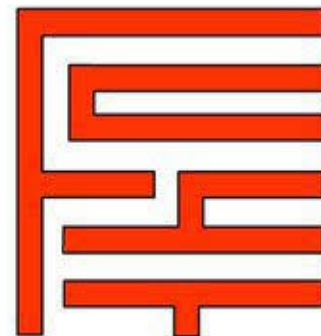


UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Análisis de Gases Disueltos en Transformadores de Potencia Diagnostico por IA para ENDE Transmisión

PROYECTO DE GRADO PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA ELÉCTRICA

REALIZADO POR : CRISTIAN BALLESTEROS HUANACO

TUTOR : ING. MARCELO HINOJOSA TORRICO

COCHABAMBA – BOLIVIA

2025

DEDICATORIA:

AGRADECIMIENTOS:

FICHA RESUMEN

ÍNDICE

1	MARCO REFERENCIAL	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	ANTECEDENTES	2
1.3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.4	OBJETIVOS DEL PROYECTO	8
1.4.1	OBJETIVO GENERAL.....	8
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.5	JUSTIFICACIÓN	9
1.5.1	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.....	9
1.5.2	JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA	9
1.5.3	JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA	10
1.5.4	JUSTIFICACIÓN SOCIAL	10
1.5.5	JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL	10
1.6	ALCANCE Y LIMITACIONES	10
1.6.1	ALCANCE ESPACIAL	11
1.6.1.1	ALCANCE GEOGRÁFICO	11
1.6.1.2	ALCANCE SOCIAL	11
1.6.1.3	ALCANCE ECONÓMICO	11
1.6.2	ALCANCE TEMPORAL.....	11
1.6.3	ALCANCE TEORICO	11
1.6.4	LIMITACIONES	12
1.7	METODOLOGÍA.....	12
1.8	CONTENIDO TENTATIVO	14
1.9	CRONOGRAMA.....	18
1.10	BIBLIOGRAFÍA	18
2	FUNDAMENTOS DEL MANTENIMIENTO ELECTRICO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.1	EVOLUCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO Y LA CENTRALIDAD DEL DIAGNÓSTICO .	¡ERROR!
	MARCADOR NO DEFINIDO.	
2.1.1	<i>Del Mantenimiento Correctivo y Preventivo a la Necesidad de Enfoques Basados en la Condición del Activo.....</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.1.2	<i>Mantenimiento Basado en Condición (CBM) y Mantenimiento Predictivo (PdM)</i>	¡Error!
	Marcador no definido.	
2.1.2.1	Principios, Beneficios y el Rol Indispensable del Diagnóstico de Condición....	¡Error! Marcador no definido.

2.1.3	<i>Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.1.3.1	<i>Filosofía y Principios para la Optimización de Estrategias</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.1.3.2	<i>El Análisis de Modos de Falla y sus Efectos (FMEA/FMECA) como Herramienta Esencial en RCM</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.1.3.3	<i>Desarrollo de Planes de Mantenimiento Efectivos Basados en la Comprensión de Fallas y su Criticidad</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.2	GESTIÓN ESTRATÉGICA DEL MANTENIMIENTO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN EMPRESAS DE TRANSMISIÓN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.2.1	<i>El Transformador como Activo Crítico en el Sistema de Transmisión Implicaciones de Falla y Justificación de un Mantenimiento Avanzado.....</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.2.2	<i>Lineamientos para la Supervisión y Mantenimiento Efectivo de Transformadores: La Guía de las Normas Técnicas Internacionales</i>	¡Error! Marcador no definido.
2.2.3	<i>Breve Consideración sobre el Mantenimiento Integral en Subestaciones de Transmisión y la Interconexión de Estrategias.....</i>	¡Error! Marcador no definido.
3	EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA: COMPONENTES, FUNCIONAMIENTO Y EVALUACIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.1	PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y TIPOLOGÍAS DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.1.1	<i>Fundamentos Electromagnéticos y Relación de Transformación.....</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.1.2	<i>Clasificación General de Transformadores</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.2	COMPONENTES CONSTRUCTIVOS PRINCIPALES DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.2.1	<i>Núcleo Magnético: Función y Materiales.....</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.2.2	<i>Devanados: Tipos, Materiales y Disposición General</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.2.3	<i>Sistema de Aislamiento Principal: Papel Aislante y Aceite Mineral Dieléctrico</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.2.4	<i>Tanque Principal y Sistema de Expansión/Conservación del Aceite....</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.2.5	<i>Bushings (Aisladores Pasatapas): Función y Tipos Generales.....</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.2.6	<i>Cambiador de Tomas Bajo Carga (OLTC)</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.2.7	<i>Sistema de Refrigeración: Tipos y Finalidad</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.2.8	<i>Accesorios de Protección y Medición Comunes.....</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.3	PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y OPERATIVOS FUNDAMENTALES DEL TRANSFORMADOR	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.3.1	<i>Interpretación de la Placa de Características.....</i>	¡Error! Marcador no definido.

3.3.2	<i>Parámetros Eléctricos Determinantes del Diseño y Comportamiento Operativo.....</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.3.3	<i>Influencia de las Condiciones de Operación en la Solicitud del Transformador</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.4	VERIFICACIÓN Y EVALUACIÓN ESTÁNDAR DE LA CONDICIÓN DEL TRANSFORMADOR MEDIANTE PRUEBAS ELÉCTRICAS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.4.1	<i>Propósito General de las Pruebas Eléctricas en Fábrica y en Campo .</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.4.2	<i>Pruebas Eléctricas Fundamentales con Transformador Desenergizado y su Contribución a la Evaluación del Estado.....</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.5	REACTORES DE POTENCIA (EN ACEITE MINERAL): GENERALIDADES Y PRUEBAS APLICABLES ..	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.5.1	<i>Principio de Funcionamiento y Diferencias Clave con Transformadores ..</i>	¡Error! Marcador no definido.
3.5.2	<i>Componentes Principales y Pruebas Estándar</i>	¡Error! Marcador no definido.
4	ENVEJECIMIENTO DEL SISTEMA AISLANTE Y TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO DEL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS (AGD).....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.1	ENVEJECIMIENTO Y MECANISMOS DE DETERIORO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO ACEITE-PAPEL EN TRANSFORMADORES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.1.1	<i>Factores de Envejecimiento: Esfuerzos Térmicos, Eléctricos y Químicos</i>	¡Error! Marcador no definido.
4.1.2	<i>Procesos de Degradación del Papel Aislante y sus Subproductos</i>	¡Error! Marcador no definido.
4.1.3	<i>Procesos de Degradación del Aceite Mineral Aislante y la Generación de Gases Disueltos Clave</i>	¡Error! Marcador no definido.
4.2	TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DE TRANSFORMADORES.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.2.1	<i>Clasificación de las Técnicas de Diagnóstico: Pruebas con Transformador Desenergizado y Pruebas/Monitoreo con Transformador Energizado.....</i>	¡Error! Marcador no definido.
4.2.2	<i>Principales Pruebas de Diagnóstico con Transformador Desenergizado..</i>	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1-1 MATRIZ METODOLÓGICA.....	13
------------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 ÁRBOL DE PROBLEMAS.....	5
FIGURA 1-2 ÁRBOL DE OBJETIVOS.....	8
FIGURA 2-1 CLASIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO IEC60300-3-11	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 2-2 INTERVALO P-F	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 2-3 CICLO DE RCM	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 2-4 ESQUEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

MP = Mantenimiento Preventivo

CBM = Mantenimiento Basado en Condición (*Condition-Based Maintenance*)

PdM = Mantenimiento Predictivo (*Predictive Maintenance*)

ML = Aprendizaje Automático (*Machine Learning*)

RCM = Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (*Reliability-Centered Maintenance*)

IA = Inteligencia Artificial

ONAN = Aceite Natural - Aire Natural (Oil Natural - Air Natural)

ONAF = Aceite Natural - Aire Forzado (Oil Natural - Air Forced)

OFAN = Aceite Forzado - Aire Natural (Oil Forced - Air Natural)

OFAF = Aceite Forzado - Aire Forzado (Oil Forced - Air Forced)

ODAF = Aceite Dirigido - Aire Forzado (Oil Directed - Air Forced)

OFWF = Aceite Forzado - Agua Forzada (Oil Forced - Water Forced)

ODWF = Aceite Dirigido - Agua Forzada (Oil Directed - Water Forced)

CAPÍTULO 1

MARCO REFERENCIAL

1.1 INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico y la creciente complejidad de los sistemas eléctricos modernos han elevado la demanda por infraestructuras cada vez más confiables. En este contexto, las subestaciones eléctricas se consolidan como nodos estratégicos para integrar las etapas de generación, transmisión y distribución de energía, asegurando su continuidad y calidad.

Dentro de este contexto, los transformadores de potencia cumplen una función clave: permiten ajustar los niveles de tensión, elevando el voltaje para facilitar la transmisión desde las centrales eléctricas y luego reduciéndolo para que pueda ser usado de forma segura en hogares e industrias. Por su importancia en el sistema eléctrico, es fundamental vigilar constantemente su estado. Para esto, el análisis de gases disueltos (AGD) se convierte en una herramienta esencial, ya que permite detectar a tiempo posibles fallas internas y actuar antes de que se conviertan en problemas mayores.

El análisis de gases disueltos (AGD) es una de las técnicas más relevantes para anticiparse a fallas en transformadores, ya que permite detectar fenómenos internos como descargas eléctricas o sobrecalentamientos antes de que evolucionen en daños mayores. A diferencia de otros métodos, como la termografía o el análisis de vibraciones, que se centran en aspectos térmicos o mecánicos visibles, el AGD ofrece una visión profunda del estado interno del transformador. Al analizar los gases generados por la descomposición del aceite aislante, proporciona un diagnóstico preciso y anticipado, convirtiéndose en una herramienta confiable para mantener la operación segura y eficiente de estos equipos.

En este contexto, la inteligencia artificial (IA) se ha posicionado como una herramienta con gran potencial en el análisis de datos complejos, facilitando la detección de patrones y tendencias que podrían pasar desapercibidos mediante métodos tradicionales. Su aplicación en el diagnóstico de transformadores de potencia mediante AGD abre nuevas posibilidades para optimizar la evaluación de su estado operativo. No obstante, su implementación efectiva exige un enfoque riguroso que contemple la calidad y consistencia de los datos, la selección adecuada de modelos y su integración coherente en los procesos de monitoreo y mantenimiento.

El usuario final exige hoy una red eléctrica confiable, segura y disponible de forma continua. Para responder a esta necesidad, es indispensable evolucionar hacia métodos de diagnóstico más

precisos, ágiles y sostenibles. En este marco, la automatización del análisis de gases disueltos mediante inteligencia artificial representa un avance clave: no solo mejora la detección temprana de fallas, sino que transforma la manera en que se gestionan los activos críticos del sistema eléctrico. Este proyecto nace precisamente con ese propósito: desarrollar una solución inteligente que permita reforzar la confiabilidad operativa y optimizar la toma de decisiones en el mantenimiento de transformadores de potencia.

1.2 ANTECEDENTES

El monitoreo y diagnóstico del estado de los transformadores de potencia ha sido esencial desde el establecimiento inicial de los sistemas eléctricos modernos, debido a su papel crucial en la transmisión y distribución eficiente y segura de energía eléctrica. Históricamente, la evaluación del estado operativo y la identificación temprana de fallas internas ha sido una tarea compleja, promoviendo el desarrollo de múltiples metodologías técnicas especializadas.

El Análisis de Gases Disueltos (AGD) emerge desde mediados del siglo XX como una herramienta particularmente efectiva para detectar anomalías internas mediante el análisis de gases generados por la descomposición térmica y eléctrica del aceite dieléctrico. La primera contribución significativa en este campo fue la propuesta por Dornenburg en 1964, quien presentó relaciones fundamentales entre diferentes gases como hidrógeno (H_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4), acetileno (C_2H_2), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2), permitiendo distinguir entre tipos generales de fallas eléctricas y térmicas.

En los años posteriores, Rogers (1973) mejoró significativamente este enfoque, desarrollando un método basado en relaciones específicas de gases que proporcionó una clasificación más detallada y precisa. Posteriormente, Dornenburg y Strittmatter (1978) validaron estos métodos, introduciendo reglas más refinadas que consolidaron su uso práctico. Complementariamente, en 1974 Michel Duval presentó el innovador Triángulo de Duval, herramienta gráfica intuitiva que simplificó notablemente la interpretación mediante la proporción relativa de tres gases clave (CH_4 , C_2H_4 y C_2H_2). En 1999, Duval amplió esta técnica con la introducción del Pentágono de Duval, integrando cinco gases para una clasificación aún más robusta y precisa.

La importancia y efectividad del AGD llevaron a una estandarización global mediante la publicación de normativas internacionales. Destacan especialmente la IEEE C57.104, publicada originalmente en 1991 y revisada posteriormente en 2008 y 2019, y la IEC 60599, ampliamente utilizada como referencia global. Estas normas introdujeron criterios claros para

interpretar las concentraciones absolutas y relativas de los gases, clasificando la severidad de las fallas y definiendo métodos más objetivos para la evaluación del estado de los transformadores.

Con estos desarrollos normativos, desde finales del siglo XX, el avance tecnológico en inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático abrió nuevas perspectivas en el diagnóstico predictivo. Diversos sectores industriales comenzaron a aprovechar estas herramientas para automatizar procesos complejos y mejorar considerablemente la precisión diagnóstica mediante algoritmos capaces de aprender e identificar patrones ocultos en grandes volúmenes de datos.

Actualmente, la integración de metodologías tradicionales del AGD con técnicas avanzadas de IA, como redes neuronales profundas, algoritmos de aprendizaje supervisado y no supervisado y modelos híbridos, representa una de las líneas más innovadoras y efectivas para el diagnóstico automático de transformadores de potencia. Esta combinación permite detectar fallas incipientes con mayor rapidez y precisión, reducir drásticamente la subjetividad y variabilidad asociada al diagnóstico manual tradicional, y establecer sistemas robustos para el mantenimiento predictivo. En este contexto, la presente investigación busca profundizar en el desarrollo e implementación práctica de estas herramientas avanzadas, contribuyendo significativamente al mejoramiento continuo de la gestión operativa de infraestructuras eléctricas críticas.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El diagnóstico efectivo del estado operativo de los transformadores de potencia mediante el Análisis de Gases Disueltos (AGD) depende significativamente de la interpretación precisa y objetiva de múltiples métodos analíticos existentes, como los establecidos por las normas IEC, IEEE, Rogers, entre otros. Actualmente, aunque la empresa cuenta con una herramienta en Excel que permite la carga y cálculo automatizado de estos métodos, la interpretación final sigue dependiendo del criterio subjetivo del operador, lo cual limita la precisión y confiabilidad del diagnóstico final.

La principal problemática radica en que, a pesar de disponer de cálculos automatizados para cada método analítico, la evaluación y decisión final del diagnóstico no cuenta con un sistema

que integre de manera objetiva y sistemática la totalidad de resultados provenientes de estos métodos.

Esta falta de integración avanzada provoca que se pierda la capacidad para identificar patrones y tendencias a largo plazo mediante un análisis profundo de los datos históricos, incrementando el riesgo de diagnósticos inconsistentes o tardíos, lo cual afecta directamente a la eficiencia operativa y económica del sistema eléctrico.

Ante esta situación, se vuelve indispensable el desarrollo e implementación de una solución avanzada basada en inteligencia artificial (IA), que tome como entrada los resultados automatizados obtenidos desde la herramienta existente, y los analice integrando datos históricos y múltiples criterios establecidos por las metodologías internacionales de referencia.

Esta solución deberá generar diagnósticos finales objetivos, precisos y confiables, reduciendo sustancialmente la dependencia de la interpretación humana. De esta manera, se espera mejorar significativamente la toma de decisiones, anticipar oportunamente las posibles fallas internas, optimizar la gestión del mantenimiento predictivo y disminuir los riesgos operativos y económicos en los transformadores de potencia.

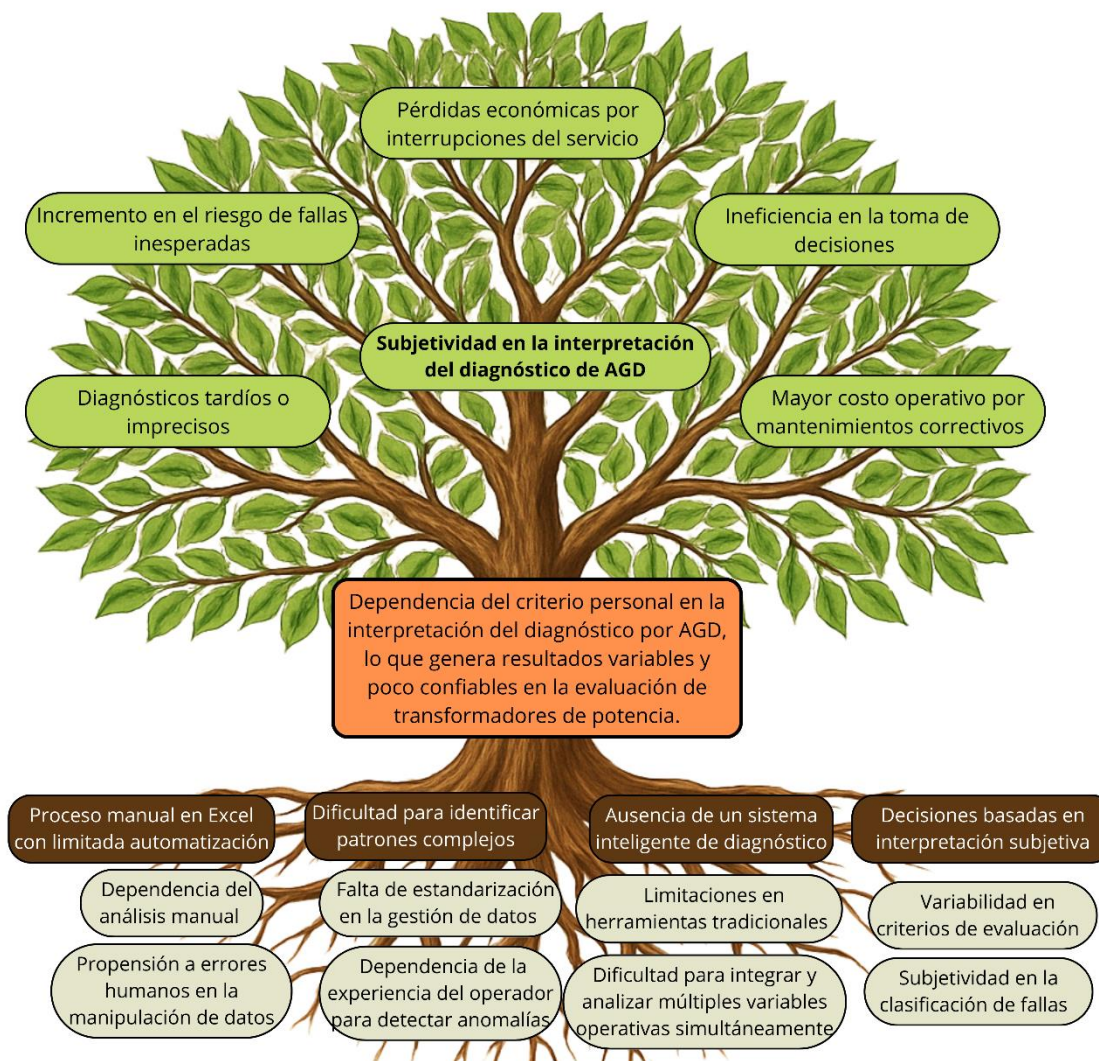


Figura 1-1 Árbol de Problemas

Fuente: Elaboración propia

Problema central: Dependencia del criterio personal en la interpretación del diagnóstico por AGD de transformadores de potencia, lo que genera resultados variables y poco confiables en la evaluación de transformadores de potencia.

A pesar de contar con cálculos y fórmulas bien definidas para el análisis de gases disueltos, la interpretación final de los resultados sigue dependiendo en gran medida del criterio personal del personal técnico. Esto da lugar a diagnósticos inconsistentes, ya que cada técnico puede asignar distintos niveles de severidad a una misma condición, según su experiencia o percepción. Incluso con herramientas automatizadas para calcular concentraciones y relaciones de gases, la ausencia de una lógica interpretativa estandarizada y comprensible genera incertidumbre en la toma de decisiones. Esta subjetividad compromete la confiabilidad

operativa del sistema eléctrico y dificulta una gestión técnica basada en datos realmente objetivos.

Las causas del problema principal analizado son:

- **Proceso manual en Excel con limitada automatización**

El registro y análisis de datos del AGD aún se realizan principalmente mediante hojas de cálculo en Excel, con poca o nula automatización. Aunque este método permite ejecutar cálculos básicos, la falta de herramientas especializadas dificulta el tratamiento eficiente de grandes volúmenes de información. Esto no solo aumenta el riesgo de errores humanos, sino que también limita la trazabilidad y consistencia del diagnóstico.

- **Dificultad para identificar patrones complejos**

La carencia de un sistema estructurado que gestione la información histórica del AGD impide detectar relaciones no evidentes entre variables o comportamientos anómalos que podrían anticipar fallas. Esta limitación técnica obliga a que el análisis dependa de la experiencia del técnico evaluador para reconocer patrones críticos, lo que introduce variabilidad y reduce la confiabilidad del diagnóstico.

- **Ausencia de un sistema inteligente de diagnóstico**

No se dispone actualmente de una herramienta capaz de interpretar los resultados del AGD de manera automatizada, lógica y transparente. La falta de un sistema que integre múltiples variables operativas con criterios técnicos dificulta la generación de conclusiones confiables, y perpetúa la necesidad de interpretación subjetiva por parte del personal técnico.

- **Decisiones basadas en interpretación subjetiva**

En ausencia de una lógica diagnóstica estandarizada, la interpretación de los resultados del AGD queda sujeta al criterio individual de cada analista. Esto genera inconsistencias en la evaluación de fallas, variabilidad entre diagnósticos similares y una limitada capacidad de justificar técnicamente las decisiones tomadas. Como consecuencia, se ve afectada la objetividad y precisión en la gestión operativa y el mantenimiento preventivo de los transformadores.

Los efectos son:

- **Pérdidas económicas por interrupciones del servicio**

La falta de un diagnóstico confiable y estandarizado puede llevar a la omisión de fallas críticas en los transformadores. Esto incrementa la probabilidad de interrupciones imprevistas en el suministro eléctrico, generando consecuencias económicas considerables tanto para la empresa operadora como para los usuarios industriales y residenciales afectados.

- **Incremento en el riesgo de fallas inesperadas**

La subjetividad en la interpretación del diagnóstico por AGD limita la capacidad para identificar a tiempo condiciones anormales dentro del transformador. Esta incertidumbre diagnóstica debilita el enfoque preventivo del mantenimiento y expone al sistema a fallas sorpresivas de alto impacto.

- **Diagnósticos tardíos o imprecisos**

Cuando el análisis depende del juicio individual de cada técnico, los diagnósticos pueden variar significativamente entre evaluadores o presentarse con retrasos. Esto provoca intervenciones fuera de tiempo o con criterios erróneos, lo que reduce la efectividad de las acciones de mantenimiento y aumenta el riesgo operativo.

- **Ineficiencia en la toma de decisiones**

La ausencia de una lógica interpretativa automatizada y estandarizada conduce a decisiones técnicas inconsistentes o excesivamente conservadoras. Esta falta de objetividad dificulta la optimización de recursos, genera desacuerdos entre áreas técnicas y puede impactar negativamente en la gestión de activos críticos.

- **Mayor costo operativo por mantenimientos correctivos**

La imposibilidad de detectar condiciones de falla de forma temprana obliga a ejecutar mantenimientos correctivos, generalmente más costosos, urgentes y disruptivos. Esto incrementa los costos operativos y dificulta la planificación presupuestaria y logística del mantenimiento.

1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO

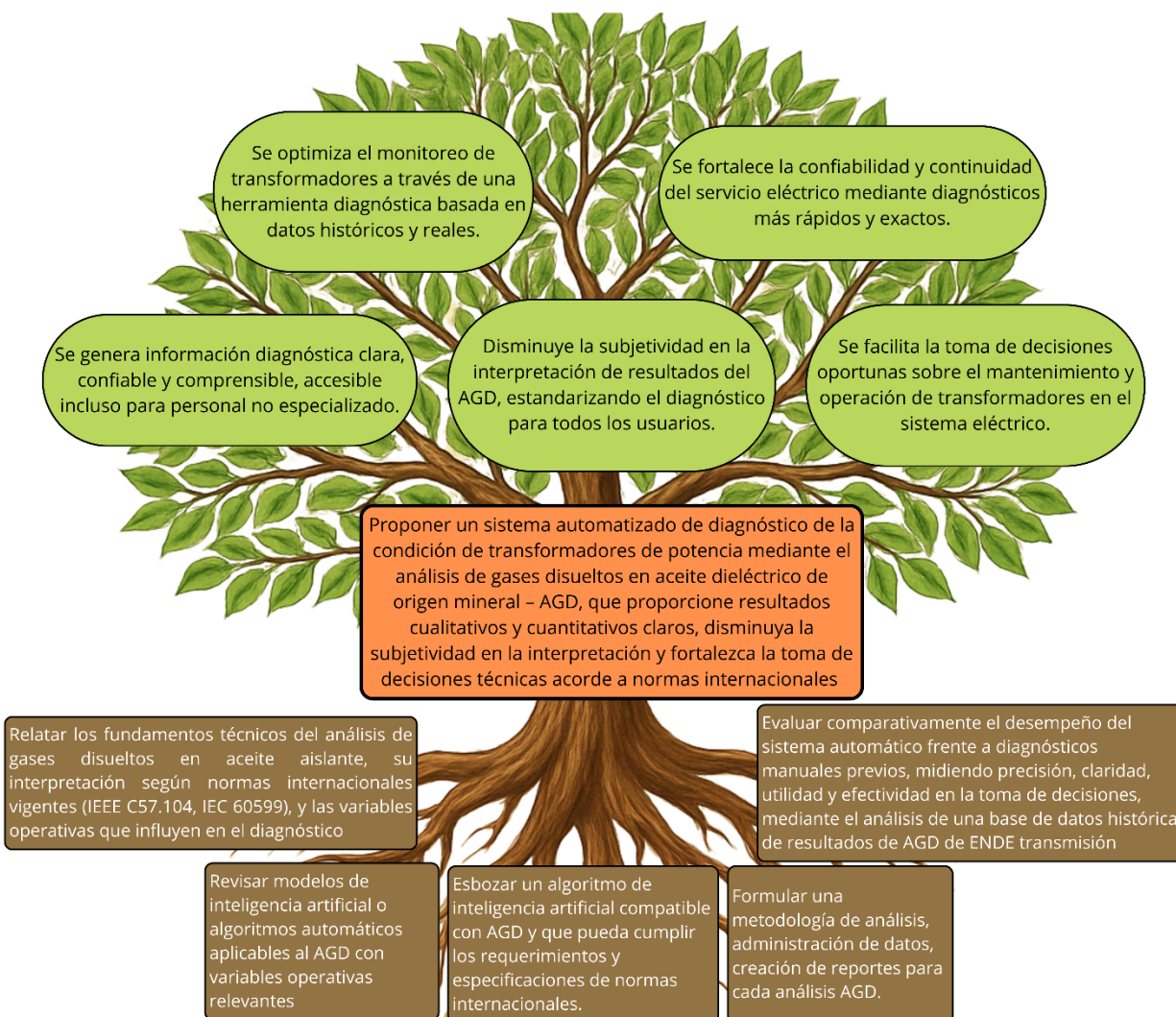


Figura 1-2 Árbol de Objetivos

Elaboración propia

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema automatizado de diagnóstico de la condición de transformadores de potencia para ENDE Transmisión, mediante el análisis de gases disueltos (AGD) y técnicas de inteligencia artificial, que reduzca la subjetividad en la interpretación y optimice la toma de decisiones técnicas acorde a las normas internacionales IEC 60599 e IEEE C57.104.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los fundamentos técnicos y normativos del Análisis de Gases Disueltos (AGD) según estándares IEEE C57.104 e IEC 60599, para determinar las variables operativas críticas y los patrones de falla que alimentarán el sistema de diagnóstico.
- Seleccionar los modelos de I.A. y algoritmos de aprendizaje automático más adecuados para el diagnóstico de transformadores, mediante la evaluación comparativa de su desempeño en problemas de clasificación de fallas.
- Desarrollar y entrenar el algoritmo de diagnóstico utilizando bases de datos históricas de la empresa, asegurando su compatibilidad con los criterios de interpretación de las normas internacionales vigentes
- Integrar la lógica de diagnóstico y el modelo en un prototipo de software que genere un reporte unificado.
- Validar el desempeño del prototipo mediante pruebas con datos reales de ENDE Transmisión, cuantificando métricas de precisión, sensibilidad y efectividad frente a los diagnósticos manuales históricos.

1.5 JUSTIFICACIÓN

1.5.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

El diagnóstico de la condición de transformadores de potencia mediante el análisis de gases disueltos (AGD) ya se basa en fundamentos científicos ampliamente aceptados, como las normas IEEE C57.104-2019 e IEC 60599-2022. Sin embargo, la interpretación de estos resultados continúa siendo subjetiva, dependiendo del criterio de cada evaluador. El presente estudio es técnicamente factible, ya que se apoya en datos reales obtenidos por cromatografía, que ya son procesados por herramientas como Excel. La investigación propone una solución avanzada de análisis y diagnóstico con base en técnicas de inteligencia artificial, sobre un campo consolidado, pero con espacio claro para mejorar la precisión diagnóstica y la estandarización de resultados.

1.5.2 JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

Este estudio responde a una problemática vigente en el ámbito del mantenimiento eléctrico y aporta a la línea de investigación de sistemas eléctricos, inteligencia artificial y mantenimiento predictivo. El proyecto desarrollado demuestra los conocimientos teóricos necesarios y suficientes para obtener el grado de licenciatura en ingeniería eléctrica.

1.5.3 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

La implementación del sistema automatizado de diagnóstico por AGD permite reducir costos asociados a mantenimientos innecesarios, falsos positivos y fallas no detectadas. Al mejorar la precisión en la evaluación de la condición del transformador, se optimizan los recursos destinados a inspecciones, pruebas y monitoreos. Además, al utilizar herramientas disponibles como Excel, Python y herramientas de IA, no se requiere inversión en plataformas comerciales, lo que convierte al sistema en una solución eficaz y de bajo costo operativo.

1.5.4 JUSTIFICACIÓN SOCIAL

Esta propuesta tiene un impacto social directo al contribuir a la mejora de la confiabilidad del sistema eléctrico, un servicio esencial para la calidad de vida de la población. Al reducir la probabilidad de fallas no detectadas y mejorar la oportunidad del mantenimiento, se minimizan los riesgos de interrupciones del servicio, garantizando un suministro más estable y continuo para las comunidades. Además, al generar diagnósticos más claros y comprensibles, se fortalece la gestión de activos eléctricos, contribuyendo a una operación más eficiente y segura del sistema.

1.5.5 JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL

Una mayor precisión en los diagnósticos permite aplicar mantenimientos correctos en el momento adecuado, evitando intervenciones innecesarias que impliquen manipulación o cambio de aceite dieléctrico, generando residuos peligrosos. También permite extender la vida útil de los transformadores, lo que disminuye la necesidad de fabricación y reemplazo de equipos, contribuyendo a un uso más sostenible de los recursos. En consecuencia, el proyecto promueve prácticas técnicas alineadas con la reducción del impacto ambiental en sistemas eléctricos.

1.6 ALCANCE Y LIMITACIONES

El presente proyecto tiene como finalidad el desarrollo de un sistema automatizado para el diagnóstico de la condición operativa de transformadores y reactores de potencia mediante el análisis de gases disueltos (AGD), con el objetivo de reducir la subjetividad en la interpretación de resultados y fortalecer la confiabilidad en la toma de decisiones técnicas. Este sistema combinará normativas internacionales vigentes con el uso de inteligencia artificial, permitiendo generar diagnósticos cualitativos y cuantitativos interpretables por personal técnico y operativo, incluso con formación no especializada, reduciendo la subjetividad en la interpretación y fortaleciendo la toma de decisiones técnicas.

1.6.1 ALCANCE ESPACIAL

1.6.1.1 ALCANCE GEOGRÁFICO

El proyecto se enfoca en el contexto nacional, tomando como referencia datos operativos y de diagnóstico de transformadores utilizados por ENDE Transmisión, en el marco del sistema eléctrico boliviano. Las herramientas desarrolladas podrán ser aplicables en otros contextos similares a nivel nacional, en empresas de transmisión que empleen AGD como método de diagnóstico.

1.6.1.2 ALCANCE SOCIAL

Está orientado principalmente al sector técnico-operativo del área de mantenimiento de transformadores. Indirectamente, impactará a usuarios industriales y residenciales al contribuir a la mejora de la continuidad y confiabilidad del servicio eléctrico.

1.6.1.3 ALCANCE ECONÓMICO

A largo plazo, la aplicación de este sistema permitiría optimizar los recursos destinados al mantenimiento, reducir fallas imprevistas, evitar interrupciones del servicio, y disminuir los costos operativos asociados a mantenimientos correctivos innecesarios.

1.6.2 ALCANCE TEMPORAL

El presente proyecto tiene una duración estimada de 6 meses, correspondientes al periodo comprendido entre marzo y del año 2025. Durante este tiempo se desarrollarán todas las actividades necesarias para alcanzar los objetivos planteados, desde la revisión normativa, análisis de datos históricos y diseño del sistema automatizado, hasta la validación comparativa del diagnóstico automático frente al tradicional.

Los tiempos específicos asignados a cada etapa del proyecto, así como su secuencia y duración, se encuentran detallados en la tabla 1-2 del cronograma de actividades.

1.6.3 ALCANCE TEORICO

El presente proyecto se fundamenta en el marco teórico del diagnóstico de transformadores de potencia mediante el análisis de gases disueltos (AGD) en aceite mineral aislante. Para ello, se adoptan como referencia principal las normativas técnicas **IEEE Std C57.104-2019** e **IEC 60599:2022**, que establecen los criterios y metodologías aceptadas internacionalmente para la interpretación de resultados cromatográficos en equipos inmersos en aceite.

El modelo propuesto se apoya en fundamentos de:

- Ingeniería eléctrica, particularmente en el análisis y evaluación de fallas internas en transformadores, autotransformadores y reactores de potencia mediante AGD.
- Inteligencia artificial aplicada, específicamente en el uso de algoritmos de aprendizaje supervisado para la clasificación automática de condiciones operativas (normalidades, defectos térmicos y eléctricos), a partir de datos cuantitativos históricos.
- Procesamiento de datos técnicos, empleando técnicas de análisis exploratorio y preprocesamiento de datos cromatográficos para su posterior integración en modelos predictivos.

1.6.4 LIMITACIONES

Las limitaciones de este proyecto son:

- No incluye análisis para aceites dieléctricos distintos al aceite mineral.
- No contempla otros equipos eléctricos fuera de transformadores, autotransformadores y reactores de potencia
- No considera datos provenientes de monitores DGA en línea.

1.7 METODOLOGÍA

La presente investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo de tipo tecnológico y propositivo, dado que se orienta al diseño y desarrollo de una solución de software (algoritmo de IA) para resolver un problema práctico de ingeniería.

El diseño de validación es cuasi-experimental, ya que se someterá al algoritmo desarrollado a pruebas controladas utilizando datos históricos de ENDE Transmisión. Se medirán variables de desempeño técnico, comparando los resultados del sistema propuesto frente a los diagnósticos tradicionales, siguiendo los lineamientos de las normas IEC 60599:2022 e IEEE C57.104-2019.

Tabla 1-1 Matriz Metodológica

Objetivos Específicos	Unidad Operativa	Fuente de Información	Técnica Utilizada	Resultados Esperados
Relatar los fundamentos técnicos del AGD y su interpretación según normas IEEE C57.104 e IEC 60599, junto con variables operativas que influyen en el diagnóstico	Área Técnica	Normas técnicas, bibliografía especializada, artículos técnicos	Investigación documental, análisis y síntesis técnica	Fundamentación técnica y normativa clara para orientar el desarrollo del sistema propuesto
Revisar modelos de IA o algoritmos automáticos aplicables al AGD con variables como carga, tiempo y temperatura	Área Técnica	Artículos científicos, estudios previos, proyectos similares en diagnóstico eléctrico	Revisión teórica y análisis comparativo de metodologías	Selección crítica de modelos factibles de implementar en el contexto del proyecto
Esbozar un algoritmo de diagnóstico compatible con normas internacionales	Área Técnica	Documentación técnica, estructuras lógicas de diagnóstico, lineamientos normativos	Diseño lógico preliminar y esquematización funcional	Propuesta inicial del algoritmo para interpretación automática de resultados AGD
Formular una metodología de análisis, administración de datos y creación de reportes para el AGD	Área Técnica / Gestión de datos	Registros de operación de transformadores, informes técnicos de mantenimiento	Organización de datos, diseño de formatos de reporte técnico	Estructura metodológica clara para analizar, gestionar e interpretar resultados cromatográficos
Evaluar el desempeño del sistema frente a diagnósticos manuales, usando una base de datos histórica de ENDE Transmisión	Área Técnica / Comparación	Registros AGD históricos y reportes técnicos manuales de ENDE	Evaluación comparativa, análisis de precisión y utilidad	Validación práctica del sistema propuesto frente a métodos convencionales

1.8 CONTENIDO TENTATIVO

Marco referencial

CAPÍTULO 1. PERFIL DEL PROYECTO

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DEL MANTENIMIENTO ELECTRICO

2.1. Evolución de las Estrategias de Mantenimiento y la Centralidad del Diagnóstico

2.1.1. Del Mantenimiento Correctivo y Preventivo a la Necesidad de Enfoques Basados en la Condición del Activo.

2.1.2. Mantenimiento Basado en Condición (CBM) y Mantenimiento Predictivo (PdM):

2.1.2.1. Principios, Beneficios y el Rol Indispensable del Diagnóstico de Condición.

2.1.3. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM):

2.1.3.1. Filosofía y Principios para la Optimización de Estrategias.

2.1.3.2. El Análisis de Modos de Falla y sus Efectos (FMEA/FMECA) como Herramienta Esencial en RCM.

2.1.3.3. Desarrollo de Planes de Mantenimiento Efectivos Basados en la Comprensión de Fallas y su Criticidad.

2.2. Gestión Estratégica del Mantenimiento de Transformadores de Potencia en Empresas de Transmisión

2.2.1. El Transformador como Activo Crítico en el Sistema de Transmisión (Ej. Ende Transmisión): Implicaciones de Falla y Justificación de un Mantenimiento Avanzado.

2.2.2. Lineamientos para la Supervisión y Mantenimiento Efectivo de Transformadores: La Guía de las Normas Técnicas Internacionales.

2.2.3. Breve Consideración sobre el Mantenimiento Integral en Subestaciones de Transmisión y la Interconexión de Estrategias.

CAPÍTULO 3: EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA: COMPONENTES, FUNCIONAMIENTO Y EVALUACIÓN

3.1. Principios de Funcionamiento y Tipologías del Transformador de Potencia

3.1.1. Fundamentos Electromagnéticos y Relación de Transformación.

- 3.1.2. Clasificación General de Transformadores (Por aplicación, nivel de tensión – breve).
- 3.2. Componentes Constructivos Principales del Transformador de Potencia (sumergido en aceite mineral)
 - 3.2.1. Núcleo Magnético: Función y Materiales.
 - 3.2.2. Devanados: Tipos, Materiales y Disposición General.
 - 3.2.3. Sistema de Aislamiento Principal: Papel Aislante y Aceite Mineral Dieléctrico (sus funciones generales).
 - 3.2.4. Tanque Principal y Sistema de Expansión/Conservación del Aceite.
 - 3.2.5. Bushings (Aisladores Pasatapas): Función y Tipos Generales.
 - 3.2.6. Cambiador de Tomas Bajo Carga (OLTC): Principio de Operación y Componentes Básicos.
 - 3.2.7. Sistema de Refrigeración: Tipos y Finalidad.
 - 3.2.8. Accesorios de Protección y Medición Comunes.
- 3.3. Parámetros Eléctricos y Operativos Fundamentales del Transformador
 - 3.3.1. Interpretación de la Placa de Características: Información Clave para la Identificación y Operación Segura.
 - 3.3.2. Parámetros Eléctricos Determinantes del Diseño y Comportamiento Operativo.
 - 3.3.3. Influencia de las Condiciones de Operación en la Solicitación del Transformador.
- 3.4. Verificación y Evaluación Estándar de la Condición del Transformador mediante Pruebas Eléctricas
 - 3.4.1. Propósito General de las Pruebas Eléctricas en Fábrica y en Campo.
 - 3.4.2. Pruebas Eléctricas Fundamentales con Transformador Desenergizado y su Contribución a la Evaluación del Estado.
- 3.5. Reactores de Potencia (en Aceite Mineral): Generalidades y Pruebas Aplicables
 - 3.5.1. Principio de Funcionamiento y Diferencias Clave con Transformadores.
 - 3.5.2. Componentes Principales y Pruebas Estándar.

CAPÍTULO 4: ENVEJECIMIENTO DEL SISTEMA AISLANTE Y TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO DEL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS (AGD)

4.1. Envejecimiento y Mecanismos de Deterioro del Sistema de Aislamiento Aceite-Papel en Transformadores

4.1.1. Factores de Envejecimiento: Esfuerzos Térmicos, Eléctricos, Químicos.

4.1.2. Procesos de Degradación del Papel Aislante y sus Subproductos.

4.1.3. Procesos de Degradación del Aceite Mineral Aislante y la Generación de Gases Disueltos Clave.

4.2. Técnicas de Diagnóstico para la Evaluación de la Condición de Transformadores

4.2.1. Clasificación de las Técnicas de Diagnóstico: Pruebas con Transformador Desenergizado y Pruebas/Monitoreo con Transformador Energizado.

4.2.2. Principales Pruebas de Diagnóstico con Transformador Desenergizado:

4.2.2.2. Evaluación Diagnóstica mediante Pruebas Eléctricas (Revisión de pruebas de Cap. 3 como Factor de Potencia, Resistencia de Aislamiento, SFRA – cómo sus resultados indican problemas específicos de envejecimiento o fallas).

4.2.3. Técnicas de Monitoreo y Diagnóstico con Transformador Energizado:

4.2.2.1. Análisis Físico-Químicos del Aceite Aislante, Analisis de contenidos furanicos y Analisis de gases disueltos

4.2.3.1. Sistemas de Monitoreo Continuo de Gases Disueltos (Monitores DGA en línea).

4.2.3.2. Otras Técnicas Relevantes de Monitoreo con Transformador Energizado (Ej. Descargas Parciales en línea, monitoreo de bushings, termografía, temperatura – mención breve de su aporte).

4.2.4. El Análisis de Gases Disueltos (AGD) de Laboratorio: Técnica Central para el Diagnóstico Detallado de Fallas Internas (realizado con muestras tomadas de equipo usualmente energizado, pero analizado fuera de línea).

4.3. Análisis de Gases Disueltos (AGD): Fundamentos, Proceso y Criterios de Interpretación

4.3.1. Obtención de Datos para AGD: Muestreo del Aceite, Extracción de Gases y Principios del Análisis Cromatográfico.

4.3.2. Significado Diagnóstico de los Gases Individuales Clave y la Importancia de sus Tasas de Generación.

4.3.3. Aplicación de Métodos Normalizados para la Identificación de Fallas por AGD:

4.3.3.1. Criterios según IEEE C57.104 (Límites, Tasas Típicas).

4.3.3.2. Guía de Interpretación IEC 60599.

4.3.3.3. Métodos Basados en Relaciones de Gases (Rogers, Dornenburg).

4.3.3.4. Herramientas Gráficas de Diagnóstico (Triángulo y Pentágonos de Duval).

4.3.4. Desafíos y Limitaciones Prácticas en la Interpretación Convencional del AGD.

4.4. Hacia una Interpretación Avanzada y Objetiva del AGD para la Gestión de Activos en Ende Transmisión

4.4.1. La Problemática de la Subjetividad en el Diagnóstico AGD: Impacto en la Confiabilidad y Toma de Decisiones en Empresas de Transmisión.

4.4.2. Perspectivas de Optimización mediante Enfoques de Inteligencia Computacional: Una Visión General para el Análisis de Datos de AGD.

4.4.3. Definiendo la Solución: Requerimientos para un Sistema de Diagnóstico AGD Mejorado y Confiable en el Contexto Operativo.

5. Marco Practico

6.Conclusiones y Recomendaciones

1.9 CRONOGRAMA

Tarea	% completado	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5				MES 6			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Relatar los fundamentos técnicos del AGD y su interpretación según normas IEEE C57.104 e IEC 60599	15%	X	X	X																					
Revisar modelos de IA o algoritmos automáticos aplicables al AGD	30%				X	X	X	X																	
Esbozar un algoritmo de diagnóstico compatible con normas internacionales	60%								X	X	X	X	X	X	X										
Formular una metodología de análisis, administración de datos y creación de reportes para el AGD	80%															X	X	X	X	X					
Evaluar el desempeño del sistema frente a diagnósticos manuales, usando una base de datos histórica de ENDE Transmisión	100%																				X	X	X	X	X

1.10 BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

CHEIM, L. (2022). Machine Learning Algorithm Trained by the Duval Pentagons A Simplified Duval Pentagons Approach. *CIGRE*, 11.

CHEIM, L., DUVAL, M., & HAIDER, S. (2020). Combined Duval Pentagons: A Simplified Approach. *energies. CIGRE*, 13.

DUVAL, M., & LAMARRE, L. (2014). The Duval Pentagon—A New Complementary Tool for the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers. *IEEE*, 12.

- GRISARU, M. (2024). Imperative Technicalities for Managing Reliable Dissolved Gas Analysis and Adequate Diagnosis of Contemporary Oil-filled Power Transformers. *CIGRE*, 21.
- HATTORI, S., MIKUNI, K., MURATA, H., HOMMA, T., MIYAZAKI, S., & MIZUTANI, Y. (2024). Incipient fault detection method for oil-immersed transformer using time series data of dissolved gas analysis. *CIGRE*, 13.
- HERATH, T., WANG, Z., LIU, Q., WILSON, G., HOOTON, R., WALKER, D., . . . van der ZEL, L. (2024). Data Analytics for Transformer Dissolved Gas Analysis to Aid Asset Management. *CIGRE*, 9.
- IEC 60422. (2013, Febrero 22). *Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance*. Ginebra: IEC. Retrieved from Comisión Electrotécnica Internacional: <https://www.iec.ch/homepage>
- IEC 60599:2022. (2022). *Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis*. Comité Internacional de Electrotecnia. Ginebra: IEC. Retrieved from www.iec.ch
- JUNG, J., SEO, H., KIM, S., & KIM, S. (2016). Advanced Dissolved Gas Analysis (DGA) Diagnostic Methods with Estimation of Fault Location for Power Transformer Based on Field Database. *CIGRE*, 14.
- Mobley, R. K. (2008). *Maintenance Engineering Handbook*. United States of America: McGraw-Hill eBooks.

