

Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia



Título del trabajo de grado

Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

Darwin Ferney Hernández Rodríguez

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

diciembre de 2024

Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

Darwin Ferney Hernández Rodríguez

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de  
Proyectos

Asesor

Henry Alberto Rodríguez Guzmán

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

diciembre de 2024

## Contenido

	Pág.
Lista de tablas .....	4
Lista de gráficas.....	5
Resumen .....	6
INTRODUCCIÓN.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.1    Pregunta de investigación .....	10
1.2    Objetivos.....	10
1.2.1    Objetivo general.....	10
1.2.2    Objetivos específicos.....	11
1.3    Justificación .....	11
2. MARCO DE REFERENCIA.....	13
2.1. Estado del arte o antecedentes .....	13
2.2. Marco teórico.....	22
2.3. Marco conceptual .....	23
2.4. Marco normativo .....	25
3. METODOLOGÍA .....	26
3.1. Tipología de investigación.....	26
3.2. Enfoque de investigación .....	26
3.3. Población.....	27
3.4. Diseño de investigación .....	27
3.5 Métodos de investigación/técnicas de recolección información .....	29
4. RESULTADOS .....	30
4.1 Análisis correlacional entre técnicas de mantenimiento e incremento en la duración de los equipos de transformación.....	36
4.2 Propuesta de implementación.....	38
4.2.1. Eficiencia del mantenimiento predictivo .....	40
4.2.2. Contribución del mantenimiento basado en condición. ....	40
4.2.3. Limitaciones y uso complementario del mantenimiento preventivo.....	41
5. CONCLUSIONES.....	43
Referencias bibliográficas .....	45

**Lista de tablas**

	Pág.
Tabla 1 <i>Esquema normativo</i> .....	25
Tabla 2 <i>Técnicas de mantenimiento</i> .....	34
Tabla 3 <i>Impacto en la duración de los equipos</i> .....	37

**Lista de gráficas**

	Pág.
Gráfica 1 <i>Esquema de correlación</i> .....	38

## Resumen

El mantenimiento de transformadores de potencia conviene para la confiabilidad y sostenibilidad de los sistemas eléctricos. Este trabajo compara estrategias de mantenimiento —correctivo, preventivo, predictivo y basado en condición— evaluando su impacto en la vida útil de los equipos. A través de un enfoque cuantitativo y un análisis correlacional, se identificaron técnicas avanzadas, como el análisis de gases disueltos (DGA) y el monitoreo en tiempo real, como las más efectivas para extender la vida útil de los transformadores en un 20-30%. Aunque las técnicas preventivas son útiles, presentan limitaciones frente a las necesidades complejas del sector.

Se propone priorizar el mantenimiento predictivo y basado en condición, complementados por un programa estructurado de mantenimiento preventivo. Estas estrategias, soportadas por inversiones en tecnología avanzada y capacitación técnica, optimizan recursos, minimizan interrupciones y reducen costos operativos. El estudio concluye que las empresas del sector deben adoptar modelos más sofisticados de gestión de activos para garantizar la continuidad del servicio eléctrico y la sostenibilidad operativa. La implementación de estas prácticas, alineada con normativas internacionales, asegura diagnósticos precisos, prolonga la vida útil de los transformadores y mejora la confiabilidad de las redes eléctricas

Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

*Palabras clave: Mantenimiento predictivo, transformadores de potencia, gestión de activos, análisis de gases disueltos, sostenibilidad eléctrica*

### **Abstract**

Power transformer maintenance is critical for the reliability and sustainability of electrical systems. This study compares maintenance strategies—corrective, preventive, predictive, and condition-based—evaluating their impact on equipment lifespan. Through a quantitative and correlational analysis, advanced techniques like dissolved gas analysis (DGA) and real-time monitoring were identified as the most effective, extending transformers' lifespan by 20-30%. While preventive techniques remain useful, they show limitations in addressing the sector's complexities.

The research suggests prioritizing predictive and condition-based maintenance, supplemented by structured preventive programs. Supported by advanced technology investments and technical training, these strategies optimize resources, minimize disruptions, and reduce operational costs. The findings emphasize the need for energy companies to adopt sophisticated asset management models to ensure electrical service continuity and operational sustainability. Implementing these practices, aligned with international standards, guarantees precise diagnostics, extends transformer lifespan, and enhances network reliability.

**Keywords:** Predictive maintenance, power transformers, asset management, dissolved gas analysis, electrical sustainability.

## INTRODUCCIÓN

Los transformadores corresponden a los componentes que determinan la infraestructura eléctrica global y desempeñan un papel central en la transmisión de energía eléctrica. Son responsables de modificar los niveles de voltaje para adaptarse a diferentes aplicaciones, desde la generación hasta la distribución de energía. Sin embargo, para garantizar su funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil, conviene, según la literatura, llevar a cabo un mantenimiento controlado (Gallo, 2010).

Así las cosas, el mantenimiento de transformadores abarca una variedad de actividades diseñadas para prevenir fallas, optimizar el rendimiento y garantizar la seguridad operativa. Además, con el avance de la tecnología, han surgido nuevas técnicas y herramientas para mejorar la eficiencia del mantenimiento y la fiabilidad de los transformadores.

A continuación, este trabajo compara diferentes estrategias de mantenimiento —correctivo, preventivo, predictivo y basado en condición— y evalúa su impacto en la duración de los equipos, abordando las necesidades actuales del sector energético de optimizar recursos y reducir costos operativos. Además, expone el papel de tecnologías avanzadas, como el análisis de gases disueltos y el monitoreo en tiempo real, en la transformación de las prácticas tradicionales hacia enfoques más eficientes y sostenibles.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Esta investigación tuvo como finalidad identificar y comparar las estrategias de mantenimiento actuales para transformadores de potencia, para mejorar la eficiencia operativa, prolongar la vida útil y reducir los costos por daños imprevistos en estos equipos críticos de los sistemas eléctricos de potencia.

### **1.1 Pregunta de investigación**

¿ Cuáles son las mejores técnicas o prácticas de mantenimiento que permiten prolongar la vida útil de los transformadores de potencia para determinar cuáles son las más acertadas a implementar en una empresa de distribución de energía eléctrica ?

### **1.2 Objetivos**

#### **1.2.1 Objetivo general.**

- Identificar las técnicas de mantenimiento idóneas en transformadores de potencia a través de la revisión de las estrategias disponibles en el mercado actual, generando recomendaciones para proyectos de mejora en empresas del sector de distribución de energía que busquen la prolongación de la vida útil de estos activos.

### **1.2.2 Objetivos específicos.**

- Establecer las técnicas y estrategias de mantenimiento actuales de transformadores de potencia.
- Comparar las técnicas de mantenimiento disponibles de transformadores de potencia.
- Determinar cuál o cuáles técnicas de mantenimiento son más acertadas de implementar actualmente en empresas de distribución de energía eléctrica.
- Recomendar practicas o técnicas de mantenimiento adecuadas de transformadores de potencia, para proyectos de mejora en las áreas encargadas de mantenimiento de la vida útil de estos equipos, en empresas del sector de distribución energía.

### **1.3 Justificación**

La presente investigación se sustenta en el beneficio que las empresas de distribución de energía eléctrica logran al reducir costos operativos, aumentar la confiabilidad del servicio, prolongar la vida útil de los equipos, asegurar el cumplimiento normativo, fomentar la innovación y mejorar la sostenibilidad. Es decir, los beneficios se traducen en una operación segura y rentable, fortaleciendo la posición de la empresa en el mercado energético. Por otro lado también beneficia a los usuarios ya que mejores prácticas de mantenimiento aumentan la confiabilidad de los transformadores, lo que se traduce en menos interrupciones del servicio, pues un suministro eléctrico más confiable conviene para la satisfacción del cliente y la reputación de la empresa. Además, la mayor

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

disponibilidad de los equipos permite a la empresa cumplir con la demanda energética sin problemas, mejorando la estabilidad de la red eléctrica.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1. Estado del arte o antecedentes

El mantenimiento de transformadores de potencia corresponde a una disciplina crítica dentro del ámbito de la ingeniería eléctrica, orientada a asegurar la operatividad continua y eficiente de estos componentes fundamentales en los sistemas eléctricos. A lo largo de las últimas décadas, el estudio y la práctica del mantenimiento han evolucionado significativamente, impulsados por avances tecnológicos, nuevas metodologías analíticas y la creciente necesidad de optimizar recursos y mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico global.

Investigaciones recientes han destacado la importancia de implementar estrategias integrales de mantenimiento que no solo reactiven y prolonguen la vida útil de los transformadores, sino que también reduzcan los costos operativos y minimicen el impacto ambiental. Esta evolución ha llevado a las empresas de distribución de energía eléctrica a adoptar enfoques más proactivos, incorporando técnicas avanzadas de monitoreo y diagnóstico que permiten identificar y abordar posibles problemas antes de que se conviertan en fallas costosas.

La gestión del mantenimiento para una empresa de distribución de energía eléctrica busca prevenir o disminuir el riesgo de falla, recuperar el desempeño, incrementar la vida útil de sus activos, cumplir con las normas técnicas, ambientales y de seguridad vigentes mejorando los índices de confiabilidad y la imagen empresarial mediante la calidad del servicio. Se hace diferencia entre tres tipos de mantenimiento: correctivo, preventivo y predictivo.(Álvarez et al, 2022, p. 2).

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

Entre estos tipos, el mantenimiento correctivo responde de manera reactiva ante fallas imprevistas, mientras que el preventivo se orienta a la programación regular de inspecciones y ajustes para prevenir problemas futuros. Por otro lado, el mantenimiento predictivo utiliza datos y análisis avanzados para identificar patrones de deterioro y planificar intervenciones precisas, optimizando así los recursos y minimizando tiempos de inactividad no programados en el sistema eléctrico. Así, en la industria de la energía, la eficacia del mantenimiento juega un papel crucial en la optimización de la disponibilidad y funcionamiento de la maquinaria y equipos esenciales.

En los entornos productivos se busca asegurar la máxima disponibilidad de la maquinaria, equipo e instrumental necesarios para cumplir con las diferentes operaciones. Para evitar sobrecostos, interrupciones inesperadas en los procesos y prolongar la vida útil de las máquinas, equipos e instrumentos se hace necesario gestionar las operaciones de mantenimiento. (Arango et al, 2020, p. 39).

Entonces, esto implica implementar programas que incluyan tanto el mantenimiento preventivo, que se realiza de forma planificada según el calendario o los ciclos de operación, como el mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo emplea datos históricos para predecir eventos futuros. Normalmente, los datos históricos se utilizan para crear un modelo matemático que capture las tendencias importantes. Este modelo predictivo se usa entonces con los datos actuales para predecir lo que pasara a continuación, o bien para sugerir acciones que llevar a cabo con el fin de obtener resultados óptimos. El mantenimiento predictivo ha recibido mucha atención en los últimos años debido a los avances en la tecnología que lo respalda, especialmente en las áreas de big data y aprendizaje automático (Álvarez et al, 2022, p. 3).

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

El mantenimiento predictivo puede ser una herramienta invaluable en la gestión moderna de activos industriales. Al aprovechar la combinación de datos históricos y tecnología avanzada, las organizaciones pueden anticipar y mitigar problemas potenciales antes de que afecten la operación. Este enfoque no solo mejora la eficiencia operativa al reducir el tiempo de inactividad no planificado, sino que también optimiza los recursos al priorizar intervenciones según la necesidad real. Cabe precisar, que lo ideal es no llegar al mantenimiento correctivo inmediato que finalmente es reparar luego de una falla súbita. Entonces, debido a la complejidad y alto costo de algunos elementos de los sistemas eléctricos, las empresas de distribución deben priorizar de acuerdo con una criticidad la relevancia de mantenimiento de sus activos, por ende los transformadores de potencia están en la primera línea de atención.

El transformador de potencia (TP) es uno de los componentes principales de las subestaciones en los sistemas eléctricos de potencia y representan una costosa inversión, alcanzando hasta el 60 % del costo total de la subestación. La evaluación de la condición del TP ayuda a aumentar su disponibilidad, al garantizar un seguimiento adecuado que busca prolongar su vida útil por medio de rutinas de mantenimiento y reparación. El estado de condición de un TP, también llamado “estado de salud”, está influenciada por múltiples factores, incluidas las sollicitaciones de tipo química, eléctrica y mecánica, que operan de manera simultánea. (Núñez et al, 2023, p. 50).

La metodología de salud de transformadores de potencia se centra en la evaluación integral del estado y rendimiento de estos equipos cruciales para las redes eléctricas. Este enfoque combina técnicas avanzadas de monitoreo, diagnóstico y análisis para prevenir fallas imprevistas y prolongar la vida útil de los transformadores, se han desarrollado varios

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

estudios para establecer criterios adecuados para su implementación entre ellos el desarrollado por Núñez et al. (2023):

En este artículo, se propone un método novedoso para calcular un HI de transformadores de potencia, basado en un enfoque de SPP, analizando el transformador en dos zonas. Esto es, el HI se divide en dos subíndices, que permiten determinar el índice de salud total mediante una serie de pruebas fuera de línea, que se realizan normalmente en los TP (pruebas de rutina). (p.51).

Estas técnicas permiten identificar tempranamente posibles problemas o desviaciones en el comportamiento del transformador, facilitando la planificación de intervenciones de mantenimiento preventivo o correctivo de manera oportuna. La metodología de salud de transformadores no solo optimiza la confiabilidad y disponibilidad de los activos, sino que también reduce costos operativos al minimizar el tiempo de inactividad y maximizar la eficiencia energética de las redes eléctricas. Asimismo, de acuerdo con la literatura del mantenimiento de transformadores y de su salud, se incluye también el estudio de su aceite dieléctrico para apoyados en desarrollos matemáticos, estimar un tiempo de vida útil, para esto se puede aplicar el análisis de contenidos furánicos.

La determinación del contenido de compuestos furánicos en el aceite del transformador es un método de ensayo comúnmente utilizado para el diagnóstico del grado de envejecimiento del papel impregnado en aceite del equipo. A diferencia, por ejemplo, del monóxido y dióxido de carbono (CO y CO<sub>2</sub>), que se producen durante la degradación o envejecimiento del aislamiento de celulosa y también del aceite mineral, los compuestos furánicos son exclusivamente generados como un subproducto de las reacciones de degradación o envejecimiento del aislamiento de celulosa, lo que hace que los resultados del diagnóstico sean más confiables. El contenido de furanos de los aceites ha sido estudiado durante años y algunos autores

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

han propuesto modelos teóricos para estimar el grado de polimerización (GP) del papel a partir del contenido de furanos, pero el análisis y la interpretación de los resultados no es tan claro y se necesita más trabajo para obtener un método más útil [9]. (Montané et al, 2019, p. 247).

Además del estudio de los contenidos de furanos, el análisis de los gases disueltos en el aceite del transformador y el análisis de la calidad del aceite, juegan un papel clave como técnica actual para ayudar a estimar la vida útil remante, definir prioridades en las actividades de mantenimiento, además de brindar recomendaciones para reposiciones teniendo en cuenta la criticidad de la subestación donde este ubicado.

Las pruebas eléctricas de rutina son fundamentales para asegurar la confiabilidad de los transformadores de potencia en las redes eléctricas. Estas pruebas permiten detectar y prevenir problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas costosas o peligrosas. La prueba de resistencia de aislamiento, por ejemplo, verifica la integridad del aislamiento entre los devanados y tierra, asegurando que no existan corrientes de fuga que puedan comprometer la operación del transformador. La prueba de relación de transformación es esencial para garantizar que el transformador esté operando dentro de los parámetros especificados, lo que asegura la correcta entrega de voltaje y corriente a los consumidores. Las pruebas de resistencia de devanados y factor de potencia evalúan la calidad y eficiencia del aislamiento y ayudan a prevenir pérdidas de energía y sobrecalentamientos.

La detección temprana de descargas parciales mediante pruebas específicas es crucial para identificar posibles fallas incipientes en el aislamiento, evitando así daños mayores al transformador. Además, las pruebas de rigidez dieléctrica y frecuencia de resonancia aseguran que el aislamiento pueda soportar sobretensiones y otras condiciones

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

adversas sin comprometer la seguridad ni la operación del sistema eléctrico. Adicional a las pruebas eléctricas de rutina también se disponen de otras especializadas para el diagnóstico y mantenimiento de transformadores de potencia, entre otras se utiliza el SFRA.

El Análisis de la Respuesta al Barrido de Frecuencia se utiliza como herramienta de diagnóstico de transformadores que por alguna razón han estado sometidos a estrés eléctrico o mecánico. El estrés eléctrico es un resultado de fenómenos transitorios en los sistemas de potencia que pueden originar cortocircuitos entre conductores de los devanados y el sistema aislante ((Pérez y Hernández, 2024, p. 1).

Se describe la aplicación del análisis de respuesta al barrido de frecuencia (SFRA) como herramienta de diagnóstico de fallas en dos autotransformadores de una subestación. A diferencia de los transformadores de potencia, los autotransformadores poseen, en cada fase del devanado de alta tensión, una bobina serie y otra común, que deben ensayarse por separado para poder discriminar el estado de cada una de ellas. (p. 1).

SFRA es una técnica especializada en el mantenimiento predictivo y diagnóstico de transformadores eléctricos, ayudando a asegurar su funcionamiento fiable y prolongar su vida útil. Además, los sistemas y equipos eléctricos no están exentos de fallas a pesar de contar con técnicas de mantenimiento periódicas, la implementación de una metodología para determinar el origen de fallas en transformadores es de vital importancia para mantener la estabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos. Dado que los transformadores son componentes críticos en la infraestructura de distribución de energía. Una metodología bien definida permite identificar rápidamente la causa raíz de las fallas, ya sean de origen mecánico, eléctrico o ambiental, lo que facilita la implementación de soluciones correctivas y preventivas adecuadas.

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

La aplicación de la metodología para determinar el origen de fallas en transformadores de distribución debe estar precedida de una evaluación de los estudios realizados, análisis en detalle de las instalaciones, y procesamiento de la información existentes en las bases de datos. El esquema metodológico para el análisis de fallas en transformadores a partir del procesamiento de la información. (Montejo et al, 2023, p. 4).

La identificación de la causa raíz en la falla de transformadores de potencia es fundamental para garantizar la fiabilidad y eficiencia del sistema eléctrico. Al comprender las razones subyacentes de una falla, las empresas de servicios públicos pueden implementar medidas preventivas y correctivas específicas que eviten recurrencias, minimicen los tiempos de inactividad y reduzcan costos operativos. Además, una identificación precisa de la causa raíz permite una gestión de activos más efectiva, prolongando la vida útil de los transformadores y mejorando la seguridad operativa.

Contar con sistemas de información robustos para almacenar y gestionar información histórica de mantenimientos y fallas de transformadores de potencia es de suma importancia para la gestión efectiva de estos activos críticos. Estos sistemas permiten recopilar, organizar y analizar datos a lo largo del tiempo, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas y estratégicas. La información histórica detallada facilita la identificación de patrones y tendencias de fallas, lo que a su vez permite la implementación de programas de mantenimiento predictivo y preventivo más precisos y efectivos. Hay partes del mundo que no cuentan con ventajas tecnológicas para su implementación, tal es el caso de Cuba, por ende varios investigadores se han dado a la tarea de construir mejoras informáticas para dar solución a estas necesidades.

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

Para detectar la posible existencia de fallos en transformadores en Cuba, además del correspondiente mantenimiento periódico, se lleva a cabo un proceso de medición de un grupo de parámetros claves y pruebas que sirven para diagnosticar la condición actual de estos equipos. La frecuencia óptima a la que se realiza estas mediciones y pruebas, la cantidad de equipos a los cuales se les debe aplicar y el número efectivo de variables importantes a medir no siempre se pueden garantizar en la práctica ya que la industria eléctrica no cuenta con un sistema automatizado de almacenamiento y análisis que pueda tratar con tal cantidad de datos, siendo este el problema que enfrenta la siguiente investigación. (Hernández et al, 2013, p.84).

El proponer como primer paso recopilar y analizar la información del activo, destaca la importancia de contar con información de calidad y asegura que el analista conozca bien el activo antes del análisis. (Campo, 2019, p. 58).

La accesibilidad a datos históricos mejora la capacidad de respuesta ante emergencias, ya que permite una rápida referencia a registros pasados para diagnosticar problemas recurrentes y aplicar soluciones comprobadas. También facilita la planificación a largo plazo y una buena programación de actividades de mantenimiento lo cual es esencial para sistematizar y optimizar el proceso, garantizando que se realicen de manera regular y eficiente, incluyendo mejoras metodológicas e informáticas para su desarrollo adecuado.

Se presenta una técnica avanzada para programar las actividades de mantenimiento, de forma que se minimiza el máximo tiempo requerido para mantenimientos preventivos por semana de trabajo, lo que redundará en un flujo de programación del mantenimiento más eficiente, sin picos de alta carga de trabajo para los recursos dedicados al mantenimiento y sin subutilización de los recursos.(Arango et al, 2020, p 40).

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM por sus siglas en inglés) es una metodología altamente reconocida y de uso extendido para elaborar planes de

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

mantenimiento que incluyan todo tipo de estrategias de mantenimiento (preventivo, predictivo, búsqueda de fallas, etc.). (Campo, 2019, p. 52).

Aplicar RCM en transformadores de potencia no solo mejora su confiabilidad y disponibilidad operativa, sino que también optimiza los recursos, reduce costos y fortalece el cumplimiento normativo, proporcionando un enfoque integral y efectivo para la gestión del mantenimiento basado en la confiabilidad y el rendimiento. El mantenimiento de transformadores de potencia representa la continuidad y la responsabilidad hacia el entorno y la sociedad. Cuidar y mantener estos equipos es una manifestación del principio de respeto y cuidado por los recursos naturales y tecnológicos que sustentan nuestra infraestructura eléctrica moderna. Más allá de su función técnica, el mantenimiento refleja un compromiso ético con la sostenibilidad y la preservación, asegurando que los recursos energéticos se utilicen de manera eficiente y responsable.

El mantenimiento permite formular estrategias que respondan a las nuevas expectativas; estas incluyen la toma de conciencia para analizar y evaluar los puntos de fallas de los equipos, maquinarias y vehículos que afectan a la seguridad, al medio ambiente y al consumo energético. (Páez, 2022, p. 140)

En consecuencia, en un sentido más amplio, el mantenimiento refleja la idea de que el cuidado continuo y la atención meticulosa a los detalles son determinantes para mantener la integridad y la funcionalidad de los sistemas complejos que sustentan nuestra calidad de vida y desarrollo tecnológico.

## 2.2. Marco teórico

La *Teoría de la Gestión del Mantenimiento* propuesta por John Moubray está asociada principalmente con la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y su desarrollo a través de la publicación de su libro "RCM2: Reliability-Centered Maintenance" en 1997. Por su parte, esta teoría se centra en la aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) como una metodología estructurada para optimizar la gestión de activos físicos, especialmente en entornos industriales y de infraestructura crítica como los transformadores de potencia. Esta teoría se fundamenta en varios principios elementales:

- **Identificación de Funciones Críticas:** RCM identifica las funciones esenciales que deben ser mantenidas para asegurar la operación segura y eficiente del equipo, como la entrega confiable de energía eléctrica en el caso de transformadores.
- **Análisis de Modos de Falla:** Se evalúan los modos de falla potenciales que pueden afectar las funciones críticas del equipo. Esto incluye tanto fallas funcionales (que afectan la operación) como fallas técnicas (que afectan la integridad estructural o funcional).
- **Estrategias de Mantenimiento:** Basado en el análisis de riesgos, se desarrollan estrategias de mantenimiento adecuadas para mitigar o prevenir los modos de falla identificados. Esto puede incluir mantenimiento preventivo, predictivo, y correctivo según la criticidad y el riesgo asociado.
- **Optimización de Recursos:** RCM busca optimizar la utilización de recursos, asegurando que las actividades de mantenimiento se realicen de manera efectiva y eficiente para maximizar la vida útil del equipo y minimizar costos operativos.
- **Mejora Continua:** La metodología promueve un ciclo de mejora continua, donde se revisan y ajustan las estrategias de mantenimiento basadas en el rendimiento del equipo y los datos operativos recopilados.

El RCM es una técnica para elaborar un plan de mantenimiento que disminuye las interrupciones de los procesos, en este caso en particular suspensiones en el servicio

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

de energía eléctrica, por averías imprevistas. Para esto se analizan los fallos potenciales del sistema a profundidad y se identifican las acciones a realizar para evitarlos. (Álvarez et al, 2022, p. 3).

En el contexto de los transformadores de potencia, la aplicación de la *Teoría de la Gestión del Mantenimiento* permite identificar y priorizar las tareas de mantenimiento críticas, basadas en el análisis del impacto potencial de las fallas y la criticidad de los equipos. Esto se alinea perfectamente con los objetivos de optimización de recursos, mejora de la confiabilidad y cumplimiento de normativas, aspectos fundamentales en la gestión de transformadores que operan en redes

### **2.3. Marco conceptual**

El mantenimiento se entiende como el "conjunto de técnicas, normas y procedimientos que tienen como objetivo prolongar la vida útil de un bien, reducir los riesgos de falla o mal funcionamiento, y prevenir accidentes." (Lapierre, 2005, p.3). Asimismo, como "el conjunto de todas las acciones técnicas, administrativas y de supervisión durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a mantener o devolver este elemento en un estado en el cual pueda desempeñar la función requerida." (Laramée 2015). Por último, se entiende como el mantenimiento comprende todas las acciones destinadas a mantener o restaurar un bien en un estado en el que pueda desempeñar una función requerida. (Groucutt 1989).

De esta forma, las definiciones de mantenimiento de André Blanc-Lapierre, Michael G. Laramée y Paul Groucutt comparten el objetivo común de asegurar que un bien pueda cumplir con su función requerida de manera efectiva y segura. Blanc-

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

Lapierre enfatiza el uso de técnicas, normas y procedimientos para prolongar la vida útil del bien, reducir riesgos de falla y prevenir accidentes, destacando un enfoque preventivo y normativo. En contraste, Laramée amplía esta perspectiva al incluir no solo acciones técnicas sino también administrativas y de supervisión a lo largo del ciclo de vida del elemento, subrayando la gestión integral del mantenimiento. Por otro lado, Groucutt ofrece una definición más general y orientada hacia la restauración del bien en un estado funcional adecuado, sin especificar explícitamente la gestión a lo largo del ciclo de vida. Estas diferencias reflejan diferentes enfoques dentro del campo del mantenimiento, desde la prevención activa hasta la restauración oportuna y la gestión integral de recursos.

Así, la presente investigación entiende mantenimiento como el conjunto de actividades sistemáticas, tanto técnicas como administrativas, destinadas a garantizar la funcionalidad, operatividad, seguridad y confiabilidad de los sistemas y equipos eléctricos a lo largo de su ciclo de vida, mediante la aplicación de prácticas preventivas, predictivas y correctivas.

## 2.4. Marco normativo

**Tabla 1**

*Esquema normativo*

ITEM	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	Norma Técnica Colombiana NTC 4173	Requisitos técnicos para el mantenimiento de transformadores de potencia y distribución.
2	Norma Técnica Colombiana NTC-IEC 60076	Adopta la normativa internacional IEC para transformadores de potencia, incluyendo aspectos de mantenimiento.
3	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE	Establece normas de seguridad para instalaciones eléctricas que afectan indirectamente al mantenimiento de transformadores.

Fuente: elaboración propia

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipología de investigación**

La investigación planteada puede considerarse de tipología correlacional pues se buscó determinar la relación entre las diferentes técnicas o prácticas de mantenimiento y la vida útil de los transformadores de potencia. Es decir, se intentó identificar qué prácticas de mantenimiento se correlacionan con una mayor duración de los transformadores.

Asimismo, al analizar cuáles técnicas son más efectivas, se estudia cómo las distintas prácticas de mantenimiento se asocian con resultados específicos en términos de prolongación de la vida útil de los transformadores, lo que implicó un análisis correlacional para identificar las prácticas que tienen una mayor asociación positiva con el objetivo deseado. Además, para determinar cuáles son las técnicas más acertadas a implementar, se debe comparar cómo distintas prácticas influyen en la vida útil de los transformadores. Esto se logra mediante el análisis de la correlación entre la implementación de ciertas técnicas y los resultados obtenidos en términos de duración de los equipos.

#### **3.2. Enfoque de investigación**

Se planteó un enfoque de investigación tipo cuantitativo.

### **3.3. Población**

Esta investigación se basó en la revisión de publicaciones, artículos técnicos, manuales o procedimientos de empresas del sector de distribución de energía eléctrica principalmente en Colombia.

### **3.4. Diseño de investigación**

El diseño de investigación incorporó la ejecución de las siguientes actividades:

- A. Establecer las técnicas y estrategias de mantenimiento actuales de transformadores de potencia.
  - 1. Revisar investigaciones académicas, artículos técnicos y publicaciones relevantes sobre mantenimiento de transformadores de potencia.
  - 2. Extraer información sobre las técnicas y estrategias de mantenimiento documentadas en la literatura.
  - 3. Recopilar y analizar manuales de mantenimiento, procedimientos operativos estándar y registros de mantenimiento de transformadores.
  - 4. Identificar y seleccionar casos representativos de empresas de distribución de energía que utilicen diferentes técnicas y estrategias de mantenimiento.
  - 5. Clasificar y organizar los datos recopilados en categorías relevantes (por ejemplo, técnicas preventivas, predictivas, correctivas).
  - 6. Redactar un informe preliminar que detalle las técnicas y estrategias de mantenimiento actuales identificadas.

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

- B. Comparar las técnicas de mantenimiento disponibles de transformadores de potencia.
1. Establecer criterios de comparación relevantes, como costos, efectividad, tiempo de implementación, impacto en la vida útil de los transformadores y requisitos de recursos.
  2. Analizar y comparar las técnicas de mantenimiento según los criterios establecidos, utilizando herramientas de análisis comparativo (por ejemplo, matrices de evaluación).
  3. Basado en el análisis comparativo, identificar y documentar las mejores prácticas de mantenimiento.
- C. Determinar cuál o cuáles técnicas de mantenimiento son más acertadas de implementar actualmente en empresas de distribución de energía eléctrica.
1. Definir criterios clave como costo, efectividad, tiempo de implementación, impacto en la vida útil de los transformadores, facilidad de adopción, y disponibilidad de recursos.
  2. Analizar los beneficios potenciales en términos de prolongación de la vida útil de los transformadores, reducción de fallas, y mejoras en la eficiencia operativa.
  3. Basado en el análisis comparativo, costo-beneficio y viabilidad, identificar las técnicas de mantenimiento más acertadas para su implementación.
- D. Recomendar prácticas o técnicas de mantenimiento adecuadas de transformadores de potencia, para proyectos de mejora en las áreas encargadas de mantener la vida útil de estos equipos, en empresas del sector de distribución energía.
1. Analizar estudios de casos de empresas que han implementado las técnicas de mantenimiento para obtener datos empíricos sobre su desempeño.

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

2. Desarrollar recomendaciones detalladas para la implementación de las técnicas seleccionadas.
3. Redactar un informe final que detalle el proceso de evaluación, los hallazgos y las recomendaciones.

### **3.5 Métodos de investigación/técnicas de recolección información**

En primer lugar, se revisaron en total 5 investigaciones académicas, artículos técnicos o publicaciones relevantes sobre mantenimiento de transformadores de potencia. Luego, se extrajo información sobre las técnicas y estrategias de mantenimiento documentadas en la literatura para después, recopilar y analizar manuales de mantenimiento, procedimientos operativos estándar y registros de mantenimiento de transformadores. Más adelante, se identificaron y seleccionaron los casos representativos de empresas de distribución de energía que utilicen diferentes técnicas y estrategias de mantenimiento. Asimismo, se clasificaron y organizaron los datos recopilados en categorías relevantes (por ejemplo, técnicas preventivas, predictivas, correctivas). Por último, se redactó un informe preliminar que detalle las técnicas y estrategias de mantenimiento actuales identificadas.

#### 4. RESULTADOS

Los transformadores de potencia son dispositivos instalados en subestaciones de alta potencia que representan la mayor inversión, correspondiendo aproximadamente al 60% del capital invertido (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2020). Por su parte, la falla de activos de alta potencia puede ser desastrosa (Hernández y Guidos, 2020), generando costos directos e indirectos para los sectores industrial, comercial y residencial (Gallo, 2010), además de tener un impacto negativo en la vida social de los usuarios de energía eléctrica (Pérez, 2012). De esta manera, una interrupción en el suministro de energía eléctrica puede tener pérdidas que no siempre son completamente medibles, llegando a superar el valor de inversión en el activo. Por lo tanto, la evaluación del estado operativo de los transformadores de potencia es una etapa para el mantenimiento del suministro eléctrico y el aumento de la confiabilidad de la red.

De esta forma, la priorización de estos activos críticos es un tema central en cualquier sistema crítico basado en energía. Esto se debe principalmente a la escasez de recursos y a la dificultad e impacto de su desconexión. Para verificar el estado operativo de los activos de alta potencia, han surgido varios equipos, procedimientos y metodologías. Sin embargo, con la gran cantidad de métodos de evaluación disponibles, a veces ocurren contradicciones entre los resultados de diferentes pruebas, lo que hace que no sea trivial integrar estos resultados para obtener la condición operativa del equipo.

La gestión técnica y financiera de las subestaciones eléctricas implica la evaluación del estado operativo de los transformadores de potencia. Esta evaluación es una etapa para mantener el suministro eléctrico y la eficiencia en el uso de recursos, guiando el proceso de

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

mantenimiento y/o actualización del parque de transformadores. Este proceso tiene como objetivo identificar activos en condiciones operativas críticas dentro de una subestación, que pueden representar riesgos para los operadores, los equipos instalados y los clientes.

El uso de técnicas de inteligencia computacional busca asistir en el proceso de evaluación, el cual no es sencillo, ya que requiere combinar mediciones que evalúan diferentes aspectos de los transformadores de potencia (Pérez, 2012). Es necesario un conocimiento técnico profundo de mediciones químicas, eléctricas y físicas para inferir un diagnóstico correcto. Por lo tanto, las técnicas de inteligencia computacional pueden reducir la dependencia de la experiencia humana, ya que son capaces de extraer patrones de información conocida y optimizar la identificación de activos críticos (Nedjah et al. 2022).

En la revisión se encontraron estudios que aplican técnicas de inteligencia computacional con el objetivo de componer un índice numérico, denominado Índice de Salud (Health Index), para la priorización de activos. La priorización ayuda a clasificar los activos según niveles de criticidad. La información utilizada para componer el índice se basa en mediciones realizadas en transformadores reales (Gallo, 2010). De esta forma, las técnicas de inteligencia computacional se exploran para la composición del Índice de Salud, ya que no existen publicaciones previas que apliquen estas técnicas para resolver este tipo de problema de priorización.

El Índice de Salud es una metodología que busca integrar varias pruebas necesarias para verificar la condición operativa del transformador, produciendo un índice numérico que representa dicha condición y permite establecer una priorización. Tradicionalmente, la composición del índice depende de expertos, quienes asignan puntuaciones a los resultados

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

de pruebas eléctricas, químicas y físicas del equipo (Da Silva et al. 2021). Para cada factor evaluado, se establecen pesos que ponderan los resultados y componen, mediante una suma, un valor numérico que indica el estado operativo del equipo. Este valor se utiliza para clasificar el conjunto de activos en una subestación. Sin embargo, no existe consenso entre los autores sobre la composición de los pesos, lo que introduce cierto grado de aleatoriedad. Esto limita la composición del Índice de Salud desde un enfoque integral, en el que factores como la capacidad de una familia de equipos no interfieran en la composición.

Da Silva et al. (2021) presentan un método para calcular el Índice de Salud de transformadores de potencia mediante redes Wavelet, que combinan las características de funciones Wavelet con capas ocultas de una red neuronal. El sistema usa 11 entradas (características químicas del aceite aislante) y 1 salida (Índice de Salud). Se valida con datos de 973 transformadores, 600 para entrenamiento y 373 para pruebas. El autor afirma que el Índice de Salud desarrollado puede justificar planes de inversión para reemplazar activos al final de su vida útil.

En el estudio de Núñez Mata et al. (2023), se presenta una metodología basada en un Índice de Salud (HI) que permite una evaluación integral de los transformadores de potencia. Este enfoque utiliza subíndices funcionales y dieléctricos que se ponderan según normas internacionales, y considera datos de pruebas fuera de línea como análisis dieléctricos, medición de descargas parciales y análisis de gases disueltos. La metodología facilita el diagnóstico al separar los análisis en zonas específicas del transformador, mejorando la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento y reemplazo de

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

equipos. Este modelo se ha validado con datos históricos de empresas de servicio público, demostrando su eficacia para prever fallas críticas (Hernández y Guidos, 2020).

Por otro lado, el trabajo de Bastidas et al. (2022) se centra en la evaluación de transformadores de potencia sumergidos en aceite en subestaciones eléctricas. Este estudio utiliza un enfoque predictivo basado en análisis fisicoquímicos, cromatografía de gases y pruebas dieléctricas, conforme a normativas ecuatorianas. La investigación destaca la importancia de realizar estas pruebas periódicamente para diagnosticar fallas iniciales y prolongar la vida útil de los transformadores (Hernández y Guidos, 2020). Además, se propone un esquema estandarizado para comparar los resultados con estándares internacionales, lo que permite tomar decisiones fundamentadas sobre el mantenimiento y la sustitución de equipos.

Finalmente, el artículo de Toquica et al. (2017) analiza la confiabilidad de subestaciones eléctricas tipo maniobra al implementar transformadores de tensión con núcleo de potencia (TTNP). Este estudio demuestra que el TTNP puede reducir significativamente las tasas de falla al mejorar la confiabilidad de los servicios auxiliares, alcanzando valores de 0,0025 fallas/año frente a las 0,31 fallas/año de sistemas tradicionales. El análisis incluyó simulaciones en software especializado para validar el desempeño en condiciones transitorias, destacando su aplicabilidad en contextos de alta exigencia operativa. Por consecuencia, la Tabla 2 expone las técnicas y estrategias de mantenimiento aplicables a transformadores de potencia, incluyendo sus características centrales:

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

**Tabla 2**

*Técnicas de mantenimiento*

<b>Técnica/Estrategia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Impacto de la duración</b>	<b>Frecuencia de la duración</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>	<b>Consideraciones para Implementación</b>
Mantenimiento Preventivo	Mantenimiento programado para garantizar el rendimiento óptimo del equipo y evitar fallas.	Comúnmente aplicado en ciclos operativos planificados.	10%	50%	Reduce el tiempo de inactividad y extiende la vida útil del equipo.	Requiere detenciones programadas y recursos constantes para inspección.	Requiere inversión inicial alta en equipos y capacitación, pero tiene un retorno positivo a mediano plazo.
Mantenimiento Predictivo	Monitoreo de indicadores específicos para predecir y prevenir fallas antes de que ocurran.	Utilizado para transformadores críticos con sistemas de monitoreo extensivos.	25%	30%	Minimiza interrupciones inesperadas y optimiza el uso de recursos.	Necesita equipos avanzados y personal capacitado, aumentando el costo inicial.	Necesita una planificación detallada y recursos constantes para realizar tareas periódicas.
Mantenimiento Correctivo	Reparación o reemplazo de componentes después de que ocurre una falla.	Desplegado en respuesta a fallos del equipo.	-5%	10%	Proporciona una solución directa a problemas inesperados.	Puede generar interrupciones de servicio significativas y altos costos si no se previno.	Puede generar costos más altos debido a interrupciones y reparaciones de emergencia.
Mantenimiento Basado en Condición	Mantenimiento del equipo basado en su condición real evaluada mediante monitoreo.	Implementado con sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real.	30%	20%	Mejora la confiabilidad y la eficiencia operativa.	Requiere infraestructura de monitoreo y análisis en tiempo real.	Requiere sistemas de monitoreo avanzado y personal calificado para interpretar los datos.

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

Análisis de Gases Disueltos (DGA)	Análisis de gases disueltos en el aceite del transformador para detectar fallas o sobrecalentamientos.	Realizado regularmente en transformadores de alta tensión.			La detección temprana de fallas previene fallos mayores.		
Análisis de Calidad del Aceite	Pruebas químicas y físicas del aceite para evaluar su capacidad de aislamiento y refrigeración.	Estándar en transformadores sumergidos en aceite.	20%	40%	Garantiza la eficiencia del aislamiento y la refrigeración.	No es suficiente para diagnosticar todas las fallas potenciales.	Ideal como complemento de técnicas predictivas.
Inspecciones Termográficas	Uso de cámaras infrarrojas para detectar puntos calientes que indiquen posibles problemas.	Utilizadas en equipos de subestaciones, incluidos transformadores.	15%	35%	Previene daños relacionados con sobrecalentamientos.	Requiere acceso regular y adecuado a los transformadores para obtener imágenes precisas.	Necesita acceso adecuado a los equipos y herramientas especializadas.
Pruebas Eléctricas	Diagnósticos eléctricos para medir la efectividad del aislamiento.	Esenciales para identificar fallos en el aislamiento.			Identifica fallas potenciales de manera temprana.	Algunas pruebas requieren desconectar el equipo, lo que podría afectar la operación.	
Inspecciones Mecánicas	Inspección de componentes mecánicos para verificar desgaste y correcto funcionamiento.	Realizadas durante revisiones de rutina o ante sospechas de problemas.			Mantiene la integridad física del equipo.		

Fuente: Elaboración propia

#### **4.1 Análisis correlacional entre técnicas de mantenimiento e incremento en la duración de los equipos de transformación**

En el ámbito de la gestión de transformadores de potencia en empresas de distribución eléctrica, la implementación de técnicas de mantenimiento determina la durabilidad y confiabilidad de estos activos estratégicos, de esta forma, según la revisión se evidencia una evolución en las prácticas de mantenimiento, desde enfoques correctivos hasta técnicas predictivas y basadas en condición, que permiten extender significativamente la vida útil de los equipos.

Por lo tanto, el mantenimiento predictivo, basado en el análisis de gases disueltos (DGA) y pruebas termográficas, presenta una correlación directa con la reducción de fallas críticas y el aumento en la vida útil de los transformadores. Según un estudio aplicado en transformadores de potencia de empresas eléctricas, estas técnicas permitieron detectar fallas incipientes, evitando daños mayores y disminuyendo los costos operativos. Asimismo, el mantenimiento basado en condición utiliza indicadores en tiempo real para programar intervenciones solo cuando son necesarias. Por otro lado, las técnicas tradicionales de mantenimiento preventivo, aunque efectivas para prevenir fallas comunes, muestran limitaciones frente a escenarios de alta complejidad, especialmente en condiciones ambientales adversas como altas temperaturas y humedad. Por su parte, la Tabla 3 muestra cómo cada técnica de mantenimiento influye en la duración de los transformadores:

**Tabla 3**

*Impacto en la duración de los equipos*

<b>Técnica de Mantenimiento</b>	<b>Resultados en Duración de Equipos</b>	<b>Observaciones Clave</b>
Mantenimiento Correctivo	Vida útil estándar, aumento en costos por fallas graves.	Útil solo como última instancia; poco eficiente a largo plazo.
Mantenimiento Preventivo	Incremento moderado (10-15%).	Requiere planificación y recursos continuos.
Mantenimiento Predictivo	Incremento significativo (20-30%).	Alta efectividad, requiere inversión en tecnología.
Mantenimiento Basado en Condición	Incremento similar al predictivo (20-30%).	Eficiencia óptima en recursos y duración de los equipos.

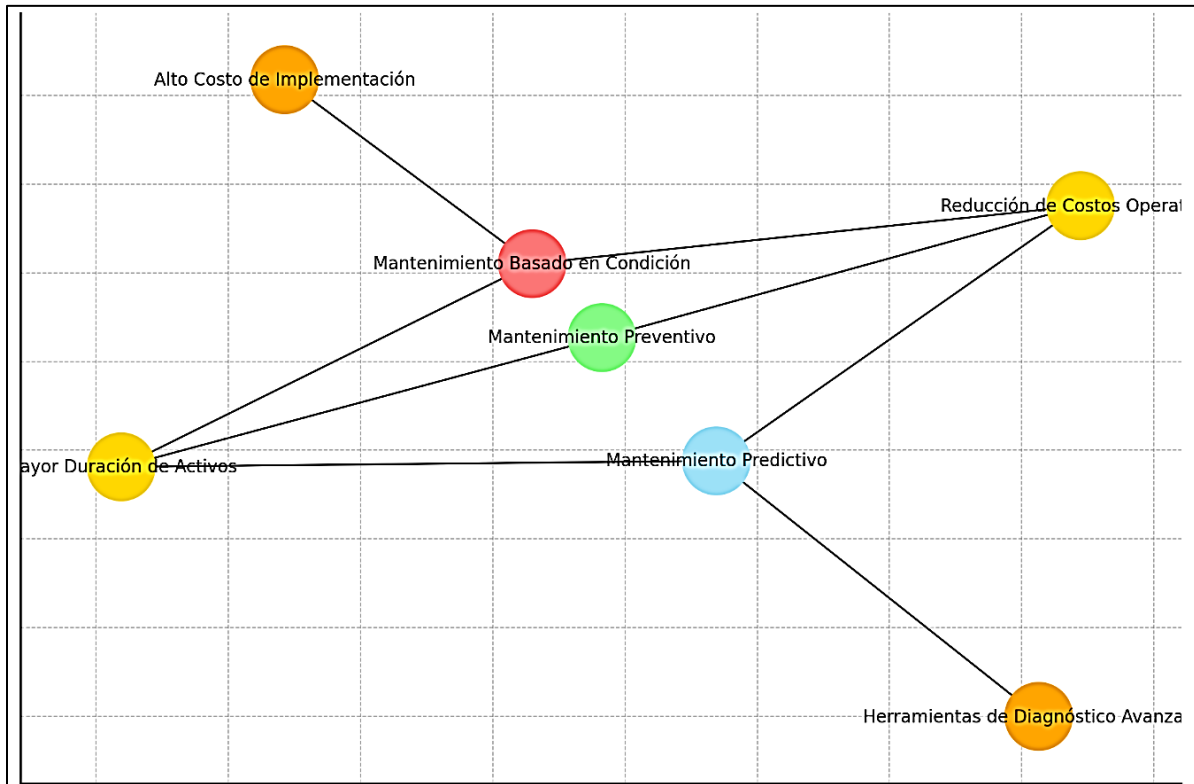
Fuente: Elaboración propia

En correspondencia con la revisión, la Gráfica 1 ilustra la correlación entre las técnicas de mantenimiento y la extensión de la vida útil de los transformadores. Se observa una tendencia clara donde las técnicas más avanzadas, como el mantenimiento predictivo y basado en condición, presentan los mayores beneficios en términos de duración y confiabilidad, en contraste con métodos correctivos y preventivos que muestran otros incrementos.

Asimismo, el coeficiente de correlación entre el "Impacto en la Duración" y la "Frecuencia de Implementación" de las diferentes técnicas de mantenimiento es aproximadamente 0.22, lo que indica una relación positiva débil. Es decir, aunque existe cierta asociación entre la frecuencia con la que se implementa una técnica y su impacto en la duración de los equipos, esta relación no es significativa.

## Gráfica 1

### Esquema de correlación



Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Propuesta de implementación

Con base en la correlación observada, se recomienda que las empresas de distribución eléctrica prioricen la adopción de técnicas predictivas y basadas en condición, complementadas con un mantenimiento preventivo bien estructurado. Por consiguiente, estas estrategias deben ser soportadas por inversiones en sistemas de monitoreo avanzado y capacitación del personal técnico para maximizar su efectividad. Así las cosas, esta integración permitirá a las empresas optimizar la vida útil de sus

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

transformadores, así garantizar la continuidad del servicio eléctrico, reduciendo tanto costos operativos como el impacto ambiental.

La revisión coincide en la adopción de estrategias avanzadas de mantenimiento para transformadores de potencia, considerando su alta inversión en la continuidad del suministro eléctrico, pues los enfoques predictivos y basados en condición, como el análisis de gases disueltos (DGA) y las pruebas termográficas, se posicionan como las técnicas más efectivas. Por ejemplo, el análisis DGA permite identificar gases críticos como el hidrógeno y el etileno, indicadores de fallas internas como descargas parciales y sobrecalentamientos, ofreciendo un diagnóstico temprano que previene fallos catastróficos (Nedjah et al., 2022; Gallo, 2010).

El mantenimiento predictivo se complementa con pruebas dieléctricas y capacitancia, fundamentales para evaluar el aislamiento del transformador. Según Gallo (2010), la medición del factor de potencia ( $F_p$ ) a través de capacitancia  $C=A\epsilon dC=dA\cdot\epsilon$ , donde  $A$  es el área de los electrodos,  $\epsilon$  la permitividad y  $d$  la distancia entre ellos, detecta movimientos en los devanados o cambios en el núcleo. Un incremento superior al 10% en capacitancia indica una deformación, recomendando intervención inmediata. Además, el monitoreo en tiempo real permite correlacionar estos resultados con parámetros eléctricos, mejorando la toma de decisiones.

Por otro lado, las pruebas eléctricas de campo, como la resistencia de aislamiento ( $R=kVAECR=ECkVA$ ), convienen para evaluar la presencia de humedad o deterioro del aceite dieléctrico. Este procedimiento se realiza aplicando voltajes diferenciados, según lo establecido por normativas internacionales como la IEEE C57.12.00 (Hernández & Guidos, 2020). Es decir, que estas pruebas son complementadas por inspecciones visuales y análisis espectroscópicos, los cuales fortalecen un diagnóstico de alto alcance.

#### **4.2.1. Eficiencia del mantenimiento predictivo.**

El mantenimiento predictivo utiliza tecnologías avanzadas como el análisis de gases disueltos (DGA) y la termografía infrarroja para monitorear el estado interno de los transformadores. Según los estudios, el DGA permite identificar gases como hidrógeno, etileno y metano, los cuales son indicadores determinantes de problemas como descargas eléctricas, sobrecalentamiento y degradación del aceite aislante.

Este enfoque ha demostrado ser altamente eficiente al reducir los costos operativos, dado que las fallas se detectan antes de que causen interrupciones. Por ejemplo, en un estudio aplicado a subestaciones eléctricas de alta tensión, se documentó una disminución del 40% en eventos críticos tras la implementación de estas herramientas predictivas. Además, esta técnica es beneficiosa en entornos con alta demanda, donde las interrupciones del servicio pueden tener repercusiones económicas y sociales considerables.

#### **4.2.2. Contribución del mantenimiento basado en condición.**

El mantenimiento basado en condición (CBM) representa una evolución respecto al predictivo al incorporar sensores en tiempo real y sistemas de monitoreo permanente, lo que permite tomar decisiones informadas sobre cuándo realizar intervenciones, evitando tanto el sobredimensionamiento como el subdimensionamiento de las actividades de mantenimiento. En empresas como la EDEQ y CENS, la implementación del CBM ha demostrado ser determinante para alargar la vida útil de los transformadores hasta un 30%. Además, este enfoque ha mejorado la disponibilidad operativa de los sistemas al reducir la necesidad de paradas programadas innecesarias. Por ejemplo, en un caso aplicado a transformadores críticos de 115 kV, el monitoreo constante de variables como la humedad y las temperaturas internas evitó una falla mayor que podría haber resultado en daños irreparables.

#### **4.2.3. Limitaciones y uso complementario del mantenimiento preventivo.**

Aunque el mantenimiento preventivo sigue siendo una técnica ampliamente utilizada, presenta limitaciones frente a los enfoques predictivos y basados en condición; lo anterior, se basa en calendarios rígidos de intervención, lo que puede resultar ineficiente si el equipo no muestra signos de desgaste. Sin embargo, el mantenimiento preventivo sigue siendo útil como base estructural para complementar otras técnicas. Por ejemplo, en entornos donde los sistemas de monitoreo no están completamente instalados, las inspecciones programadas aseguran que no se omitan riesgos evidentes. Además, es particularmente útil en componentes auxiliares de los transformadores, donde el costo de implementar monitoreo en tiempo real podría ser desproporcionado.

Entonces, el análisis de correlación realizado, basado en cinco casos empresariales de compañías de distribución eléctrica (Codensa S.A. ESP; Empresa de Energía del Quindío (EDEQ); Centrales Eléctricas del Norte de Santander (CENS); Empresa de Energía del Casanare (Enerca) y Caso de estudio de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Grupo ORCA), evidenció una relación directa entre la implementación de técnicas avanzadas de mantenimiento y el incremento en la duración de los transformadores de potencia. Las empresas que adoptaron estrategias predictivas y basadas en condición, como el análisis de gases disueltos (DGA) y sistemas de monitoreo en tiempo real, reportaron incrementos del 20-30% en la vida útil de sus equipos. Estas técnicas permitieron la detección temprana de fallas y la optimización de recursos, en contraste con métodos preventivos tradicionales que mostraron un impacto limitado en contextos de alta complejidad operativa. Los resultados sugieren que la integración de estas estrategias avanzadas, junto con enfoques preventivos estructurados, conviene para mejorar la confiabilidad operativa y reducir los costos asociados a fallas y reparaciones emergentes.

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

En últimas, las tablas 2 y 3 y gráfica 1 indican que los transformadores sujetos a mantenimientos predictivos y basados en condición pueden extender su vida útil en un 20-30% en comparación con aquellos que reciben exclusivamente mantenimiento correctivo o preventivo. Asimismo, en empresas como la EDEQ y CENS, la implementación de estas técnicas ha reducido significativamente los tiempos de inactividad y los costos asociados a reparaciones emergentes.

Para mejorar la gestión de los transformadores de potencia en empresas de distribución de energía, conviene la implementación de prácticas de mantenimiento avanzadas que extiendan su vida útil y reduzcan costos operativos. Entre las recomendaciones, el mantenimiento predictivo, basado en técnicas como el análisis de gases disueltos (DGA) y las inspecciones termográficas, permite identificar fallas incipientes como sobrecalentamientos y degradaciones en el aceite aislante, previniendo interrupciones críticas. Estas técnicas, combinadas con tecnologías avanzadas, pueden incrementar la vida útil de los transformadores en un 20-30%, al tiempo que optimizan los recursos mediante la programación de intervenciones basadas en el estado real de los equipos. Asimismo, se debe invertir en capacitación técnica y sistemas de monitoreo permanente para maximizar estas estrategias.

Adicionalmente, el mantenimiento basado en condición (CBM) se presenta como una evolución, al permitir la supervisión continua mediante sensores en tiempo real y análisis de variables críticas como humedad y temperatura interna; esta metodología mejora la disponibilidad operativa y minimiza las paradas innecesarias, optimizando la gestión de recursos. Complementar estas estrategias con un mantenimiento preventivo estructurado, en componentes auxiliares, asegura una cobertura integral del cuidado de los transformadores. Asimismo, estas prácticas deben ser apoyadas por normativas comparativas con estándares internacionales.

## 5. CONCLUSIONES

La importancia de contar con herramientas que integren diversas pruebas lleva a establecer la condición operativa del equipo y, por ende, a priorizar entre un conjunto de activos que no siempre comparten las mismas características dentro de una subestación. Esto representa una oportunidad para desarrollar una herramienta con un enfoque más general. En este trabajo, presentamos una nueva propuesta para la clasificación y priorización de transformadores de alta potencia, realizando la composición del Índice de Salud mediante técnicas de inteligencia computacional, como la Optimización por Enjambre de Partículas, la Optimización de Manadas de Elefantes y los Algoritmos Genéticos.

Las técnicas predictivas y las basadas en condición son las más acertadas actualmente, especialmente para subestaciones eléctricas con alcance regional y con un enfoque en minimizar interrupciones y optimizar recursos. Estas técnicas aprovechan tecnologías avanzadas como el análisis DGA y el monitoreo continuo para prevenir fallas y reducir costos operativos en el largo plazo.

Los resultados del análisis destacan que una combinación estratégica de técnicas predictivas, basadas en condición y preventivas proporciona la mejor relación costo-beneficio. Las empresas de distribución eléctrica que han adoptado esta metodología han mejorado la duración de sus equipos y han optimizado la confiabilidad del servicio. La inversión en tecnología y capacitación técnica conviene para garantizar el éxito de estas estrategias en el largo plazo.

Por lo tanto, el mantenimiento predictivo y basado en condición maximiza la confiabilidad operativa y extiende la vida útil de los transformadores en aproximadamente un 30% según los estudios revisados. Sin embargo, su implementación requiere inversión en tecnologías avanzadas y capacitación técnica. Como recomendación, las empresas deben priorizar estas estrategias en combinación con un mantenimiento preventivo estructurado. Además, adoptar sistemas de monitoreo en línea y metodologías basadas en índices de salud puede optimizar recursos y asegurar la sostenibilidad operativa. La

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

integración de pruebas capacitivas y análisis dieléctricos permite identificar fallos antes de que se conviertan en problemas críticos, garantizando así una operación segura de los activos.

En conclusión, los enfoques avanzados, como el mantenimiento predictivo y el basado en condición, son las estrategias más efectivas para prolongar la vida útil de estos activos críticos, pues permiten identificar fallas incipientes y priorizar intervenciones mediante tecnologías como el análisis de gases disueltos (DGA) y el monitoreo termográfico. En particular, el mantenimiento basado en condición, que utiliza sensores en tiempo real y sistemas de monitoreo permanente, optimiza recursos y reduce la necesidad de paradas programadas, mostrando un impacto positivo tanto en la confiabilidad operativa como en la reducción de costos.

En contraste, las técnicas tradicionales, como el mantenimiento preventivo y correctivo, presentan limitaciones en términos de eficiencia y capacidad para gestionar escenarios de alta complejidad. Si bien el mantenimiento preventivo sigue siendo útil como complemento estructural, carece de la adaptabilidad y precisión de los enfoques avanzados. Por ello, las empresas del sector energético deben transitar hacia modelos más sofisticados de gestión de activos, respaldados por normativas y estándares internacionales, para maximizar la durabilidad y el rendimiento de sus transformadores de potencia.

Para proyectos de mejora en empresas de distribución de energía, se recomienda priorizar la implementación de mantenimiento predictivo y basado en condición, invirtiendo en tecnologías avanzadas como sistemas de monitoreo en tiempo real y análisis computacional. Estas estrategias deben ir acompañadas de un programa de capacitación integral para el personal técnico, asegurando la correcta interpretación de los datos y la toma de decisiones fundamentadas. Asimismo, conviene establecer un marco regulatorio que permita comparar los resultados con estándares internacionales, favoreciendo diagnósticos más precisos y una gestión más eficiente de los activos. Finalmente, la integración de técnicas avanzadas con un mantenimiento preventivo estructurado puede garantizar la continuidad del servicio eléctrico, minimizando interrupciones y costos operativos.

### Referencias bibliográficas

- Álvarez Q., L. I., Lozano M., C. A., & Bravo M., D. A. (2022). Metodología para el mantenimiento predictivo de transformadores de distribución basada en aprendizaje automático. *Ingeniería*, 27(3). <https://doi.org/10.14483/23448393.17742>
- Arango Marín, J. A., Rosero Otero, S. L., & Montoya Arias, M. E. (2020). Programación de mantenimiento preventivo usando algoritmos genéticos. *Lámpsakos*, (23), 37-44. <https://doi.org/10.21501/21454086.3112>
- Bastidas, A., Maquilón, J., & Chávez, C. (2022). Evaluación del estado de funcionamiento de transformadores de potencia sumergidos en aceite en las subestaciones eléctricas. *Revista Ingenio*, 5(1), 22-33. <https://doi.org/10.29166/ingenio.v5i1.3608>
- Campos López, O., Tolentino Eslava, G., Toledo Velázquez, M., & Tolentino Eslava, R. (2019). Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos. *Científica*, 23(1), 51-59. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61458265006>
- Centrales Eléctricas del Norte de Santander S.A. ESP. (2023). Norma técnica para subestaciones. <https://www.cens.com.co/Portals/cens/institucional/Especificaciones/Documentos-en-revision/norma-tecnica/Cap%20C3%ADtulo%20%20Subestaciones%20CENS-Norma%20T%20C3%A9cnica%20-%20CNS-NT-04%20.pdf?ver=RrLcz9xR4BiYNUubrIPIWg%3D%3D>

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

Codensa S.A. ESP. (2004). Especificación técnica: Transformadores de potencia.

<https://www.enel.com.co/es/empresas/normas-tecnicas/especificaciones-tecnicas-para-materiales-y-equipos-de-alta-tension/ET-AT-001.html>

Da Silva, R. L., Almeida, F. M., & Vieira, R. F. (2021). Una metodología de bajo costo para estimar el índice de salud de transformadores. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(5), 2321-2330.

Empresa de Energía del Casanare. (2017). Norma de construcción de redes de media y baja tensión. <https://www.enerca.com.co/media/e04of14w/ma-mde-pse-01-norma-de-construcci%C3%B3n-de-redes-de-media-y-baja-tensi%C3%B3n.pdf>

Empresa de Energía del Quindío S.A. ESP. (2023). Norma para subestaciones: Capítulo 4. <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/Subestaciones-Ele%CC%81ctricas.pdf>

Gallo Martínez, E. (2010). Diagnóstico y mantenimiento de transformadores en campo: Diagnóstico de campo. Transequipos S.A.

Hernández Arévalo, J. E., & Guidos Espinoza, D. F. (2020). Análisis de fallas en transformadores de potencia y su prevención. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Hernández Soberao, M. C., Hernández Román, J., & Hernández Montero, F. E. (2013). Sistema para la gestión de la condición de los transformadores de potencia. *Científica*, 17(2), 83-88. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61429574004>

## Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

- Montané García, J. J., Dorrbercker Drake, S. A., & del Castillo Serpa, A. M. (2019). Avances en evaluación del estado y la vida remanente de transformadores de fuerza. *Ingeniería Energética, XL(3)*, 245-256. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329160723008>
- Montejo Sivilla, J. E., Sierra Gil, E., & Contreras Barrera, R. (2023). Determinación de la causa raíz de fallas en transformadores de distribución. *Ingeniería Energética, XLIV(3)*, 56-65. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329176284007>
- Nedjah, N., Mourelle, L. M., dos Santos, R. A., & dos Santos, L. T. B. (2022). Sustainable maintenance of power transformers using computational intelligence. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 1, 100001. <https://doi.org/10.1016/j.stae.2022.100001>
- Núñez Mata, Ó., Gómez-Ramírez, G. A., Acuña Rojas, F., & González Solís, C. (2023). Metodología para Evaluar la Condición de Transformadores Eléctricos de Potencia Basada en un Índice de Salud. *Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica, 33(1)*, 48-65. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44172347004>
- Páez Advíncula, R. R., (2022). Importancia de la ingeniería de confiabilidad operacional para el desarrollo empresarial. *Industrial Data, 25(1)*, 137-146. <https://doi.org/10.15381/idata.v25i1.21224>
- Pérez Donsión, M. (2012). Transformadores de potencia. Universidad de Vigo, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- Pérez Hernández, R., & Hernández Areu, O. (2024). Aplicación de la técnica del barrido de frecuencia, en el diagnóstico de los devanados de dos autotransformadores de potencia.

Comparación de técnicas de mantenimiento para transformadores de potencia

*Ingeniería Energética, XLV(1), 25-33.*  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329177474003>

Saldivia, F., Acevedo, E., & Pérez, R. (2013). Estrategias de mantenimiento predictivo aplicables a transformadores de potencia de una empresa eléctrica. 11th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013).

<https://laccei.org/LACCEI2013-Cancun/RefereedPapers/RP266.pdf>

Toquica, D. V., Garzón Bustos, C., & Narváez Cubillos, A. (2017). Análisis de confiabilidad en subestaciones eléctricas tipo maniobra implementando el transformador de tensión con núcleo de potencia. *Ingeniería*, 22(1), 65-82.

<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.1.a09>

Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2020). Caracterización de subestaciones eléctricas. Grupo de investigación ORCA.