa del transformador de 1.60 MVA inmerso en aceite, mediante diagnósticos predictivos para su puesta en servicio en la mina Chinalco Perú S.A.* Lima: Universidad Tecnológica del Perú.
- Rodríguez, M. (2018). *Máquinas Eléctricas II. Tema 1. Transformadores*. España: Universidad de Cantabria.

- Rueda, W. (2023). *Desarrollo de un código de programación para el mantenimiento preventivo de transformadores de potencia*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Ruiz, A. (2020). *Desarrollo de una plataforma basada en el convertidor CC-CC reductor para las prácticas de Electrónica de potencia*. Universidad Politécnica de Madrid.
- San Martín, Y. (2022). *Materiales aislantes alternativos en la Ingeniería Civil*. Universidad Cooperativa de Colombia.
- Sánchez, S., Pedraza, I., & Donoso, M. (2022). ¿Cómo hacer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA?: Usos y estrategias fundamentales para su aplicación en el ámbito educativo a través de un caso práctico. *74(3)*.
- Sedding, H., Sasic, M., Warren, V., & Stone, G. (2022). Differences Between Partial Discharge Tests on Air-Cooled and Hydrogen-Cooled Rotating Machines. *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 413-418.
- Selva, A. e. (2021). Application of statistical distribution models to predict health index for condition-based management of transformers. *Applied Sciences*, *33(3)*, 45-56.
- Shah, K. (2020). Evolution of thyristors. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, *101(5)*, 553-563.
- Shen, Z., Wang, F., Wang, Z., & Li, J. (2021). A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *141*, 110-138.
- Sheng, Q., Huang, L., Wang, X., Jiang, J., Li, P., Zhang, J., & Qu, S. (2021). Research and analysis on evaluation methods of electrical performance of Smart Energy Meters. *Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1802, No. 3)*, 321-335.

- Sidambarompoulé, X., Notingher, P., Paillat, T., Laurentie, J., & Leblanc, P. (2020). Study of electrical properties and estimation of average mobility and diffusion coefficients in several insulating liquids by dielectric spectroscopy. *J. Plasma Environ. Schi. Technol.*, *14*, 1-18.
- Sirioired. (2023). *Analizadores de Redes Eléctricas*. <https://www.sirioired.com/analizadores-de-redes.html>
- Solorzano, G. (2018). *Cálculo, selección, montaje, comisionamiento y puesta en marcha de un transformador trifásico de potencia en la empresa Agrolmos*. Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Luis Gallo.
- Soni, R., & Mehta, B. (2021). Review on asset management of power transformer by diagnosing incipient faults and faults identification using various testing methodologies. *Engineering failure analysis*, *128*, 105634.
- Syafruddin, H., & Nugroho, H. (2020). Dissolved gas analysis (DGA) for diagnosis of fault in oil-immersed power transformers: A case study. *2020 4rd International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*, 57-62.
- Tan, D. (2020). Power electronics: Historical notes, recent advances and contemporary challenges. *Eletrôn. Potên., Fortaleza*, v. 25, n. 4, 386-394.
- Tecnoblogsanmartin. (2010, octubre 3). *El camino de la electricidad*.  
tecnoblogsanmartin.wordpress.com:  
<https://tecnoblogsanmartin.wordpress.com/2010/10/03/unidad-1-instalaciones-de-la-vivienda/>

- Tecsaqro. (16 de mayo de 2019). *Aspectos básicos de las pruebas de resistencia de aislamiento eléctrico*. tecsaqro.com.mx: <https://www.tecsaqro.com.mx/blog/pruebas-de-resistencia-de-aislamiento-electrico/>
- Tenbohlen, S., & al., e. (2015). Transformer reliability survey. *Technical Brochure*, 642, 94-102.
- Tibanlombo, V., Ramírez, J., Granda, N., & Quilumba, F. (2020). Evaluación del Estado del Aislamiento en Transformadores a partir de Mediciones IFRA de Alto Voltaje. *Revista Politécnica*, 45(1), 39-48.
- Tractian. (2024). *Termografía en el mantenimiento predictivo*.  
<https://doi.org/https://tractian.com/es/blog/termografia-en-el-mantenimiento-predictivo>
- Ullah, I., Khan, R., Yang, F., & Wuttisittikulij, L. (2020). Deep learning image-based defect detection in high voltage electrical equipment. *Energies*, 13(2), 392, 32-42.
- Valencia, M., Zatzabal, J., Meza, L., & Chere, B. (2023). Proposal of a predictive and preventive maintenance plan in electrical substations through the use of thermography. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 4(2), 23-42.
- Werle, P., & Brendel, H. (2021). Transformers. *Springer Handbook of Power Systems* , 443-509.
- White, J., & Jamil, S. (2020). Electrical incidents and how they relate to NFPA 70E/CSA Z462. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(4), 315-321.
- Yelamanchi, D., & Pandian, G. (2023). Failure Analysis of Transformers under Impulse Test. *Power Research-A Journal of CPRI*, 63-70.
- Yuan, J., Ding, J., Ma, Y., Zhou, Y., Liu, Y., & Chen, Y. (2022). Optimized Design and Implementation of Testing Laboratory Based on Blockchain Technology. *Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2219, No. 1, p. 012037)*. IOP Publishing, 1-6.

- Zeinoddini, H., & Vahidi, B. (2016). Health index calculation for power transformers using technical and economical parameters. *IET science, measurement and technology*, *10*(7), 823-830.
- Zhang, X., Tan, R., Lam, W., Yao, L., Wang, X., Cheng, C., & Bian, Z. (2020). PRISMA (preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses) extension for Chinese herbal medicines 2020. *48*(6).
- Zhang, Y., Zhou, T., Huang, X., Cao, L., & Zhou, Q. (2021). Fault diagnosis of rotating machinery based on recurrent neural networks. *Measurement*, *171*, 108-124.