

Propuesta Metodológica de Relación entre el Índice de Salud de Activos y Tácticas de Mantenimiento Aplicado a Transformadores en Media Tensión (MT) del Sector Oil & Gas

Edwin Fabián Blanco Combita

Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali

2026

Nota del autor

Blanco C. Edwin; Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali.

El trabajo de profundización cuenta con la dirección del MSc Adolfo León Gómez y PhD Luis Alberto Mora.

Trabajo de Profundización para optar por el título de Magister en Gestión de Activos y Mantenimiento.

Agradezco a DIOS por hacerme un instrumento de su milagro y lograr este objetivo.

Agradecimientos a los directores de proyecto por su guía, paciencia y conocimiento, así como también a la Universidad del Valle, Cali.

Cualquier mensaje con respecto a este trabajo debe ser enviado a la escuela de ingeniería mecánica de la facultad de ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

E-mail: edwin.blanco@correounivalle.edu.co

Resumen

La gestión en el sector eléctrico exige un mayor conocimiento del estado real de los equipos para operar en un entorno seguro y confiable. Además, es relevante desarrollar y analizar la información para caracterizar activos críticos como los transformadores en media tensión (MT¹).

Las variables operativas y pruebas de diagnóstico son fundamentales para conocer el estado de los equipos eléctricos, son necesarias para entender la condición de los transformadores (MT) y tomar decisiones de mantenimiento de acuerdo con el contexto operacional y su estado de salud (Zorrilla Henao et al., 2020).

El presente trabajo conjuga el índice de salud activos (*Index Health*, HI), y tácticas de mantenimiento aplicado a transformadores (MT) en el sector Oil & Gas² que se ubican específicamente en las áreas de influencia del Huila y actualmente los administra la compañía Consorcio Servicios Asociados SAS - Confipetrol, con base en información resultante del diagnóstico fisicoquímico, análisis de gases disueltos (DGA) y pruebas eléctricas bajo recomendaciones normativas IEEE³ (Servicios Asociados, 2018).

El definir el índice de salud de los transformadores es útil para determinar de manera global su estado a la luz de la gestión de activos y mantenimiento, para construir tácticas claras de toma de decisiones con mayor rigor, claridad y coherencia, alineadas con los objetivos estratégicos de la organización (Zahra et al., 2025).

La metodología desarrolla su espíritu bajo un marco de normativas internacionales como la ISO 14224:2016 respecto a la captura y análisis de datos de los diagnósticos, UNE EN 17485:2023, vínculo entre actividades de gestión de activos físicos y de mantenimiento en este caso a transformadores (MT) e ISO 31000:2018, que conjuga el índice de salud (IH) como insumo para valorar riesgos.

¹ MT – Media Tensión (entre 1000 V y 57,5 kV) (RETIE Ministerio de Minas y Energía, 2024).

² Oil & Gas - Sector Petróleo y Gas.

³ IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Las normas conjugadas soportan la selección de tácticas de mantenimiento diferenciadas, bajo un marco de toma de decisiones competente, consistente y óptimo, fundamental para una gestión de activos exitosa (GFAM Global Forum on Maintenance & Asset Management, 2024).

Palabras clave: índice de salud, transformadores de potencia, factores de condición, estrategias, fisicoquímico, gases disueltos, aceite aislante, pruebas eléctricas, basado en condición.

Abstract

Management in the electrical sector demands a deeper understanding of the actual condition of equipment to operate in a safe and reliable environment. Furthermore, it is crucial to develop and analyze information to characterize critical assets such as medium-voltage (MV) transformers.

Operational variables and diagnostic tests are fundamental to understanding the condition of electrical equipment. They are necessary to assess the condition of MV transformers and make maintenance decisions based on the operational context and their health status (Zorrilla Henao et al., 2020).

This study combines the Asset Health Index (HI) with maintenance tactics applied to MV transformers in the Oil & Gas sector, specifically those located in the Huila region and currently managed by Consorcio Servicios Asociados SAS-Confipetrol. The analysis is based on information obtained from physicochemical diagnostics, dissolved gas analysis (DGA), and electrical tests conducted according to IEEE standards (Servicios Asociados, 2018).

Defining the health index of transformers is useful for comprehensively determining their condition in light of asset management and maintenance, enabling the development of clearer, more rigorous, and coherent decision-making strategies aligned with the organization's strategic objectives (Zahra et al., 2025).

The methodology is based on a framework of international standards such as ISO 14224:2016 regarding the capture and analysis of diagnostic data, UNE EN 17485:2023, which links physical asset management and maintenance activities (in this case, for transformers), and ISO 31000:2018, which incorporates the health index (HI) as an input for risk assessment.

These combined standards support the selection of differentiated maintenance strategies within a competent, consistent, and optimal decision-making framework, which is fundamental for successful asset management (GFAM Global Forum on Maintenance & Asset Management, 2024).

Keywords: health index, power transformers, condition factors, strategies, physicochemical, dissolved gases, insulating oil, electrical testing, condition based.

Contenido

Resumen	2
Abstract	4
Contenido	6
Ilustraciones.....	9
Ecuaciones	10
Tablas	10
Introducción y Contexto Operacional	11
Planteamiento de la Oportunidad.....	13
Límites de la oportunidad	14
Justificación	17
Viabilidad de la idea del trabajo de profundización	19
Objetivos.....	20
General	20
Específicos	20
UNO – Fundamentación Técnica.	20
DOS – Variables de Construcción.	20
TRES – Datos y Captura, Factores de Entrada.	21
CUATRO – Modelo (IH), Puntajes, Pesos y Cálculo.....	21
CINCO – Índice de Salud y Tácticas.....	21
SEIS – Conclusiones.	21
Marco Teórico	23
Revisión y Sistematización Teórica – Marco de Asignaturas.	23
Estándar ISO 55000:2024 como Potenciador de Decisiones.....	25
Estándar ISO 17485:2023 como Potenciador de Mantenimiento en la GA.	26
Estándar ISO 14224:2016 como Potenciador de Captura y Análisis de Datos.	27
Estándar ISO 31000:2018 como Potenciador de Evaluación de Riesgos.	30
Antecedentes de la Investigación.....	30
Estado Actual - Cultura de Salud de Activos dentro de la Organización.	30
Estado de Proyección - Salud de Activos dentro de la Organización.	31
Estado del Arte.....	31
Índice de Salud – Factores Ponderados.....	31
Índice de Salud – Diagnóstico Periódico.....	33
Índice de Salud – Análisis de Entorno y Propiedades.....	34
Índice de Salud – Enfoque GRNN.	34
Marco metodológico	36
Tipo de Estudio y de Análisis a Desarrollar (Descriptivo).	36
Enfoque Lógico Deductivo.....	36
Metodología Cuantitativa - Descriptiva.....	36
Fases del Proyecto.....	38
Fase I. Conceptualización – CBM ISO 17359:2018	39
Fase II. Parametrización y Variables de Entrada.	39
Fase III. Construcción Índice de Salud.	40
Fase IV. Síntesis y Tácticas.....	40
Desarrollo	41
Objetivo Uno – Fundamentación Técnica.	41
Métodos Fundamentales de Detección.	42
Método de Análisis de Gases Disueltos (DGA)	44

Formación de Gases y Tipos de Fallas Básicas según IEEE C57-104-2019	45
Método TGCD Gas Combustible Total.....	46
Método (ADFQ) Análisis Dieléctrico y Fisicoquímico del Aceite Aislante.....	48
Termografía Infrarroja (IR).	50
Resistencia de Aislamiento (Prueba Clásica).	50
Diagnóstico de Aceite Aislante a Transformadores e Integración ISO 55000.	51
Relación Operativa - Táctica a Transformadores e Integración ISO 55001.	51
Modelo a Nivel Conceptual de Flujo de Integración de Decisiones.	52
Principio de Valor en la Gestión de Activos.....	54
Objetivo Dos – Variables de Construcción.	55
Análisis de Modos y Efectos Falla (AMEF) – Traductor de los FE.	55
Análisis de Modos y Efectos Falla (AMEF) – Límites de Análisis EN IEC 60812.	56
Modelo de Integración para Obtener los Factores de Entrada (FE).	56
Engranaje AMEF – Factores de Entrada (FE).	60
Modelo de Priorización – Factores de Entrada (FE).	61
Factores de Entrada (FE) - Base de Construcción.....	62
Objetivo Tres – Datos y Captura, Factores de Entrada.....	64
Integración Entre los Factores de Entrada (FE) y la norma ISO 14224.	65
Captura Datos – Factor Termografía Infrarroja (IR).	66
Captura Datos – Resistencia de Aislamiento.	67
Captura Datos – Análisis Dieléctrico y Físico Químico del Aceite Aislante.	68
Captura Datos – Análisis de Gases Disueltos (DGA).	70
Captura Datos – Capacidad de Carga.	70
Captura de Datos en Función de los Factores de Entrada (FE).	71
Objetivo Cuatro – Modelo (IH), Puntajes, Pesos y Cálculo.	74
Cálculo Índice de Salud – Formula General.	74
Factor de Peso (K) y Modos de Falla.	75
Factor de Índice de Salud (HIF) – Resistencia de Aislamiento.	76
Factor de Índice de Salud (HIF) – Termografía Infrarroja.	76
Factor de Índice de Salud (HIF) – Análisis de Gases Disueltos DGA.	77
Factor de Índice de Salud (HIF) – Dieléctrico ADFQ.	78
Factor de Índice de Salud (HIF) – Factor de Carga β	80
Modelo Índice de Salud (IH) – Categorías de la Condición.....	81
Flujo de Proceso – Modelo Índice de Salud (IH).....	82
Casos de Estudio – Aplicación de Modelo (IH).	82
Objetivo Cinco – Índice de Salud y Tácticas.....	86
Valoración de Riesgos y Acciones de Mantenimiento.	86
Aplicación – Número de Prioridad de Riesgo (RPN).	88
Concatenación (RPN) y (IH) – Tipos de Acciones de Mantenimiento.....	90
Tácticas, CBM y Cobertura de Diagnósticos.	92
Táctica – CBM en Transformadores (MT).	92
Táctica – Población de Muestreo ADFQ, DGA y Pruebas Eléctricas.	93
Plan de Implementación Táctica.	96
Descripción de cómo se alcanza el logro de objetivos.	99
UNO.....	99
DOS	99
TRES	100
CUATRO.....	100
CINCO	101
SEIS.....	101
Resultados más relevantes	102

Conclusiones	103
Recomendaciones.....	104
Posibilidad de Trabajos Futuros	105
Referencias	106
Glosario de Definiciones	123

Ilustraciones

Ilustración 1	Parque de Transformadores Operativos (Clasificados por Potencia).....	17
Ilustración 2	Curva de Fallas (%) por Año, Estimación para Transformadores de Pot. 18	
Ilustración 3	Asignaturas de Maestría, pilares de construcción de la investigación.....	23
Ilustración 4	Flujo de decisiones Top-Down en estrategias corporativas.	24
Ilustración 5	Fases del Ciclo de Vida de un Transformador.	25
Ilustración 6	Volumen de Control - Transformador de Potencia. ISO 14224:2016.....	27
Ilustración 7	Curva PF Condición Teórica - Degradación de un Transformador.....	29
Ilustración 8	Proceso global Ali Naderian Jahromi, Ray Piercy, Índice de Salud.....	32
Ilustración 9	Categoría de parámetros, construcción del índice de salud.....	33
Ilustración 10	Fases Metodológicas de la Investigación.....	38
Ilustración 11	Parámetros de Monitoreo a Transformadores.....	42
Ilustración 12	Concentración de Gases Disueltos Vs Temperatura.....	45
Ilustración 13	Clasificación de Fallas según IEEE Std C57.104.....	46
Ilustración 14	Pruebas ASTM relevantes aplicadas al aceite aislante.	49
Ilustración 15	Modelo Macro Conceptual de Flujo de Decisiones.	53
Ilustración 16	AMEF a Ítem Mantenible Parte Activa (Núcleo - Devanado).....	58
Ilustración 17	AMEF a Ítem Mantenible (Sistema de Enfriamiento).....	59
Ilustración 18	AMEF a Ítem Mantenible (Aceite Aislante).....	60
Ilustración 19	Modelo de Obtención – Factores de Entrada.....	62
Ilustración 20	Categorías de Recolección de Datos ISO 14224:2016.	65
Ilustración 21	Plantilla Captura de Datos – Factores de Entrada.	72
Ilustración 22	Descripción de la Categoría del Índice de Salud.....	81
Ilustración 23	Flujo de Proceso Macro del Modelo de Evaluación y Cálculo (IH).	82
Ilustración 24	Casos de Estudio Calculo Modelo (IH) – Resultados.....	84
Ilustración 25	Código Python – Calculo Índice de Salud (IH).	85
Ilustración 26	Tipos de Acciones de Mantenimiento (Propuestas).	87
Ilustración 27	Conjugación (IH) y RPN (Mapa de Calor Según Acciones).....	87
Ilustración 28	FMECA RPN – Núcleo Devanado.....	88
Ilustración 29	FMECA RPN – Sistema de Enfriamiento y Aceite Aislante.	89
Ilustración 30	Acciones de Mantenimiento Tipo I y II.	90
Ilustración 31	Acciones de Mantenimiento Tipo III.	91
Ilustración 32	Táctica CBM-IH.	93
Ilustración 33	Cobertura de los Factores de Entrada (FE)	94
Ilustración 34	Matriz de Riesgo – Transformador (MT).	95
Ilustración 35	Flujo de Decisión – TR Candidatos a Muestrear.....	96

Ecuaciones

Ecuación 1 Factor de Análisis de Gases Disueltos (DAGF).....	32
Ecuación 2 Total de Gases Combustibles Disueltos (TGCD)	47
Ecuación 3 Formula para Cálculo del Índice de Salud (IR).....	74
Ecuación 4 Fórmula para Cálculo del Factor de Calidad del Aceite (OQF).....	78
Ecuación 5 Fórmula para Cálculo del Factor de Carga de Transformador.	80

Tablas

Tabla 1 Modos de Fallo de un Transformador según ISO 14224:2016.....	28
Tabla 2 Síntomas Asociados a Fallas de Transformadores ISO 17359:2018	43
Tabla 3 Límites Claves de Concentración de Gases Disueltos en el Aceite (ppm).	48
Tabla 4 Matriz de Priorización – Factores de Entrada (FE).	61
Tabla 5 Acciones con Base en Temperatura ANSI NETA ATS.	67
Tabla 6 Pruebas de Aceptación – Resistencia de Aislamiento.	68
Tabla 7 Límites de Aceptación de Aceite Aislante – Métodos ASTM.....	69
Tabla 8 Valores del Factor de Índice de Salud (HIF).	75
Tabla 9 Pesos del Factor (K).....	75
Tabla 10 Factor del Índice de Salud – Prueba Resistencia de aislamiento.....	76
Tabla 11 Factor del Índice de Salud – Termografía IR	77
Tabla 12 Factor del Índice de Salud – DGA.	77
Tabla 13 Puntajes (Sj) y Pesos (Dj) DGA.	78
Tabla 14 Puntajes (Sj) y Pesos (Wj) para caracterizar el ADFQ.....	79
Tabla 15 Factor del Índice de Salud – Calidad del Aceite OQF.....	80
Tabla 16 Factor del Índice de Salud – Factor de carga β	81
Tabla 17 Casos de Estudio - Aplicación de Modelo (IH).....	83
Tabla 18 Casos de Estudio Calculo Modelo (IH) – Datos Factores de Entrada (FE).	83
Tabla 19 Plan de Implementación Táctica.....	97

Introducción y Contexto Operacional

La industria moderna busca mantener la continuidad operativa de manera fiable y que genere alto valor a la organización, esto es fundamental para sobrevivir en un mercado mundial que exige ser cada vez más eficientes (Pérez & Coutín, 2005).

El consorcio Servicios Asociados SAS – Confipetrol opera en la industria Oil & Gas desde hace cuatro años en el área de influencia del departamento del Huila (Colombia), ejecuta sus actividades como mantenedor de los activos de superficie de la Empresa Colombiana de Petróleo (Ecopetrol S.A.).

La gestión de mantenimiento basado en condición (CBM)⁴ que combina (preventivo, predictivo y correctivo) en el sector Oil & Gas, es de particular ayuda a la hora de poder establecer medidas directas del estado de los equipos con datos reales, para detectar fallas incipientes mediante la comparación de distintos parámetros medidos (Shin & Jun, 2015).

La evaluación de la situación de los transformadores de media tensión (MT) requiere técnicas especiales que examinen la condición de su estado de salud a través de un conjunto integral de pruebas (Gómez-Ramírez, 2018).

Las técnicas evaluativas comprenden diagnósticos que van desde análisis eléctricos y fisicoquímicos hasta técnicas específicas como análisis de gases disueltos (DGA), termografía infrarroja (IR⁵), ultrasonido Air Borne (UT⁶), evaluación de la calidad del aceite aislante y verificación de la degradación del papel (Castro-Meneses et al., 2022).

El transformador de potencia en general tiene por diseño una vida extensa (20-35 años), requiere de atención y cuidado en especial del sistema de aislamiento (sólido y líquido), que representa un parámetro primordial, para prolongar la vida útil restante de este tipo de activos (Rondón et al., 2013).

⁴ CBM - Condition Based Maintenance

⁵ IR - Radiación Infrarroja a veces llamado luz infrarroja.

⁶ UT - Inspección convencional por ensayos ultrasónicos

La línea base de la organización identifica que los datos producto de las pruebas no tienen ninguna relevancia analítica y no son útiles, ni tienen un proceso para decidir tácticas dentro del asunto de gestión de mantenimiento, solo se archivan de manera documental. Por esta razón, se sugiere demostrar cuán importante es conocer el valor cuantitativo del índice de salud (IH o Index Health) de los transformadores (MT) operativos y, a partir de esto, el valor global de su condición (Montané-García et al., 2021).

La cuantificación del estado de un activo a partir de factores de ponderación derivados de datos disponibles, obtenidos mediante captura en campo y que, al ser combinados, facilitan la creación de valoraciones del activo. Estas valoraciones tienen base en las recomendaciones establecidas por organismos internacionales como el IEEE, el IEC⁷ y el CIGRE⁸, los cuales ofrecen una guía sobre la situación de los activos (Jahromi et al., 2009).

El propósito es establecer acciones de mantenimiento diferenciadas con enfoque en el riesgo de los transformadores (MT) bajo un marco metodológico propuesto con base en la condición según la norma ISO 17359:2018 para evaluar e identificar deficiencias a partir de diferentes modos de falla con relación a un componente; así como también, poner en perspectiva el modelo determinador del número de equipos que posiblemente requieran diagnóstico periódico, intervención y acciones de mantenimiento (Blanco et al., 2018).

⁷ IEC - Comisión Electrotécnica Internacional.

⁸ CIGRE - Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos.

Planteamiento de la Oportunidad

La necesidad de establecer la condición de los transformadores (MT) en la industria Oil & Gas, por medio de un índice de salud de activos (Asset Health Index, AHI), es el motivo fundamental para ahondar en la temática a través de esta investigación.

Los estudios fisicoquímicos y de gases disueltos (DGA) en el aceite aislante en el año 2025, se realizan a un número reducido de equipos en funcionamiento, principalmente por las exigencias establecidas por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, con el fin de identificar la cantidad de transformadores cuyo aceite aislante contiene o no la sustancia tóxica denominada como bifenilos policlorados (PCB⁹) (Ziv, 2009)

El análisis del aceite aislante permite la posibilidad de procesar, analizar y disponer la información como insumo principal para calcular el índice de salud (IH), la condición operativa y determinar el estado de los activos individuales a partir de información base de acuerdo con diagnósticos establecidos (Cañizares et al., 2023).

La condición refleja la oportunidad de que la organización combine el índice de salud (IH) con decisiones de valor para desarrollar tácticas específicas de mantenimiento, que para el año 2025 aún no existen en la estructura operativa del Consorcio Servicios Asociados SAS – Confipetrol.

La relación entre el índice de salud de los transformadores (MT), que es objeto de cálculo bajo factores de condición y tácticas de mantenimiento, desarrolla una metodología de toma de decisiones en relación con recursos y actividades. Estas actividades brindan valor dentro de la gestión de activos, alineadas con los objetivos estratégicos de la organización (Guo & Guo, 2022).

⁹ PCB – Bifenilos Policlorados, sustancias con propiedades aislantes en los transformadores, sin embargo tóxicas y con potencial daño al ambiente y salud humana.

Límites de la oportunidad

El presente trabajo de profundización establece una metodología de relación entre el índice de salud (IH) de acuerdo con la capacidad de establecer una evaluación cuantitativa del estado de los transformadores (MT) y tácticas de mantenimiento a los transformadores de potencia bajo la jurisdicción de la compañía Servicios Asociados SAS – Confipetrol dentro de las normas de mantenimiento y de gestión de activos (Li et al., 2023).

El insumo fundamental para el análisis comprende únicamente los equipos que están disponibles y operativos en el campo, además de la información que se dispone hasta ahora de los resultados del diagnóstico de pruebas dieléctricas al aceite aislante (Consortio Grupo SAS - Confipetrol, 2025).

La estructura de mantenimiento tiene tres áreas: eléctrico, redes y CBM. Estas áreas se ocupan de gestionar todas las actividades de intervención y supervisión de los activos eléctricos, como los transformadores (MT), para responder a cualquier situación relacionada con su estado (Servicios Asociados, 2018).

Los departamentos de mantenimiento, en sus actividades tanto del basado en condición (CBM), que analiza y trata datos, como el departamento vigente de mantenimiento que custodia los datos fundamentales para realizar los análisis, forman parte de las áreas de influencia dentro de la organización. Esto incluye toda la información que tiene relación con la población actual de transformadores de potencia que están en proceso de muestreo y sus rutinas respectivas (Consortio Grupo SAS - Confipetrol, 2025).

El presente trabajo de profundización no abarca la implementación y tiene ejecución a nivel operativo dentro de la jerarquía organizativa de la empresa, con un enfoque documental. Define sus límites en función del parque de activos instalados y operativos para el año 2025, con

potencias entre [300 - 25,000 kVA¹⁰], ya que constituyen la mayor porción de equipo instalado para el proceso de producción de crudo.

El análisis de relación propuesto tiene límite respecto con los datos resultantes de los diagnósticos con aplicación al aceite aislante hasta el año 2025, así como a las pruebas eléctricas respectivas.

La metodología ejemplifica la estructuración a través de casos propuestos reales en la compañía, con potencial de escalabilidad, cobertura y aplicabilidad extensiva a todo el parque de equipos en operación de la organización.

La efectividad de la propuesta depende en gran medida de la disponibilidad de datos, que para el 2025 la compañía Servicios Asociados SAS – Confipetrol tiene, referente a resultados de las pruebas de diagnóstico fisicoquímico, análisis de gases disueltos (DGA¹¹) y pruebas eléctricas; en efecto a que solo examina una población del 12,3 % de transformadores MT operativos con estas tres técnicas de forma simultánea. Sin embargo, esta limitación tiene compensación con la adaptabilidad, flexibilidad y escalabilidad que la propuesta tiene para ser aplicable a todo el parque de transformadores con los datos pertinentes.

La propuesta no experimenta alteraciones en términos de resultados, sin embargo, se deja de manifiesto un enfoque realista y transparente frente a la realidad de la organización en cuanto a los recursos.

¹⁰ kVA - kilovoltiamperio y es una unidad de potencia aparente en sistemas eléctricos.

¹¹ DGA – Del inglés, Dissolved Gas Analysis

Justificación

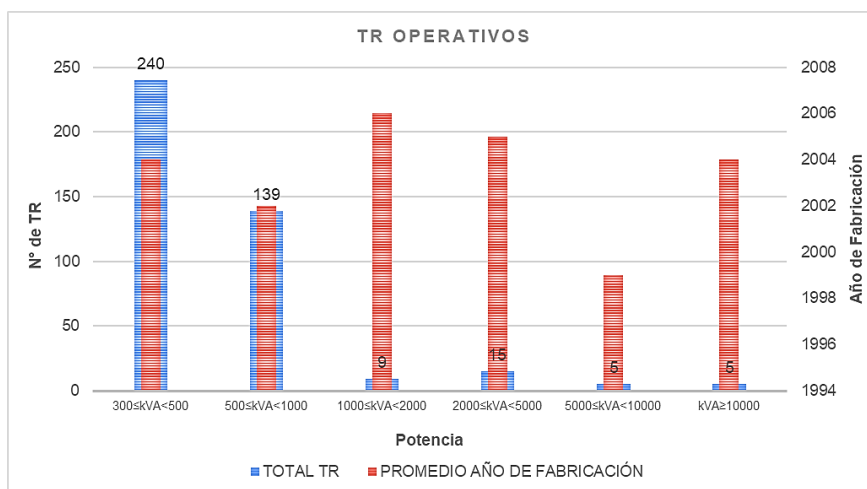
Los transformadores en la industria Oil & Gas, en las áreas de exploración y producción (upstream¹²), permiten la operación desde diversos roles según la aplicación.

La función de los equipos de superficie como variadores de frecuencia, motores y bombas electros sumergibles (BES¹³) depende del suministro eléctrico a través de transformadores que elevan (SUT Step Up Transformers) o reducen (SDT Step Down Transformers) la tensión según la necesidad (Magnetron Transformadores, 2025).

La población de transformadores (MT) en operación está compuesta entre (SDT) y (SUT), que para el año 2025 se agrupa según su potencia aparente y año de fabricación, como se observa en la Ilustración 1.

Ilustración 1

Parque de Transformadores Operativos (Clasificados por Potencia).



Nota. La ilustración muestra el total de equipos en operación y su clasificación por niveles de potencia eléctrica en virtud del promedio del año de fabricación. Elaboración propia con base en archivo (Excel) Inventario de Activos en Media Tensión en Operación (Consortio Grupo SAS - Confipetrol, 2025).

Los equipos en operación, según el año de fabricación, se sitúan entre 1990 y 2006; por lo tanto, muchos de ellos se acercan a los 20 años de funcionamiento. Por consiguiente, como

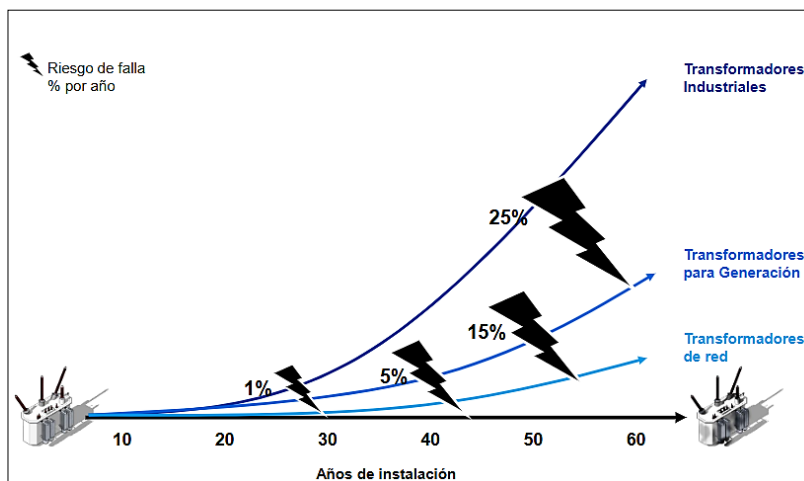
¹² Upstream - El segmento Upstream abarca la búsqueda de yacimientos de petróleo y gas

¹³ BES - (BES) es un sistema de levantamiento artificial para extraer fluidos (principalmente petróleo y agua) de pozos.

se muestra en la Ilustración 2, se considera que el proceso de fallos por envejecimiento comienza a ocurrir después de 20 años y hasta 30 años de funcionamiento (Mendes, 2017).

Ilustración 2

Curva de Fallas (%) por Año, Estimación para Transformadores de Potencia.



Nota. La ilustración representa el incremento de riesgo de falla en porcentaje a través de la curva de comportamiento de equipos industriales, de generación y red, conjugado con la relación temporal en años de instalación. Tomado de (CIGRE GT A2.62, 2024).

La propuesta tiene como objetivo transformar y, en especial, estimular el manejo de la información sobre la gestión de mantenimiento de los transformadores de potencia. Se establece desarrollar tácticas desde la perspectiva técnica que aborde acciones sobre los equipos en virtud de su condición (Abu-Elanien et al., 2012).

La capacidad para sensibilizar e integrar una cultura de análisis de datos en la organización del mantenimiento es relevante, junto con un enfoque en la gestión de activos, que puede mejorar el conocimiento sobre cómo anticipar fallos y, especialmente, conocer el estado de los equipos mediante el índice de salud (HI) (Cerón et al., 2015).

El disponer de alertas tempranas de la condición, a través de un índice de salud como herramienta que el área mantenimiento no tiene en el año 2025, es esencial para administrar correctamente los transformadores (MT) y asegurar el suministro de la energía eléctrica alterna de un nivel a otro según las necesidades operativas de los campos (Martínez Gómez, 2022).

Viabilidad de la idea del trabajo de profundización

El desarrollo de la metodología propuesta es viable por diversos factores clave: en primer lugar, los datos que se tienen producto del diagnóstico de aceite aislante y pruebas eléctricas a los transformadores (MT) se ubican en repositorios digitales sin ser objeto de ningún análisis, ni propósito que pueda ser útil para establecer la condición actual de los equipos.

La organización de mantenimiento al año 2025 en la compañía Servicios Asociados SAS – Confipetrol, no tiene información o datos que guíen la toma de decisiones sobre acciones de mantenimiento o intervención, así como tampoco un modelo integral que evalúe el estado de los transformadores a través del uso del índice de salud (IH) como herramienta práctica, eficaz y razonable (Guo & Guo, 2022).

La propuesta refuerza un aspecto relevante que tiene que ver con la necesidad de la organización de mantenimiento de determinar el estado de salud de sus activos. Esto se fundamenta en que el 61,5% del parque de transformadores de media tensión ha superado los 20 años de vida en operación, lo que representa un desafío crítico para la gestión eficiente de la infraestructura eléctrica.

La organización reconoce la urgencia de tomar decisiones estratégicas en la administración de activos, con base en datos integrados que ofrezcan un índice único de salud que represente con exactitud y generalidad el estado de los transformadores (Abu-Elanien et al., 2012).

El índice de salud (IH), según el Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE), posee la capacidad de clasificar transformadores en función de su condición y optimizar el mantenimiento conforme a su estado técnico. Esta herramienta resulta fundamental para el desarrollo competitivo al que las industrias se están dirigiendo en un mercado moderno que implica asumir retos con altura (Rajote C et al., 2011).

Objetivos

El proceso de aprendizaje para desarrollar habilidades del pensamiento toma en cuenta todos los niveles según el modelo de Bloom, Garret-Briggs y Gagné¹⁴, que determina un acuerdo acerca de las metas educativas en términos de capacidades intelectuales, efectivas y psicomotrices. Esta taxonomía sintetiza las finalidades educativas a nivel de conocimiento, entendimiento, aplicación, análisis y síntesis (Krathwohl, 2002).

General

Estructurar un modelo para determinar la salud de Transformadores (MT), con base en factores propios del estado del aceite aislante y pruebas eléctricas, determinar su estado y contextualizar su condición, para facilitar la toma táctica de decisiones en la gestión de activos alineado a los estándares ISO 55001:2024, UNE EN 17485:2023 e ISO 31000:2018.

Específicos

Se describen de forma secuencial, con el fin de comprender mejor la dimensión del alcance del proyecto.

UNO – Fundamentación Técnica.

Describir las técnicas fundamentales del mantenimiento predictivo eléctrico y el mantenimiento basado en condición según norma ISO 17359:2018, con aplicación a transformadores de potencia, para poner de manifiesto su relación con la toma de decisiones sobre el principio de valor dentro de la gestión de activos, según norma ISO 55000:2024 y 55001:2024. **nivel 1 – Conocimiento Escala de Benjamín Bloom y Robert Gagné.**

DOS – Variables de Construcción.

Reconocer los factores de entrada relevantes con relación a los principales componentes, salud de activos y pruebas de diagnóstico según el estándar IEEE C.57-140 de 2017 y los métodos de detección del estándar ISO 14224:2016, en los transformadores de potencia, como

¹⁴ Benjamín Bloom, Robert Gagné, psicólogos norteamericanos destacados por sus publicaciones en el área de aprendizaje

base para la construcción de un modelo determinador del índice de salud de activos (Asset Health Index, AHI). **nivel 2 - Comprensión de la Escala de Benjamín Bloom y Robert Gagné.**

TRES – Datos y Captura, Factores de Entrada.

Ilustrar cómo los factores de entrada fisicoquímicos, análisis de gases disueltos (DGA) en el aceite aislante y pruebas eléctricas a los transformadores, permiten la construcción del índice de salud de activos, bajo un enfoque de factores de entrada y su relación con la captura de datos según el estándar ISO 14224:2016. **nivel 3 - Aplicación de la Escala de Benjamín Bloom y Robert Gagné.**

CUATRO – Modelo (IH), Puntajes, Pesos y Cálculo.

Analizar el modelo de evaluación bajo un enfoque de factores de condición, para calcular el índice de salud de activos (Health Index, HI) de los transformadores, a partir de datos de factores de entrada fisicoquímicos, análisis de gases disueltos (DGA) en el aceite aislante y pruebas eléctricas. **nivel 4 - Análisis de la Escala de Benjamín Bloom y Robert Gagné.**

CINCO – Índice de Salud y Tácticas.

Proponer una metodología para construir decisiones tácticas en relación a los transformadores (MT), con base en el índice de salud (IH) y el nivel de evaluación de riesgo, dentro de un marco de toma de decisiones sobre acciones de mantenimiento, con referencia a las normas ISO 55001:2024, UNE EN 17485:2023 e ISO 31000:2018. **nivel 5 - Sintetizar - Escala de Bloom & Gagné.**

SEIS – Conclusiones.

Presentar los principales resultados obtenidos de orden técnico, sectorial, científico, académico e industrial.

Marco Teórico

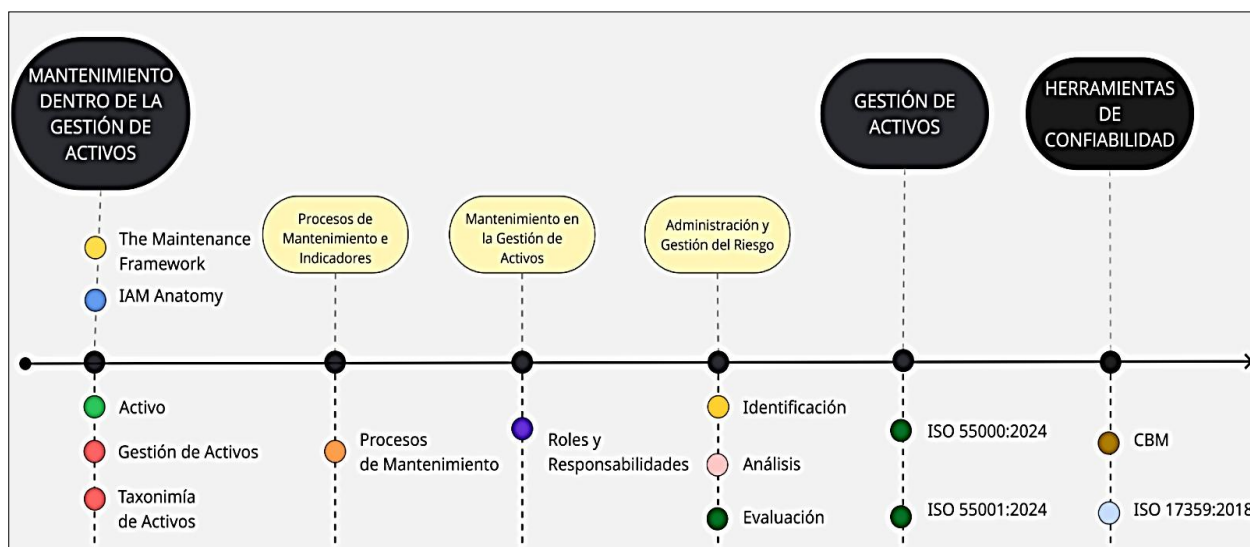
La situación actual de la industria Oil & Gas demanda una estrategia y una preparación adecuadas para hacer frente a los diversos retos que presenta la gestión de activos; por consiguiente, es fundamental contar con una comprensión clara para enfrentarlos.

Revisión y Sistematización Teórica – Marco de Asignaturas.

El estudio desarrolla los conceptos a través de los fundamentos teóricos obtenidos por medio de las asignaturas del programa de maestría y sus tópicos clave, como se indica en la Ilustración 3. De esta manera, este trabajo se sustenta en la comprensión que cada asignatura ha ofrecido como motor para el desarrollo del conocimiento.

Ilustración 3

Asignaturas de Maestría, pilares de construcción de la investigación.



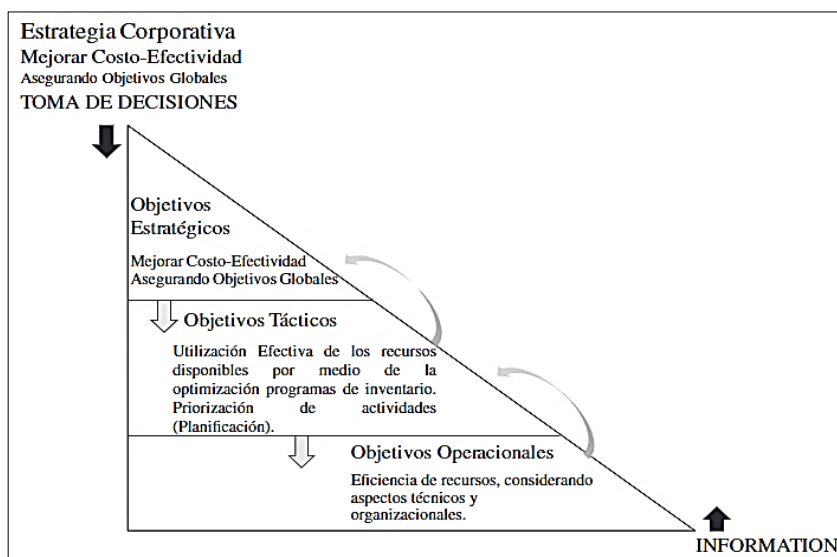
Nota. La ilustración pone de manifiesto las asignaturas y temáticas de relevancia con el contexto de la presente investigación, como base del enfoque teórico para la construcción e integración en el desarrollo del trabajo de profundización. Elaboración propia.

Es importante establecer un camino eficaz para la gestión de activos en el marco de decisiones con valor y riesgo, que logre maximizar la rentabilidad de los activos en lo que respecta a eficiencia y costos superfluos, y que, al final, aporte valor al modelo empresarial (Segura-Monge et al., 2024).

Las decisiones de valor como marco para construir tácticas, en este caso aplicadas a transformadores (MT) en la industria moderna Oil & Gas, sugieren una coherencia a nivel gerencial, táctico y operacional, donde mantenimiento es protagonista integral en el proceso generador de valor. Es así como la toma de decisiones sigue un flujo top-down¹⁵, tal como se muestra en la Ilustración 4, es decir, tiene su génesis a nivel superior, hasta el nivel operativo; sin embargo, el tratamiento de información para la toma de decisiones inicia desde la base (Viveros et al., 2013).

Ilustración 4

Flujo de decisiones Top-Down en estrategias corporativas.



Nota. La ilustración muestra la relevancia de las decisiones para el cumplimiento de metas y objetivos estratégicos, tácticos y operativos bajo el formato Top-Down (desde el nivel estratégico hasta el operativo), y la importancia de los recursos como la información desde la base operativa para generar decisiones de valor. Tomado de página 127 (Viveros et al., 2013a).

Los factores tácticos de mantenimiento en el presente trabajo de profundización tienen en enfoque en la gestión de los activos de manera integral, a través de una gama de conexiones entre la fundamentación técnica del índice de salud de activos (Asset Health Index, AHI) y un marco normativo. Ambos elementos constituyen el núcleo central de los sistemas para valorar

¹⁵ Top-Down. Entendido como el flujo de decisiones en sentido de arriba hacia abajo.

objetivamente los transformadores (MT), lo que resulta en decisiones tácticas para la organización.

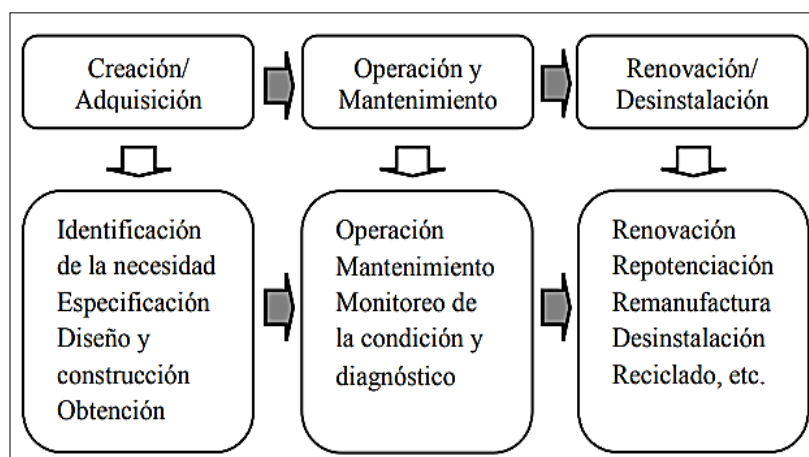
Estándar ISO 55000:2024 como Potenciador de Decisiones.

La norma ISO 55000:2024 tiene un impacto directo en la toma de decisiones en relación con la asignación de recursos con enfoque en el valor, al actuar como un generador sólido de tácticas. Esto es posible gracias a que establece un marco para la gestión de activos que está alineado con los objetivos estratégicos de la compañía y abarca todas las fases del ciclo vital del activo. Su propósito es conocer el equilibrio entre costos, riesgo y desempeño, con el fin de generar beneficios y asegurar valor para la organización (Aliani & Romero, 2014).

Las principales ventajas de la gestión de activos según el estándar ISO 55000:2024 son la garantía y seguridad de que los transformadores cumplen su propósito requerido. Además, lograr operar con un mejor control al riesgo durante todo su ciclo de vida, tal como se observa en la Ilustración 5, donde se mencionan actividades de orden superior e inferior.

Ilustración 5

Fases del ciclo de vida de un transformador.



Nota. La ilustración muestra la segmentación de tareas requeridas en relación con la gestión del transformador de potencia de acuerdo con las fases del ciclo de vida de un activo (superior) y las actividades relevantes dentro del ciclo de vida de un transformador (inferior). Tomado de Consideraciones para la Gestión de Transformadores de Potencia, en el Marco de la ISO 55000, página 595 (Aliani & Romero, 2014)

Estándar ISO 17485:2023 como Potenciador de Mantenimiento en la GA.

En la administración de activos físicos, es crucial el papel del mantenimiento a través del ciclo de vida del activo de los equipos. Esto ayuda a los profesionales de mantenimiento a apoyar sus responsabilidades y necesidades con criterios claros y objetivos, en línea con la gestión del índice de salud (AHI) en transformadores (MT) y con información confiable sobre el estado de los equipos (Medina, 2024).

La fase de operación y mantenimiento en el ciclo de vida de los activos es crucial para determinar el índice de salud de los transformadores. En esta etapa, la función del mantenimiento se encarga de recopilar datos sobre las condiciones y el estado de los equipos, dentro de un marco que incluya actividades preventivas, predictivas y correctivas. Esto posibilita desarrollar tácticas orientadas a la rentabilidad para la organización.

La función de mantenimiento en los transformadores tiene un rol relevante, ya que, por una parte, resalta la relevancia de las decisiones tomadas sobre el estado del equipo y, por otra parte, incorpora casi culturalmente una perspectiva holística para evaluar el impacto de las actividades de mantenimiento durante todo el ciclo de vida del activo (UNE EN 16646 Asociación Española de Normalización y Certificación, 2015).

El marco para potenciar el valor de los activos físicos desde el mantenimiento establece su integración como parte fundamental de la gestión de activos en concordancia con los objetivos de valor de la organización. Además, influye en las decisiones estratégicas, tácticas y operativas a lo largo del ciclo de vida, con base en datos. También se pone de manifiesto la colaboración multifuncional entre producción, ingeniería, calidad y mantenimiento (UNE EN 17485 Asociación Española de Normalización, 2023).

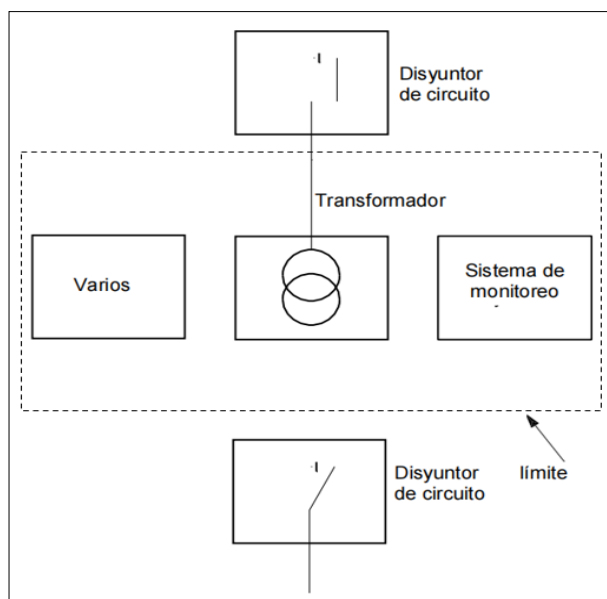
El rol de mantenimiento como herramienta práctica y factor de influencia en las decisiones estratégicas y tácticas de la organización sobre los transformadores (MT) de acuerdo con una clara orientación de las estrategias y las acciones de mantenimiento.

Estándar ISO 14224:2016 como Potenciador de Captura y Análisis de Datos.

La organización y recolección de datos según el estándar ISO 14224:2016 permite observar la composición de la unidad del equipo, las subunidades y los elementos mantenibles. Esto es esencial para determinar una relación funcional y de conexiones físicas entre los transformadores de potencia (PT¹⁶) sumergidos en aceite (OT¹⁷) como se muestra en la Ilustración 6 (BSI EN ISO 14224, 2016).

Ilustración 6

Volumen de Control - transformador de Potencia. según estándar ISO 14224:2016.



Nota. La ilustración define el volumen de control del transformador de potencia en consideración con el equipo perse y el sistema de monitoreo de variables (presión, temperatura, nivel), así como también la integración con los equipos de maniobra y protección (Disyuntor). Tomado de Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural - recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos, página 103; (BSI EN ISO 14224:2016, 2016).

El marco de recolección de datos y modos de falla, según el estándar ISO 14224:2016, establece doce de estos, con relación a los transformadores de potencia. Sin embargo, se asocian modos de falla adicionales que no se encuentran de manera normalizada en el estándar.

¹⁶ PT – Código Clase de Equipo, denominado por el estándar ISO 14224:2016 Power Transformers.

¹⁷ OT – Código Tipo de Equipo, denominado por el estándar ISO 14224:2016 Oil immersed.

El estándar establece doce modos de falla en relación con los transformadores de potencia, como se muestra en la Tabla 1; sin embargo, de acuerdo con el análisis de gases disueltos (DGA) y el dieléctrico y fisicoquímico (ADFQ), se presentan modos adicionales, asociados, como, por ejemplo, efecto corona, arcos eléctricos en el aceite, descargas eléctricas, puntos calientes y sobrecalentamiento en general (Crespo & Rodríguez, 2015).

Tabla 1

Modos de Fallo de un Transformador según ISO 14224:2016.

MODOS DE FALLO DE UN TRANSFORMADOR			
Nº	Código	Descripción	Ejemplo
1	AIR	Lectura anormal de instrumento de medida	Indicación errónea del nivel de aceite, falsa alarma de temperatura, lectura defectuosa de instrumentos de medida, etc.
2	ELU	Fuga externa	Fuga de aceite, o de refrigerante
3	FOV	Tensión errónea en la salida del devanado secundario	Tensión de salida del devanado secundario no esta dentro del rango operativo
4	FTF	Falla de funcionamiento en su energización	No responde a las ordenes de energización de la maquina
5	INL	Fuga interna	Fuga interna del aceite aislante o del circuito de refrigeración
6	OHE	Sobrecalentamiento	Problema en el sistema de refrigeración
7	OTH	Otros	Modos de fallo no cubiertos por los seis primeros anteriores
8	PDE	Medida con umbral superado	Superación del limite de vigilancia (superior e inferior) en una variable o medida monitorizada.
9	PLU	Obstrucción, atasco	Obstrucción en tubería de radiador
10	SER	Problemas menores durante servicio	Elementos sueltos, suciedad, decoloración de la superficie
11	STD	Deficiencia estructural	Aparición de grieta o fisuras el tanque del transformador
12	UNK	Desconocido	Falta información para definirlo como modo de falla

Nota. La ilustración describe los modos de fallo habituales a los que hace referencia el estándar de forma genérica en los transformadores de potencia, en concordancia con la estandarización en la toma y recolección de datos a través de un único código característico. Adaptado de Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural - recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos, página 190 y 191; (BSI EN ISO 14224, 2016).

Las cuatro normas en conjunto se conectan y complementan para proporcionar un enfoque normativo que sea marco solido para la generación de datos con un enfoque de relación al índice de salud (IH) y tácticas de mantenimiento.

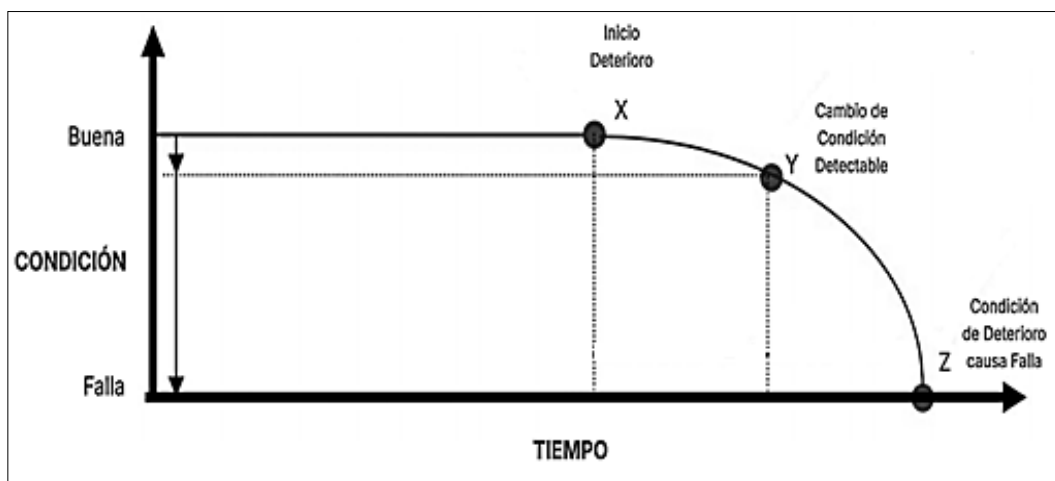
La gestión de mantenimiento con enfoque a transformadores de potencia es útil en la medida en que la estructura del índice de salud (IH) sea complemento de una cultura dentro de

la organización de mantenimiento que extrapole la importancia de las decisiones a lo largo de todo el ciclo de vida (Aliani & Romero, 2014).

La táctica de mantenimiento cualquiera que sea depende de la condición del transformador, su condición detectable y corregible antes de la pérdida de la función tal como se observa en la Ilustración 7, gráficamente se representa el valor (X) donde la condición es buena pero ya empieza a cambiar, (Y) donde la condición ha cambiado lo suficiente como para ser detectable mediante una técnica de diagnóstico específica y (Z) donde la condición se ha deteriorado lo suficiente como para provocar una falla en el transformador (Rajote C et al., 2011).

Ilustración 7

Curva PF, Condición Teórica - Degradación de un Transformador.



Nota. La ilustración define los puntos desde la fase inicial de un deterioro hasta el punto de falla propiamente, a través de la curva teórica de degradación de la condición de un equipo. Tomado de Guía para el mantenimiento de transformadores CIGRE grupo de trabajo A2.34, página 10; (CIGRE 445 et al., 2011).

Las tácticas de mantenimiento con aplicación a equipos como los transformadores de potencia buscan garantizar un nivel conveniente de confiabilidad durante su vida útil. Lo hacen al detectar, localizar y determinar cualquier desviación de su desempeño. Esto es necesario para adoptar las medidas pertinentes al respecto según su estado y decidir si es necesario renovar, mantener o reemplazar el activo (Abdulla et al., 2024).

Estándar ISO 31000:2018 como Potenciador de Evaluación de Riesgos.

Los transformadores en operación (MT) no tienen datos base que definan su condición; no obstante, se desconoce la incertidumbre e imprevisibilidad de su comportamiento en función de su estado. Por este motivo, el índice de salud (HI) es un insumo para la evaluación del riesgo y también para determinar las tácticas de mantenimiento (predictivo, preventivo y correctivo). En tanto, los riesgos relacionados con su condición deben ser identificados como marco para escoger dichas tácticas (Lizarzaburu et al., 2025).

Antecedentes de la Investigación.

El consorcio Servicios Asociados SAS - Confipetrol, operador de mantenimiento para el cliente Ecopetrol S.A. desde 2022, gestiona, entre otros, los transformadores (MT) que energizan los equipos de superficie y fondo en todos los pozos productores de crudo.

Estado Actual - Cultura de Salud de Activos dentro de la Organización.

Los datos sobre los transformadores (MT) desde el año 2022 hasta el 2025 solo se tratan con un enfoque de información de características (nameplate) a modo de identificación de los equipos y condiciones operativas de diseño. Además, la cultura de mantenimiento es escasa dentro de la organización, no ve la importancia del diagnóstico del aceite aislante y de pruebas eléctricas como insumo base para ahondar en análisis que determine la condición de los equipos.

Para el año 2025, la organización no conoce a profundidad el índice de salud (IH) como herramienta gestora de mantenimiento con aplicación a transformadores; solo hace diagnóstico de aceites aislante de acuerdo con requerimientos normativos del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, y no es concebido como una forma de sacar provecho a los datos en vista de analizar y determinar la condición de los activos.

La organización al año 2025 no cuenta con la certificación ISO 55000:2024; no obstante, este estudio exhaustivo aspira a servir como un impulsor en términos de administración de conocimientos y generación de cultura en cada nivel organizacional.

La intención es prever la definición de los pilares para el comienzo de un proceso de certificación que involucre a cada departamento y contemple las ventajas que la administración de activos ofrece a las organizaciones para evaluar el desempeño de cada uno de estos en diversas etapas del ciclo de vida (ISO 55000 - Organización Internacional de Normalización, 2024).

Estado de Proyección - Salud de Activos dentro de la Organización.

La propuesta del presente trabajo de profundización plantea, por una parte, integrar la metodología del índice de salud como herramienta potencial para determinar la de salud de los transformadores (MT), como marco de toma de decisiones dentro de la organización de mantenimiento. Por otra parte, busca generar una cultura de conocimiento y sensibilización de los datos como fuente primordial a la hora de actuar de cara a la condición de los activos en operación.

Estado del Arte.

Estudios e investigaciones han puesto de manifiesto la importancia de conocer más a profundidad el estado de los transformadores, más allá de los diagnósticos y las pruebas eléctricas convencionales que se aplican para conocer su condición; es así como la industria moderna ha desarrollado metodologías que permita la caracterización del estado y la condición de los equipos en relación con su vida útil remanente. A continuación, se presenta algunas metodologías de cálculo del índice de salud (IH), a nivel investigativo, académico e industrial con relación a los transformadores de potencia.

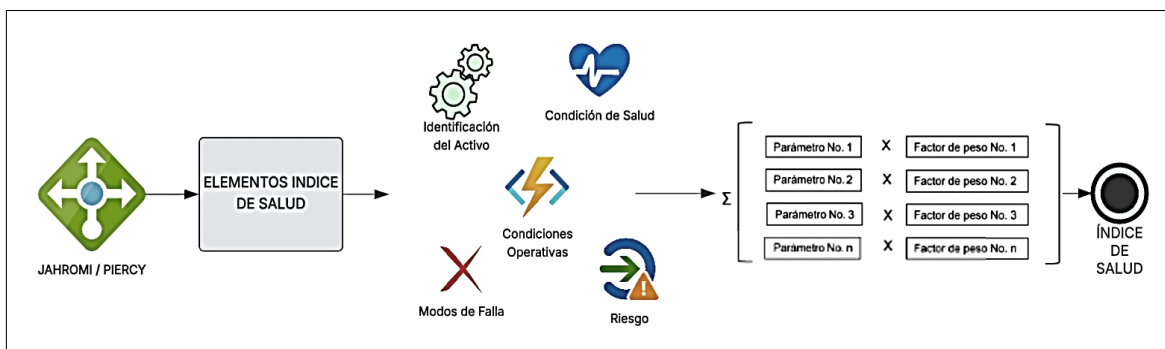
Índice de Salud – Factores Ponderados.

El simposio internacional sobre aislamiento eléctrico del año 2008 en Vancouver, BC, Canadá, Ali Naderian Jahromi, Ray Piercy, Stephen Cress, Jim RR Service y Wang Fan presentan un artículo donde se pone de manifiesto la gestión de transformadores de potencia mediante índices de salud, como se observa en la Ilustración 8, donde se destaca que el índice de salud representa una herramienta práctica que combina los resultados de las observaciones

operativas, inspecciones de campo, pruebas en sitio y de laboratorio, para gestionar el activo y priorizar las inversiones en planes de costos y mantenimiento (Naderian et al., 2008).

Ilustración 8

Proceso global Ali Naderian Jahromi, Ray Piercy, Índice de Salud.



Nota. La ilustración muestra el proceso de conjugación de los elementos principales que interviene en el proceso de diagnóstico y monitoreo para el cálculo del índice de salud ponderado. Elaboración propia adaptada de la parte II del documento An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index (Jahromi et al., 2009).

La metodología define los pesos y puntajes de acuerdo con las recomendaciones establecidas por la normatividad IEEE e IEC, para establecer el factor de análisis de gases disueltos (DAGF)¹⁸ tal como se describe la Ecuación 1.

Ecuación 1

Factor de Análisis de Gases Disueltos (DAGF).

$$DAGF = \frac{\sum_{j=1}^n S_j \times W_j}{\sum_{j=1}^n W_j}$$

Donde,

- S_j , es el puntaje de evaluación de la concentración de gases (Individual).
- W_j , es el factor de ponderación (peso) de la concentración de gases (individual).
- n , número de gases con aplicación al modelo.

Nota. La ecuación determina el valor del DAGF, como puntaje producto de la evaluación del análisis de gases disueltos a partir de puntajes de concentración de gases y pesos. Tomado de An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index (Jahromi et al., 2009).

¹⁸ DAGF – Del inglés, Dissolved Gas Analysis Factor.

Índice de Salud – Diagnóstico Periódico.

El departamento de Ingeniería y de alta potencia de la Universidad Tecnológica de Pomerania Occidental de Szczecin, Polonia, en el año 2021 presentó un artículo, Análisis experimental y numérico del envejecimiento térmico en transformadores de potencia, donde pone de manifiesto el método de índice de salud con base en diagnósticos periódicos del aceite, con gran sensibilidad para identificar cambios en los parámetros de entrada agrupados en cuatro categorías puntuales de construcción, tal como se observa en la Ilustración 9, aplicado a una población de 220 transformadores de tensión nominal entre (15-220 kV) (Bohatyrewicz & Mrozik, 2021).

La condición de los transformadores de potencia se evalúa de manera integral, combinando los resultados de observaciones durante su operación, inspecciones en el lugar, pruebas en el sitio y en laboratorio. Esto ayuda a recopilar toda la información necesaria para gestionar los activos y tomar decisiones (Castro-Meneses et al., 2022b).

Ilustración 9

Categoría de parámetros, construcción del índice de salud.



Nota. La ilustración muestra los pilares de construcción del método del índice de salud con base en las principales pruebas de diagnóstico a los transformadores en vista de construir un valor global de la condición o índice de salud. Adaptado del artículo Condition Assessment of Power Transformers Based on Health Index Value (Bohatyrewicz & Mrozik, 2021).

Los pilares del algoritmo propuesto de acuerdo con el diagnóstico periódico son el producto de pruebas que se realizan en campo de manera práctica, sin mayor interferencia en la

operación y sin involucrar grandes recursos; no obstante, el modelo se fundamenta en información factible de recopilar.

Índice de Salud – Análisis de Entorno y Propiedades.

La conferencia sobre aislamiento eléctrico de la IEEE 2017 presenta un documento donde propone un método de evaluación con base en el estado ambiental y propiedades de los transformadores de acuerdo con el análisis y puntuación general de defectos para evaluar el estado de los transformadores de potencia.

Según las causas, los defectos se clasifican como fugas, humedad, fallas de elementos, oxidación, sobrecalentamiento y suciedad, entre otros, que tienen relación con factores de influencia de los transformadores como vida útil, nivel de tensión y condiciones ambientales circundantes, para establecer estrategias de operación y mantenimiento, divididas en cuatro grados (correcto, potencial, preliminar y crítico) (Jiang et al., 2017).

Índice de Salud – Enfoque GRNN¹⁹.

La publicación en IEEE Transactions on Power Delivery presenta una metodología novedosa para calcular el índice de salud de transformadores de potencia, la cual se basa en subsistemas y utiliza un enfoque GRNN. Esta metodología desarrolla un algoritmo de inteligencia artificial con base en redes neuronales de regresión con el objetivo de fusionar el estado operativo de los subsistemas constitutivos del transformador y determinar cuantitativamente el índice de salud.

La metodología fundamenta el desarrollo en modelos matemáticos que buscan imitar las habilidades del cerebro humano, con ventajas de aprendizaje, contexto operativo que se adapta

¹⁹ GRNN – del inglés Generalized regression neural network, red neuronal de regresión general.

a la representación de diversos fenómenos físicos, que caracterizan el comportamiento y condición de los transformadores (Agudelo et al., 2014).

El modelo utilizó una muestra de 345 transformadores de potencia, que emplea límites condicionales según las normas IEEE, documentación y criterios de expertos. Esto resulta ser un método confiable y efectivo para determinar si el estado de algún subsistema del transformador es bueno o malo (Islam et al., 2018).

Marco metodológico

El marco metodológico caracteriza el conjunto de acciones, técnicas y procedimientos para analizar el fondo del problema a través de pasos a ejecutar en el estudio. Esto se basa en un marco teórico que utiliza el índice de salud de activos (Asset Health Index, AHI) como herramienta para gestionar activos, con aplicación a transformadores (MT) para evaluar y establecer la condición de los equipos (Azuelo, 2019).

Tipo de Estudio y de Análisis a Desarrollar (Descriptivo).

El diseño de la investigación caracteriza comportamientos de acuerdo con el análisis de aceite aislante y pruebas eléctricas. El fin es establecer una estructura de los fenómenos que les ocurren a los transformadores (MT). Esto con base en la recolección de información verídica de pruebas y diagnósticos que se clasifican en categorías descriptivas a través del resultado de índice de salud (IH) (Patricia Guevara Alban et al., 2020).

Enfoque Lógico Deductivo.

La presente investigación aplica un método de razonamiento lógico deductivo, con un enfoque en las teorías y leyes que explican el comportamiento en los transformadores, así como modelos teóricos relacionados, que permite extraer conclusiones sobre el estado y, finalmente, la condición de salud de los activos. Cada subsistema obedece a un comportamiento físico, químico y eléctrico que interactúa con el entorno y tiene su base en fundamentos teóricos, bajo un método analítico sintético, que tiene utilidad para procesar la información literaria y el análisis deductivo producto de los diagnósticos (Sánchez Molina et al., 2021).

Metodología Cuantitativa - Descriptiva.

La metodología utilizada es cuantitativa, ya que describe el estado de los transformadores al utilizar datos numéricos. En este caso, se trata de magnitudes relacionadas con los

diagnósticos de aceites aislantes, tanto de gases disueltos como fisicoquímicos, a través de herramientas y principios matemáticos que demuestran ser sólidos y concluyentes a la hora de establecer la condición de un equipo (Ghanad, 2023).

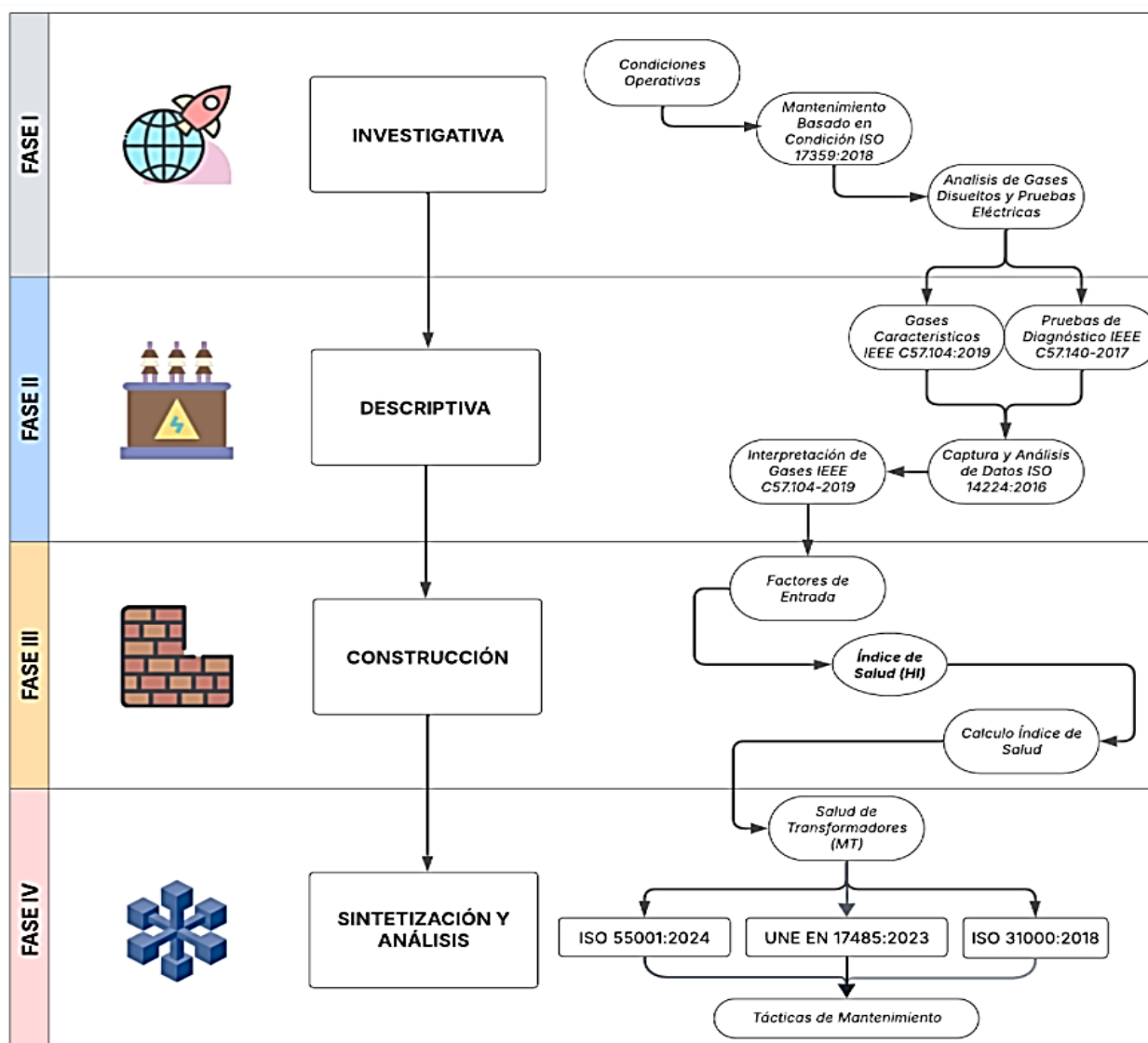
A través de su funcionamiento, el aceite aislante tiene relación con diversas variables vinculadas a su contexto, como la presión y la temperatura; por lo tanto, los gases disueltos son un fiel espejo de las posibles situaciones que pueden estar ocurriendo dentro de los transformadores. Por lo tanto, cada gas se traduce en una magnitud de acuerdo con la norma IEEE. De aquí la importancia del enfoque descriptivo en el presente estudio, ya que permite abordar cuantitativamente el estado de los activos a través del índice de salud (IH).

Fases del Proyecto

La investigación se estructura bajo la concatenación de cuatro fases de acuerdo con la Ilustración 10, donde se establece la construcción de tácticas de mantenimiento con base en el cálculo del índice de salud (IH) a través de factores característicos del estado de los transformadores.

Ilustración 10

Fases metodológicas de la investigación.



Nota. La ilustración muestra las fases de la investigación a través de cuatro grandes fases con la inmersión secuencial de las actividades que se abordan de acuerdo con el planteamiento de la oportunidad. Elaboración propia.

Fase I. Conceptualización – CBM ISO 17359:2018

La investigación tiene su origen en identificar parámetros de condición y variables eléctricas de desempeño en los transformadores (MT) como potencia, tensión (V^{20}), corriente eléctrica (A^{21}) y porcentaje de carga nominal. Así pues, las directrices del Mantenimiento Basado en Condición (CBM) son componente vital de la gestión de activos. Para efectos de la presente investigación, se efectúa a través del diagnóstico de aceite aislante (ISO 17359 Organización Internacional de Normalización, 2018).

Fase II. Parametrización y Variables de Entrada.

La Guía IEEE para la evaluación y reacondicionamiento de transformadores de potencia inmersos en líquido C57.140-2017 en conjunto con la Guía IEEE para la interpretación de gases generados en transformadores sumergidos en aceite mineral C57.104-2019, configura los parámetros para identificar la condición de los transformadores (MT) con base en aceites aislantes y discriminar entre las condiciones normales y anormales, detectar fallas de forma confiable y económica e identificar fallas con posibilidad de presentarse a corto plazo (IEEE C57.104, 2019).

Los modos de falla identificados a través del análisis de aceites aislantes son complementarios a los ya establecidos por la norma ISO 14224:2016. Estos son útiles bajo un marco de recolección y análisis de datos históricos como parte de la base para calcular el índice de salud (IH) en los transformadores (MT).

²⁰ V - tensión eléctrica (símbolo V), Se define como la diferencia de potencial eléctrico o la energía eléctrica por unidad de carga.

²¹ A - amperio (símbolo A), que es la unidad básica del Sistema Internacional de Unidades (SI) para medir la intensidad de la corriente

Fase III. Construcción Índice de Salud.

Los factores de entrada se llaman así porque son el resultado de las pruebas eléctricas y el análisis de los gases que están disueltos en el aceite aislante. Estos factores son muy importantes para crear el índice de salud de los transformadores (MT). Generalmente, estos datos son de sencilla recolección y es información que es de fácil acceso. Esta condición lo hace en la práctica mucho más asequible de aplicar.

El valor del índice de salud unge como una herramienta potencial para representar el estado general de un activo a través de diversos criterios de condición que se relacionan con factores de condición a largo plazo (Naderian et al., 2008).

Fase IV. Síntesis y Tácticas.

La conexión entre el índice de salud (IH) y la condición de los transformadores (MT) sirve como base para definir cómo se relacionan el estado de salud y las tácticas de mantenimiento, que dependen de la cualidad de cada activo. Se establecen tácticas diferenciadas según el estado del activo, apoyadas en normas para tomar decisiones basadas en valor dentro del marco ISO 55001:2024. Además, se consideran las responsabilidades del mantenimiento a lo largo del ciclo de vida de los transformadores según UNE EN 17485:2023. El índice de salud (IH) es útil como herramienta para valorar riesgos y apoyar la selección de acciones de mantenimiento diferenciadas.

Las tácticas de mantenimiento bajo un marco de riesgo sirven de apoyo al proceso de toma de decisiones referentes a las actividades de mantenimiento, que permita establecer la condición de salud de los activos en vista de mitigar los niveles de riesgo asociado (Llanes et al., 2022).

Desarrollo

El índice de salud como insumo potencial para generar estrategias de mantenimiento a los transformadores (MT) es construido a través de un proceso integral. Este proceso soporta la parte técnica referente al equipo y establece una perspectiva teórica aplicada bajo un marco normativo. Este marco se desarrolla de acuerdo con la construcción de los objetivos y fases de la investigación.

Objetivo Uno – Fundamentación Técnica.

Describir las técnicas fundamentales del mantenimiento predictivo eléctrico y el mantenimiento basado en condición según norma ISO 17359:2018, aplicado a transformadores de potencia, para poner de manifiesto su relación con la toma de decisiones sobre el principio de valor dentro de la gestión de activos, según norma ISO 55000:2024 y 55001:2024.

Desarrollo.

El mantenimiento basado en condición CBM es fundamental para la gestión de activos dentro del campo de monitoreo y diagnóstico que, con aplicación a múltiples equipos, tanto eléctricos como mecánicos, proporciona directrices bajo la observación y el análisis de parámetros como vibración, potencia, velocidad, temperatura y tribología, que corresponde a factores que caracterizan la condición y rendimiento de los activos (Quatrini et al., 2020).

Las técnicas de monitoreo con foco a los transformadores (MT) a efectos del presente trabajo de profundización, focaliza su atención en el aceite aislante, análisis de gases disueltos (DGA) y pruebas eléctricas, para construir el índice de salud (IH) a partir del análisis de variables que, comparadas con valores de referencia, identifiquen el estado de salud de los activos y la relación con su condición.

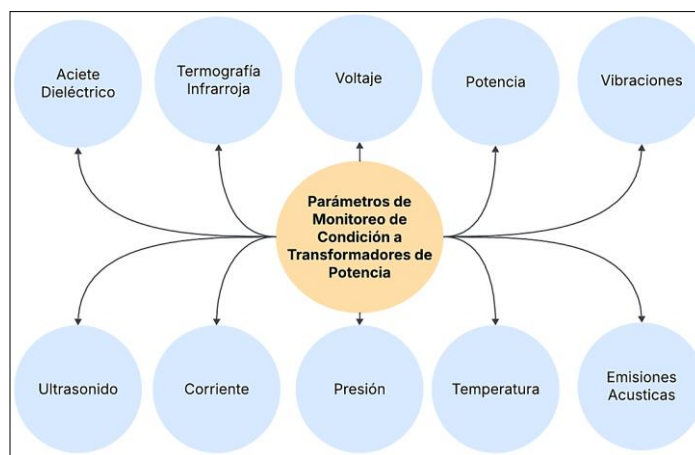
El transformador es un complejo equipo que tiene mucha información de los elementos internos que permite conocer el estado de salud. Esta información es incierta sin la aplicación de técnicas que evidencien la caracterización de cada componente y su relación con la condición.

Así pues, contar con técnicas de diagnóstico y conocer su fundamentación es útil a la hora de concatenar las variables operativas con el estado de salud de los activos (Blažević et al., 2023).

Los parámetros de monitoreo de condición a los transformadores de potencia incluyen una serie de factores a supervisar. Tal como se observa en la Ilustración 11, las variables que giran alrededor de un activo del tipo eléctrico son diversas y conjugan múltiples aspectos a diagnosticar para establecer el estado de salud de los equipos.

Ilustración 11

Parámetros de Monitoreo a Transformadores.



Nota. La ilustración destaca las variables más relevantes que afectan el rendimiento de un transformador de potencia, con el objetivo de entender cómo se comporta e interactúa con los parámetros normales de su funcionamiento. Adaptado de (Salamanca et al., 2021).

Los síntomas asociados a las fallas en transformadores de potencia son diversos y aquejan, entre otros, al sistema de aislamiento, tanto líquido como sólido. Es por ello por lo que el mantenimiento y las técnicas de diagnóstico se orientan al seguimiento de parámetros característicos del aceite aislante y pruebas eléctricas de aislamiento (Álvarez, 2007).

Métodos Fundamentales de Detección.

Los parámetros medibles en los transformadores (MT) son particulares de acuerdo con cada variable que interviene en la operación y modo de falla. Por ello, tal como se observa en la Tabla 2, se identifica por tipo de equipo ejemplos de falla y técnicas de detección asociadas. Para

efectos del presente trabajo de investigación, esto es la base para comprender qué técnicas son los pilares para determinar los factores de entrada y con ello el índice de salud (IH).

Tabla 2

Síntomas Asociados a Fallas de Transformadores ISO 17359:2018.

TIPO DE MAQUINARIA: TRANSFORMADOR DE POTENCIA		SÍNTOMAS O CAMBIO DE PARÁMETROS - TÉCNICAS DE DETECCIÓN														
EJEMPLO DE FALLAS	Corriente / Tensión / Carga	Visual	Condición del Aceite	Temperatura	Descarga Parcial	DGA	Ruido	Ultrasonido	Vibración	Factor de Potencia / Tangente del	Resistencia	DFR/PDC/RVM	FRA	Corriente de Excitación	Flujo de Reactancia de Fuga	Capacitancia de Bulje
Deterioro de Aislamiento	X		X	X	X	X		X		X	X	X	X	X		
Entrada de Humedad			X			X				X	X	X				
Fallo de Cambiador de Tomas Bajo Carga	X		X	X	X	X	X	X	X		X		X	X		
Fallo de Cambiador de Tomas Sin Carga	X		X	X	X	X	X	X	X		X		X	X		
Deterioro Calidad de Aceite			X			X				X		X				
Arco Eléctrico / Descarga Eléctrica		X	X		X	X	X	X		X						
Fallos de conexiones / Bornes				X	X	X	X	X		X	X					X
Sobrecalentamiento del Sistema de Refrigeración		X	X	X		X		X								
Nivel Bajo de Aceite		X	X	X		X	X	X								
Problema Sistema de Circulación de Aceite		X	X	X		X										
Distorsión del devanado								X				X	X		X	
Holgura de Devanado							X	X	X							
Holgura de Núcleo							X	X	X							
Fuga de Aceite		X														
Dalos Externos		X														
Falla Pasante / Caída de un Rayo										X			X			
Fallos de Suministro		X														

Nota. La tabla presenta ejemplos de manera practica de los síntomas o cambios en los parámetros de los transformadores y la relacionan con cada técnica de medición útil para cada una de las fallas. Tomado de Monitoreo y diagnóstico de condición de máquinas - Directrices generales, Anexo B, tabla B.1; ISO 17359 y (Chirinos, 2019).

Las técnicas de diagnóstico en transformadores son muy importantes para detectar problemas de diseño, fabricación, operación, problemas progresivos, así como deficiencias y desgaste en los aislamientos líquidos y sólidos. También sirven para documentar las asociadas

a condiciones del medioambiente como viento, sal, agua y polvo. Allí la importancia de estas técnicas con el fin de conocer el estado de los transformadores (Zorrilla Henao et al., 2020).

Método de Análisis de Gases Disueltos (DGA)

La detección de fallas a través del análisis de gases disueltos (DGA) en el aceite aislante ofrece ventajas de acuerdo con la forma en que se realiza de manera confiable y económica. Esto permite una identificación eficaz y rápida de cualquier daño en el transformador.

El análisis de gases disueltos basa su fundamento en el rompimiento de las moléculas de hidrocarburos, tanto del aceite como del papel, por la presencia de alguna falla de origen térmico o eléctrico. El objetivo es monitorear el transformador y tener un aviso anticipado de una falla. Además, busca indicar su naturaleza, localización y asegurar de que un equipo no presente ningún tipo de falla durante su ciclo de vida (Gallo, 2010).

Las fallas en los transformadores generan la producción de ciertos gases de manera lenta, rápida o con la dificultad de poder distinguir entre concentración de ellos, producto de su desempeño habitual, o comportamiento asociado a una falla. Por ello, el DGA es una eficaz herramienta diagnóstica, capaz de identificar, medir e interpretar el resultado del análisis de gases disueltos en el aceite aislante bajo un marco de analítica estadística y métodos de interpretación de fallas (IEEE C57.104, 2019).

Los principales gases útiles en la identificación de fallas, denominados por el estándar IEEE C57.104-2019 como (gases de falla), son: hidrógeno (H_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4), acetileno (C_2H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2). Al pasar el tiempo en operación bajo esfuerzos eléctricos y térmicos, se detecta la concentración de gases en magnitudes suficientes para tener relación con una falla o degradación (Días & María Soledad, 2015).

El propósito del DGA es el de detectar e identificar posibles fallas para garantizar la seguridad y confiabilidad de los equipos con base en el conocimiento del estado de salud de los

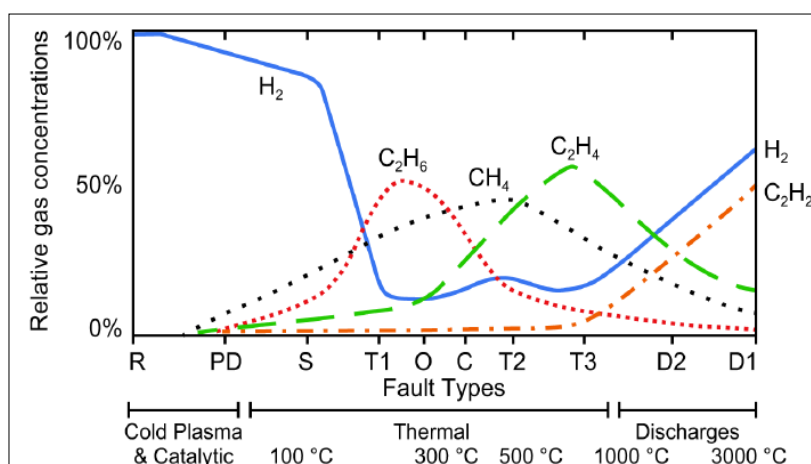
transformadores y la detección temprana de cualquier anomalía, de tal manera que se genere valor en términos de costos, mitigación de daños y fallas.

Formación de Gases y Tipos de Fallas Básicas según IEEE C57-104-2019

Una anomalía interna del sistema o una condición operativa fuera del rango de diseño de los transformadores frecuentemente resulta en la disipación de energía en parte al sistema de aislamiento y al líquido aislante (aceite dieléctrico), lo que resulta en la descomposición en gases distintivos²². Cada uno de estos gases asocia directamente la naturaleza de un proceso de falla y vincula el nivel de energía y la localización de la falla, tal como se observa en la Ilustración 12, donde se evidencia la concentración de los gases y las variedades de falla (CIGRE, 2019).

Ilustración 12

Concentración de Gases Disueltos Vs Temperatura.



Nota. La ilustración muestra el comportamiento de cada gas respecto a las fallas de origen térmico, así como también la proporción comparativa de concentraciones de gases disueltos en aceite mineral en función de la temperatura y estado: Plasma Frío²³, Térmico y Descargas. Tomado de (Araujo et al., 2024).

Las fallas en transformadores (MT) son de dos orígenes principales según su categoría. Una de origen eléctrico, referente al deterioro del sistema de aislamiento por variables eléctricas operativas que generan estrés al sistema. La otra es de origen térmico y tiene relación con el

²² Gases distintivos – Fluidos Gaseosos producto de la interacción del sistema de aislamiento líquido y sólido, con eventos térmicos al interior del transformador.

²³ Plasma Frío - estado de gas ionizado de baja temperatura.

aumento inusual de la temperatura en el sistema de aislamiento sólido y líquido, como se muestra en la Ilustración 13 (Nanfak et al., 2024).

Ilustración 13

Clasificación de Fallas según IEEE Std C57.104.

	Acrónimo	Falla
FALLAS BÁSICAS	PD	Descarga Parcial
	D1	Descarga de Baja Energía
	D2	Descarga de Alta Energía
	T1	Falla Térmico, $T < 300^{\circ}\text{C}$
	T2	Falla Térmica, $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$
	T3	Falla Térmico, $T > 700^{\circ}\text{C}$
OTRAS FALLAS	S	Gases dispersos, $T < 200^{\circ}\text{C}$
	Oh	Sobrecalentamiento, $T < 250^{\circ}\text{C}$ sin carbonización del papel
	do	Posible carbonización del papel
	T3_H	Fallo térmico, $T > 700^{\circ}\text{C}$ solo en aceite mineral
	R	Reacción catalítica
	DT	Mezcla de fallas térmicas y de descarga

Nota. La ilustración muestra la clasificación y codificación de seis fallas básicas y subtipos de fallas adicionales ambas de origen térmico e identificables a través de los resultados del análisis de gases disueltos (DGA). Adaptado de Guía IEEE para la interpretación de gases generados en transformadores sumergidos en aceite mineral, página 59 y 60; (IEEE C57.104, 2019).

Método TGCD Gas Combustible Total.

El total de gases combustibles, un concepto que ha prevalecido a través del estándar IEEE C57-104, define el parámetro esencial del análisis en función de la cantidad de gases combustibles disueltos (TGCD), además de contemplar el nivel individual de cada uno de ellos en función de los indicadores del estado de falla y las condiciones asociadas (Gallo, 2010).

Este método es una herramienta útil para diagnosticar de manera predictiva las fallas en un momento dado y poder tomar decisiones acertadas sin mayor trauma respecto a la condición de un transformador.

El cálculo de este parámetro se deriva de la Ecuación 2 (con las concentraciones de cada gas expresadas en ppm²⁴):

Ecuación 2

Total de gases Combustibles Disueltos (TGCD).

$$TGCD = CH_4 + C_2H_4 + C_2H_6 + C_2H_2 + H_2 + CO + CO_2$$

Nota. La ecuación establece el índice del total de gases combustibles disueltos en el aceite vistos como un valor de referencia que integre el total de gases. Entre ellos: hidrógeno (H₂), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), etano (C₂H₆), etileno (C₂H₄) y acetileno (C₂H₂). Estos gases, según la magnitud de su concentración, indican la existencia de fallas internas de naturaleza térmica o eléctrica. Adaptado de (Gutiérrez Chávez & Montes de Oca-Ramírez, 2021a).

La guía IEEE C57.104-2019 explica cómo entender los gases producidos en transformadores inmersos de aceite. La clasificación y las recomendaciones se basan en los niveles de gas que se obtienen de un análisis estadístico de varios resultados de DGA, especialmente en el percentil 90 y 95, y se deriva en los siguientes estados:

Estado 1. Bajo nivel de gases y ninguna indicación de gasificación. (DGA normal).

Estado 2. Niveles intermedios de gases y/o posible gasificación. (DGA posiblemente sospechoso). PD, T1, stray gases²⁵. Aumento frecuencia de muestreo, monitoreo en línea.

Estado 3. Alto nivel de gases y/o probable gasificación activa. (DGA probablemente sospechoso). Seguimiento y pruebas adicionales. Consultar a fabricante y a expertos.

La Tabla 3 expresa la concentración de gases en los transformadores según los niveles de gases disueltos, en función de la relación entre el oxígeno y nitrógeno bajo la relación (O_2 / N_2) ya sea de forma individual o como parte del análisis de THDG (Gutiérrez Chávez & Montes de Oca-Ramírez, 2021).

²⁴ PPM - Partes por millón, una unidad de medida para expresar concentraciones muy pequeñas de una sustancia en una mezcla.

²⁵ Stray Gases - generación inusual de gases en el aceite de un transformador, sin que haya una falla eléctrica o térmica aparente que la cause.

Tabla 3

Límites Claves de Concentración de Gases Disueltos en el Aceite (ppm).

Percentil 90th Concentraciones de gases en función de la relación O2/N2 y la edad en $\mu\text{L/L}$ (ppm)									Percentil 95th Concentraciones de gases en función de la relación O2/N2 y la edad en $\mu\text{L/L}$ (ppm)							
O2/N2≤0.2					O2/N2>0.2				O2/N2≤0.2				O2/N2>0.2			
Edad del Transformador									Edad del Transformador							
Gas	N/A	1–9	10–30	>30	N/A	1–9	10–30	>30	N/A	1–9	10–30	>30	N/A	1–9	10–30	>30
H2	80		75	100	40		40		200		200		90		90	
CH4	90	45	90	110	20		20		150	100	150	200	50		60	30
C2H6	90	30	90	150	15		15		175	70	175	250	40	30		40
C2H4	50	20	50	90	50	25	60		100	40	95	175	100	80		125
C2H2	1		1		2		2		2		2	4	7		7	
CO	900		900		500		500		1100		1100		600		600	
C02	9000	5000	10000		5000	3500	5500		12500	7000	14000		7000	5000		8000
Subtotal	1211	1071	1206	1351	627	602	637		1727	1512	1712	1929	887	867	922	892

Nota. La tabla muestra la clasificación de los límites permisibles de concentración de cada uno de los siete gases disueltos en el aceite de acuerdo con la relación (O₂/N₂) y el rango de edad del transformador. Tomado de Guía IEEE para la interpretación de gases generados en transformadores inmersos en aceite mineral, página 38; (IEEE C57.104, 2019).

Método (ADFQ) Análisis Dieléctrico y Fisicoquímico del Aceite Aislante.

El análisis dieléctrico y fisicoquímica del aceite aislante tiene como objetivo evaluar la calidad del fluido, así como detectar el envejecimiento del papel aislante, comprobar el contenido de humedad o la formación de lodos en el fondo. De acuerdo con el comportamiento del aceite aislante frente a diversas variables operativas, como por ejemplo la temperatura y el porcentaje de carga, es necesario conocer claramente las propiedades del aceite aislante (Zhang et al., 2024).

Las pruebas más importantes para analizar el aceite aislante y conocer su nivel de degradación, por efecto de factores eléctricos, térmicos y químicos, son propuestas por el ingeniero colombiano Ernesto Gallo en su libro Diagnóstico y Mantenimiento a Transformadores en Campo. A continuación, se describen estas pruebas, tal como se observa en la Ilustración 14 (Gallo, 2010).

Contenido de agua: Humedad disuelta en el aceite: reduce rigidez dieléctrica, induce procesos de oxidación.

Rigidez dieléctrica: Capacidad del aceite para soportar tensión sin fallar eléctricamente; es útil como primer indicio de la presencia de contaminantes.

Índice de acidez: Indica el grado de oxidación en el aceite aislante, relacionado con envejecimientos u oxidación de componentes metálicos.

Factor de potencia: Indica la eficiencia del aislamiento del aceite en términos de potencia en vatios, la cual muestra contaminantes solubles en el aceite distintos al agua.

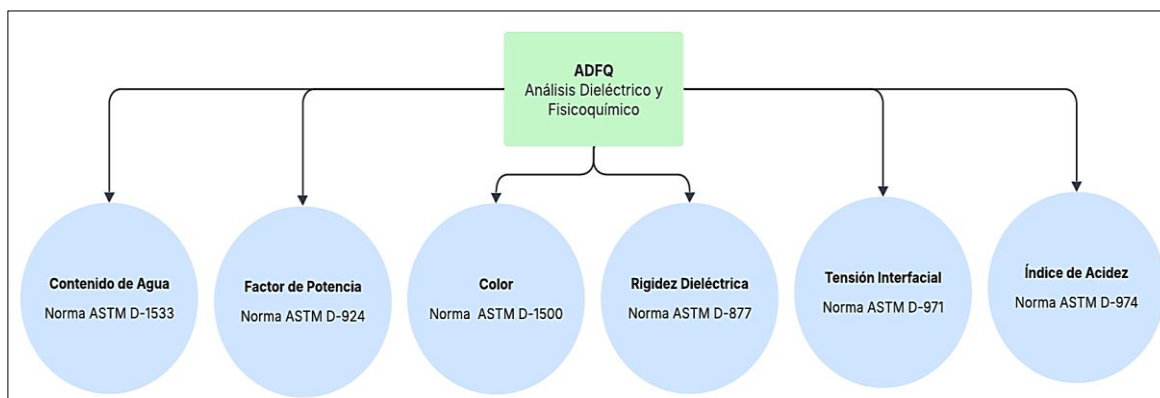
Contenido de furanos: Indica la degradación del paleal aislante interno a través de muestras del aceite para estimar la vida remanente del transformador.

Color: Clasifica el color del aceite de muestra de acuerdo con patrones (discos) ASTM²⁶ a través de la comparación.

Tensión interfacial: Indica la aparición de los primeros compuestos o contaminantes polares solubles, productos del proceso de oxidación; es decir, se detecta el inicio de este proceso y su avance antes de llegar a niveles de degradación críticos.

Ilustración 14

Pruebas ASTM relevantes aplicadas al aceite aislante.



*Nota. La ilustración muestra las pruebas de aceptación ASTM más importantes para el aceite aislante. Estas pruebas ayudan a entender las propiedades físicas y químicas del aceite, así como la norma que se debe seguir para cada una. Estas se combinan para definir el estado del sistema de aislamiento líquido. Adaptado del libro *Diagnóstico y Mantenimiento a Transformadores en Campo* (Gallo, 2010).*

²⁶ ASTM - Del español: Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales.

Termografía Infrarroja (IR).

La tecnología para la detección de defectos en la industria moderna ha ido en ascenso. Por esta razón, se invierte en equipamiento que ayude a identificar los hallazgos y minimizar los defectos de producción u operación. En tanto, la termografía es una técnica que transforma la radiación del rango infrarrojo en una imagen que representa la distribución térmica de la superficie de un objeto (Carlomagno & Cardone, 2010).

El método es de carácter no invasivo, permite determinar la condición de temperatura y generar un diagnóstico en tiempo real del estado de elementos del transformador, como por ejemplo de puntos calientes, conexiones, sobrecarga, entre otros. La detección de fallas puede ser en la etapa temprana con el objetivo de analizar cualitativa o cuantitativamente el estado de la estimulación térmica (Zorrilla Henao et al., 2020).

Resistencia de Aislamiento (Prueba Clásica).

La prueba de resistencia de aislamiento consiste en aplicar un voltaje DC²⁷ durante un periodo de tiempo determinado (usualmente diez minutos) al aislamiento bajo ensayo y medir la resistencia de aislamiento entre devanados y entre cada devanado y tierra; usualmente se mide en megohmios $M\Omega$ ²⁸, referidos a 20°C. Las lecturas de resistencia de aislamiento son registradas en tiempos específicos desde los 15 segundos hasta un tiempo total determinado para la prueba de 10 minutos; los resultados se grafican y, de acuerdo con la curva, se determina qué tan bueno es el estado del sistema de aislamiento (Gallo, 2010).

La prueba de resistencia de aislamiento detecta: la presencia excesiva de humedad, degradación avanzada del aceite que compromete todo el aislamiento y fallas en el aislamiento (aislamiento a tierra o bajo aislamiento entre devanados) (Hernández et al., 2024).

²⁷ DC – Direct Current, del español corriente directa.

²⁸ $M\Omega$ – Megahomios - Unidad derivada de resistencia eléctrica en el sistema internacional de unidades.

Diagnóstico de Aceite Aislante a Transformadores e Integración ISO 55000.

La relación entre el diagnóstico de transformadores (MT) para distinguir entre condiciones normales y anormales se basa en resultados de pruebas como, por ejemplo, DGA y ADFQ. Además, el marco de toma de decisiones como principio de valor, busca construir una percepción diferente en la organización de cómo se realizan las acciones de mantenimiento (Páez, s. f.).

Las actividades de mantenimiento en Servicios Asociados SAS – Confipetrol, están definidas con base en un plan establecido regularmente, sin tener en cuenta el estado real de los transformadores de acuerdo con información de los diagnósticos; los datos son esenciales para tomar decisiones.

Las decisiones deben ser dinámicas y construidas a partir de datos que proporciona la condición del equipo. Las actividades estratégicas que ofrece el marco de la norma ISO 55000:2024 están en correlación para gestionar el estado de los transformadores (MT) a lo largo de su ciclo de vida, a través de información evidente y real (Consultores, 2017).

Relación Operativa - Táctica a Transformadores e Integración ISO 55001.

El consorcio de Servicios Asociados SAS – Confipetrol a través del índice de salud (IH) realiza acciones de pronóstico para conocer el estado de los transformadores, según la cláusula 10.3 (acción predictiva). Esto genera la necesidad de toma decisiones sobre los activos, la condición, el rendimiento y gesta desde mantenimiento de acciones predictivas que deriven en labores de intervención, renovación y sustitución (Parra et al., 2024).

El requisito 8.1 (planificación y control operacional) pone de manifiesto que la organización debe planear, implementar y controlar los procesos para gestionar los activos a lo largo del ciclo de vida, así pues la guía, IEEE C57.104 proporciona los criterios técnicos para decidir las acciones operativas de acuerdo con el estado de la salud de los transformadores en tres pilares de condición, estado 1, estado 2 y estado 3 tal como se observa en la Ilustración 15; así como también establece frecuencias de monitoreo, y consultas complementarias, estos factores son pilares para la planificación y control operacional de los transformadores (MT).

El monitoreo, medición, análisis y evaluación según el requerimiento 9.1 de la ISO 55001 con enfoque a la condición de los transformadores (MT) conecta con parámetros como el análisis de gases disueltos (DGA) y el análisis fisicoquímico del aceite aislante, para tomar decisiones en la gestión de activos (Brauer, 2016).

El requerimiento 4.5 (toma de decisiones sobre la gestión de activos) se soporta bajo un marco técnico y objetivo como lo es la guía IEEE C57.104, para determinar el estado de los transformadores con base en decisiones acertadas que ayuden a los gestores de mantenimiento a prevenir fallas repentinas (Tamma et al., 2021).

Modelo a Nivel Conceptual de Flujo de Integración de Decisiones.

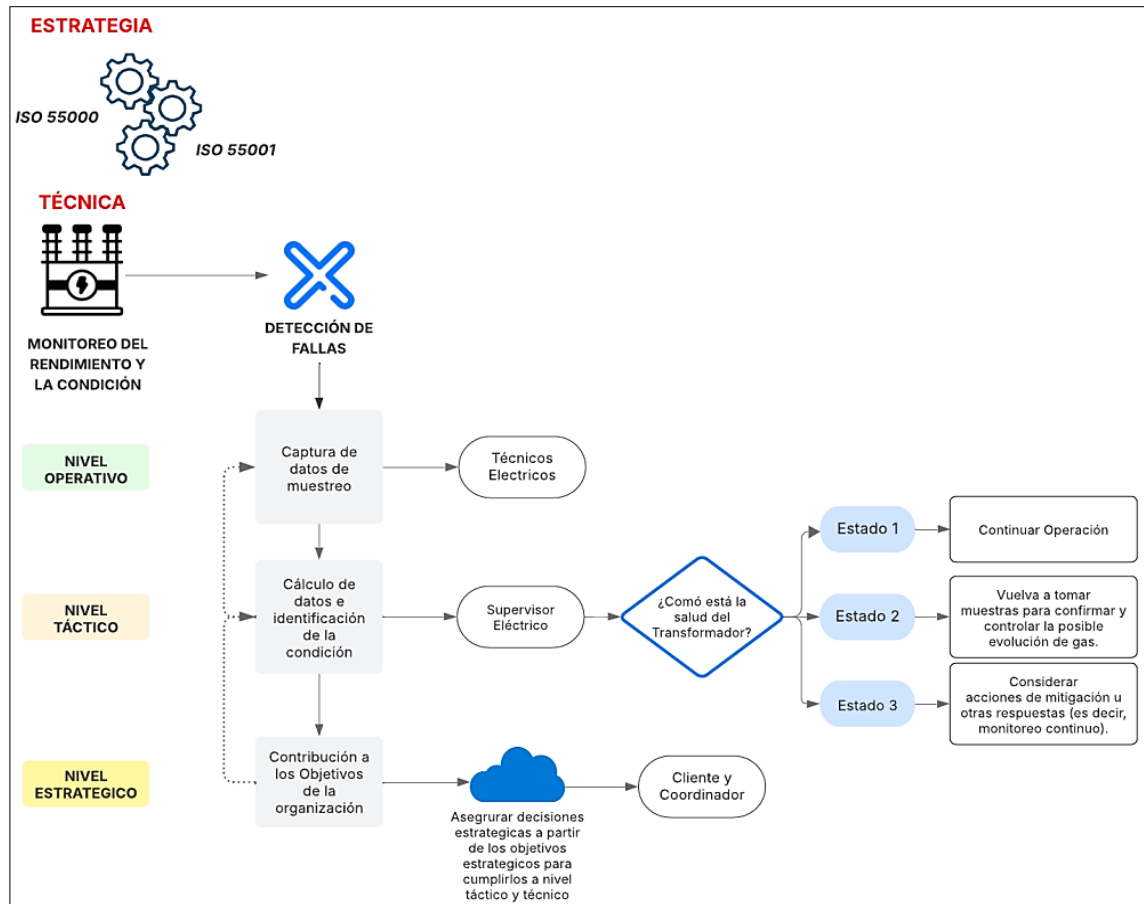
El marco conceptual de gestión de activos con base en decisiones destaca la importancia de conocer el estado de los transformadores (MT). Esto es posible al observar lo que pueda ocurrir en su interior a través de un elemento como el aceite aislante, que proporciona información integral sobre su condición (Fernando-Navas et al., 2012).

Las decisiones de mantenimiento, define un conjunto de actividades para mantener y preservar un activo a una condición operativa, y las acciones de cómo se opera y mantiene, influyen en su expectativa de vida y confiabilidad. En consecuencia, el conocer el estado de la condición como producto de una acción de monitoreo, es útil para gestionar adecuadamente los esfuerzos dirigidos a los transformadores (Aliani & Romero, 2014).

El modelo de la Ilustración 15 muestra el flujo de decisiones a nivel estratégico, táctico y operativo de la organización Servicios Asociados S.A.S. – Confipetrol. A partir del monitoreo basado en condición se destaca el análisis de gases disueltos (DGA) y la evaluación fisicoquímica del aceite como recursos y técnicas necesarias para recomendar decisiones de mantenimiento con base en la información de los diagnósticos (Teixeira et al., 2020).

Ilustración 15

Modelo Macro Conceptual de Flujo de Decisiones Estratégicas y Técnicas.



Nota. La ilustración detalla el rol del activo (transformador) como un actor clave en múltiples niveles dentro de la estructura organizativa. Asimismo, resalta cómo la interacción entre los procesos de diagnóstico y mantenimiento resalta la importancia de una gestión eficaz, así como el flujo de decisiones en los ámbitos estratégico, táctico y operativo, en relación con el estado de los transformadores (MT) y su alineación con los principios establecidos en los estándares de gestión de activos ISO 55000 y 55001. Elaboración propia, con base en página 27 de (IEEE C57.104, 2019).

La importancia del modelo según la Ilustración 15 vincula dos elementos cruciales a escala macro en la organización: uno, la relevancia de la relación en las decisiones congruentes de gestión de activos a nivel táctico y técnico, donde es esencial orientar las acciones a generar valor en aras de minimizar las pérdidas en la producción; y dos, destaca la relevancia de los datos como fuente de información para conocer el estado, desempeño y vida útil de los

transformadores (MT), como apoyo para minimizar la incertidumbre en el proceso de gestión positiva de los recursos de la organización (Carnaval, 2023).

La gestión de activos, bajo su principio de (valor) en la toma de decisiones, destaca un cambio cultural intangible en el planteamiento estratégico de las acciones de mantenimiento en Servicios Asociados SAS - Confipetrol. Esto ofrece una visión no tradicional respecto a lo que se hace hasta el año 2025 con un enfoque directo al contexto operativo de la organización.

Principio de Valor en la Gestión de Activos.

El principio de valor tiene, para efectos del objetivo uno, ver la capacidad de los activos desde un punto de vista técnico, que se refleja a través de la medición de parámetros y variables para cuantificar su capacidad y desempeño; sin embargo, la perspectiva a partir de las múltiples técnicas de diagnóstico permite una visión más amplia del verdadero valor de los activos. Con ello se requiere un enfoque dinámico en todas las fases del ciclo de vida y su interacción en cada etapa de ellas (Parra & Crespo, 2015).

Las actividades en la gestión de activos, entre ellas las de monitoreo, busca la generación de valor a través de los activos, con acciones de impacto sobre los equipos junto con la planificación, gestión del trabajo, información y las personas, como respaldo en la toma de decisiones de valor en todos los niveles de la organización (Woodhouse, 2019).

El diagnóstico de los equipos es una herramienta directiva a nivel organizacional que asiste en la administración de los activos. El propósito de las acciones de gestión es llegar a los objetivos organizacionales. Por consiguiente, la información que define un equipo es un motor de valor que resulta útil para el proceso de toma de decisiones sobre cómo guiar a los gestores de activos para que se enfoquen en actividades con mayor impacto en la organización (Almeida et al., 2022).

Objetivo Dos – Variables de Construcción.

Reconocer los factores de entrada relevantes con relación a los principales componentes, salud de activos y pruebas de diagnóstico según el estándar IEEE C.57-140 de 2017 y los métodos de detección del estándar ISO 14224:2016, en los transformadores de potencia, como base para la construcción de un modelo determinador del índice de salud de activos (Asset Health Index, AHI).

Desarrollo.

La construcción del índice de salud (IH) compila diversos factores de entrada (FE²⁹) que caracterizan variables operativas y del estado del transformador, producto de diversas técnicas como análisis de gases disueltos (DGA), rigidez dieléctrica, color, factor de potencia del aceite aislante, estado de los bornes, historial de carga, temperatura, furanos, corrosión del tanque, estado de conectores, entre muchos otros (Naderian et al., 2008).

Los factores de entrada para construir el índice de salud (IH) son múltiples, algunos representan más que otros las condiciones de degradación a corto o largo plazo y constituyen un camino hacia el final de la vida útil de los transformadores (MT). Por eso, conocer cómo se interconectan ciertos factores, es fundamental para definir el espíritu del índice de salud como marca registrada de la condición de cada activo (Prasojo et al., 2019).

Análisis de Modos y Efectos Falla (AMEF) – Traductor de los FE.

El análisis de modos y efectos de falla es un método que establece los medios para detectar fallas potenciales antes de que ocurran, con el propósito de erradicarlas o reducir los riesgos asociados. Esta herramienta tiene aplicación como medida de advertencia anticipada de posibles fallos, con el objetivo de prever las acciones requeridas para su eliminación (Huang et al., 2020).

²⁹ FE – Factores de entrada, considerados como pilares para la construcción y cálculo del índice de salud de los transformadores (MT).

El AMEF, por otro lado, es una técnica sistemática que utiliza conocimientos de ingeniería, confiabilidad y técnicas de desarrollo organizacional para optimizar el proceso, el producto o el servicio (Stamatis D.H., 2003).

El desarrollo del AMEF en este trabajo establece la identificación de funciones para aclarar la funcionalidad del ítem mantenible. Además, permite identificar las fallas funcionales (no funcional, parciales e intermitentes) con el propósito de modelar el modo y las causas de falla (Soltanali & Ramezani, 2023).

Los factores de entrada son diversos; por ello para jerarquizar los más relevantes y representativos de acuerdo con el contexto operativo donde se ubican los transformadores (MT), se utiliza el análisis de modos y efectos de falla (AMEF). Esta herramienta tiene aplicación en la presente investigación de manera sistemática para reconocer y evaluar los modos de fallas potenciales (Lourdes del Rocío Sánchez-Delgado et al., 2023).

Análisis de Modos y Efectos Falla (AMEF) – Límites de Análisis EN IEC 60812.

El objetivo de llevar a cabo un AMEF es respaldar decisiones que disminuyan la posibilidad de fallas y sus consecuencias, y de esa manera ayudar a optimizar los resultados, ya sea de forma directa o mediante otras evaluaciones.

Los límites del análisis a efectos del presente trabajo y el análisis AMEF define elementos que son prioritarios para todo el conjunto de sistemas en el transformador, en función de desarrollar el número de enlaces pertinentes; así pues, la investigación centra el análisis en los siguientes bloques funcionales: Parte activa (núcleo-devanado), enfriamiento (motor-ventilador) y aceite aislante, de acuerdo con el nivel taxonómico del estándar (Sivilla et al., 2023).

Modelo de Integración para Obtener los Factores de Entrada (FE).

La tabla B.4 del estándar ISO 14224:2016, que describe los métodos de detección y los modos de falla, se aplica a los ítems mantenibles mencionados anteriormente. Estos constituyen

el insumo de correlación para establecer cuáles factores de entrada son más importantes al construir el índice de salud, en relación con los síntomas que tienen relación a fallas en transformadores según la norma ISO 17359:2018.

La conexión entre el desarrollo del AMEF, los modos de falla según la norma ISO 14224 y los síntomas según ISO 17359 se combina para identificar los factores más cruciales que se consideran base para el cálculo del índice de salud (IH).

El análisis de modos y efectos de falla (AMEF) tiene aplicación a tres ítems mantenibles, como se ve en las Ilustraciones 16, 17 y 18. Para cada uno de ellos, según el método de detección, se definen los potenciales factores de entrada (FE) y los criterios de condición. La manera objetiva de este proceso es a través de una matriz de priorización, como se muestra en la (Tabla 4). Esto forma parte de la rigurosidad investigativa para crear el índice de salud (IH).

El núcleo es el componente de mayor volumen en el transformador, en condiciones normales de operación se encuentra aislado eléctricamente pero en condiciones de deterioro producen arcos entre laminas, incremento de corrientes circulantes y temperatura de operación excesiva (Carlos et al., 2015).

La pérdida por dispersión en el núcleo y los devanados del transformador convierte la energía en calor, el cual se transfiere al sistema de aislamiento. Además, el aceite también pierde su capacidad para disipar el calor. Por estas razones, el sistema de enfriamiento en un transformador es relevante para mantener la temperatura de operación lo suficientemente baja como para prevenir concentración de calor en su interior (Castellanos, s. f.).

La ilustración 16 presenta un análisis de modos y efectos de fallas (AMEF) de la parte activa (núcleo-devanado) de un transformador y su relación con los códigos de falla y los métodos de detección. Estos elementos ayudan a identificar los factores de entrada (FE).

Ilustración 16

AMEF a Ítem Mantenible Parte Activa (Núcleo - Devanado).

DESCRIPCIÓN ÍTEM MANTENIBLE	FALLA FUNCIONAL	COD. MF ISO 14224 FALLA IEEE C57.104	MODO FALLA	MECANISMO / CAUSA DE FALLA	METODO DE DETECCIÓN ISO 14224:2016 TABLA B.4
Parte Activa (Núcleo - Devanado)	Suministrar Potencia a más de 2 [MVA].	OHE Sobrecalentamiento	Alta Temperatura	Falla de espiras por calor excesivo, la corriente entregada a la carga, es mayor a la nominal	Pruebas funcionales Prueba de Impulso al devanado
		STD Deficiencia estructural	Deterioro de las Juntas		Monitoreo periódico de condiciones Termografía IR e Inspección Visual Medición de Variables Operativas
		AIR Lectura anormal en instrumento	Error en nivel de medida, falsa alarma, indicación errónea en instrumento.	Falla de aislamiento por descalibración de protecciones térmicas y de presión	
	Operar con magnitud de temperatura en devanado, superior a 110 [°C].	STD Deficiencia estructural	Deterioro de recubrimiento aislante (grietas, desgaste, fracturas)	Falla de aislamiento por degradación, efectos de envejecimiento, humedad, sobretensión, sobrecarga o diseño inadecuado	Pruebas funcionales Medición Resistencia de Aislamiento DGA Porcentaje de Carga
		FTF Falla en funcionamiento bajo demanda	Resistencia de Aislamiento baja.		
		OHE T1 Falla Térmico, T < 300°C	Temperatura interna demasiado alta.		
		OTH PD Descargas Parciales	Descargas Parciales	Falla del Papel Aislante por degradación química, productos de oxidación y pérdida de su resistencia mecánica	Pruebas funcionales Diagnostico Físico Químico del Aceite Aislante DGA
		LOO Baja producción	Baja Eficiencia		
		OHE Sobrecalentamiento	Alta Temperatura		
		PDE Desviación de parámetros	Alto contenido PPM de agua en el papel		
	Generar Vibraciones y ruidos en su interior, perceptibles desde su exterior.	VIB Vibración	Alta Vibración	Falla de partes mecánicas por deterioro de aislamiento entre laminas	Monitoreo periódico de condiciones Inspección Visual y Ultrasonido Propagado al Aire
		NOI Ruido	Alto Ruido		
	No hay conversión de energía eléctrica	PDE Desviación de parámetros	Alta Corriente	Falla de Aislamiento por corrientes de cortocircuito	Pruebas funcionales Medición Resistencia de Aislamiento

Nota. La ilustración muestra el desarrollo de un análisis de modos y efectos de falla AMEF al ítem mantenible (núcleo - devanado), y la integración de los códigos de modos de falla del estándar ISO 14224 y los síntomas de falla de la guía IEEE C57.104, para determinar los métodos de detección según estándar ISO 14224. Adaptado de página 190 y 191 (BSI EN ISO 14224, 2016).

El análisis de los modos y efectos de falla del sistema motor-ventilador mantenible se muestra en la Ilustración 17. Este elemento es esencial para la protección y seguridad del sistema de aislamiento sólido y líquido, ya que es el más importante para la durabilidad de un transformador. Su tarea es mantener el transformador en buen estado y cuidar los sistemas más vulnerables (Jiménez-Araya & Gómez-Ramírez, 2016).

Ilustración 17

AMEF a Ítem Mantenible (Sistema de Enfriamiento).

DESCRIPCIÓN ÍTEM MANTENIBLE	FALLA FUNCIONAL	COD. MF ISO 14224 FALLA IEEE C57.104	MODO FALLA	MECANISMO / CAUSA DE FALLA	METODO DE DETECCIÓN ISO 14224:2016 TABLA B.4
Sistema de Enfriamiento (Moto-Ventilador)	Generar flujo de aire hacia los disipadores menor a 8,11 m ³ /h.	OHE Sobrecalentamiento T1 Falla Térmico, T < 300°C	Alta Temperatura	Falla en rodamientos de los Ventiladores por sobrecalentamiento	Monitoreo periódico de condiciones Inspección Vibraciones y Termografía IR DGA
		LOO Baja producción	Baja Eficiencia del Flujo		
	Operar transformador con registro de temperatura en devanado, superior a 155 [°C].	OHE Sobrecalentamiento T1 Falla Térmico, T < 300°C	Alta Temperatura	Falla de Aislamiento del motor de los ventiladores por sobrecalentamiento	Pruebas funcionales Medición Resistencia de Aislamiento DGA
		STD Deficiencia estructural	Deterioro de recubrimiento aislante (grietas, desgaste, fracturas)	Falla de aislamiento por Degradación, efectos de envejecimiento, humedad, sobretensión, sobrecarga o diseño inadecuado	Pruebas funcionales Medición Resistencia de Aislamiento
	Identificar aspas y eje con ruidos y vibraciones.	STD Deficiencia estructural	Deterioro de recubrimiento aislante (grietas, desgaste, fracturas)	Falla de eje excéntrico por daños en los rodamientos	Monitoreo periódico de condiciones Inspección Vibraciones y Termografía IR
		VIB Vibración	Alta Vibración	Falla en aspas por desbalance mecánico	Monitoreo periódico de condiciones Inspección Vibraciones
		NOI Ruido	Alto Ruido	Falla en aspas por ajuste o ensamblado	Inspección Inspección visual de aspas
	No hay generación de flujo de aire.	FTF Falla en funcionamiento bajo demanda	No responde a señal de activación	Falla en el suministro eléctrico por falsos contactos	Bajo demanda Prueba funcional del componente
		AIR Lectura anormal en instrumento	Indicación errática del instrumento	Falla del control de activación por descalibración en las protecciones	Bajo demanda Prueba funcional del componente

Nota. La ilustración presenta un análisis de modos y efectos de falla (AMEF) para el sistema de enfriamiento. Incluye los códigos de modos de falla del estándar ISO 14224 y los síntomas de falla de la guía IEEE C57.104. Su objetivo es identificar los métodos de detección según lo indicado en el estándar ISO 14224. Adaptado de páginas 190 y 191, (BSI EN ISO 14224, 2016).

Los transformadores de las subestaciones precisan del aceite dieléctrico como medio aislante, refrigerante y para extinguir el arco. Este es vulnerable a los cambios que la operación implica y, por ende, al envejecimiento, lo cual ocurre en relación directa con la reducción progresiva de la rigidez dieléctrica hasta llegar a una posible ruptura del aislamiento debido a tensiones, temperatura y carga (Elele et al., 2022).

La Ilustración 18 pone de relieve las fallas incipientes que pueden llevar a la ruptura del aislamiento en términos del efecto del envejecimiento, como las descargas parciales o el

deterioro de las propiedades del aceite aislante. Esto tiene un impacto en lo que respecta a seguridad, transformación energética, infraestructura, personal y costos económicos (Alshehawy et al., 2021).

Ilustración 18

AMEF a Ítem Mantenible (Aceite Aislante).

DESCRIPCIÓN ÍTEM MANTENIBLE	FALLA FUNCIONAL	COD. MF ISO 14224 FALLA IEEE C57.104	MODO FALLA	MECANISMO / CAUSA DE FALLA	METODO DE DETECCIÓN ISO 14224:2016 TABLA B.4
Aceite Aislante	Aceite aislante con propiedad de Rigidez Dieléctrica Menor a 28 [kV].	OHE Sobrecalentamiento T1 Falla Térmico, T < 300°C	Alta Temperatura	Falla (Degradación) del fluido aislante por sobrecalentamiento	Pruebas funcionales Diagnostico Físico Químico del Aceite Aislante DGA
		OTH Perdida de Propiedades	Baja Rigidez Dieléctrica		
		PDE Desviación de parámetros	Sobrecarga (Corriente)		
	Índice de Calidad del Aceite Aislante Menor a 300.	OTH Perdida de Propiedades	Baja Índice de Calidad	Falla (Degradación) del Fluido aislante por Contaminación, humedad y productos de oxidación	Pruebas funcionales Diagnostico Físico Químico del Aceite Aislante DGA
		OHE Sobrecalentamiento T1 Falla Térmico, T < 300°C	Alta Temperatura		

Nota. La ilustración presenta el análisis de modos y efectos de falla (AMEF) del componente mantenible (Aceite Aislante). También incluye los códigos de modos de falla del estándar ISO 14224 y los síntomas de falla de la guía IEEE C57.104, con el objetivo de establecer los métodos de detección según el estándar ISO 14224. Adaptado de página 190 y 191, (BSI EN ISO 14224, 2016).

Engranaje AMEF – Factores de Entrada (FE).

La matriz de priorización resultante del análisis de los modos de falla y métodos de detección conforme al estándar ISO 14224 según la Tabla 4, contempla el impacto y la urgencia de cada una de las actividades de monitoreo en relación con las operaciones. Por lo tanto, se establecen niveles de prioridad de alto, medio y bajo para caracterizar los factores de entrada. En este contexto, las actividades en nivel ALTO se definen como factores de entrada para la construcción del Índice de Salud (IH).

Las categorías del impacto a la operación son: 1. (Muy bajo): casi ningún impacto a la operación, 2. (Bajo): impacto mínimo en la operación, 3. (Medio): puede reducir el rendimiento

del equipo, 4. (Alto): puede causar una interrupción significativa del servicio y 5. (Crítico): si no se hace, puede causar una falla total del sistema (Tavares, 2020).

Las categorías de la urgencia de monitoreo son: 1. (Muy baja): se puede posponer sin problemas, 2. (Baja): puede esperar al próximo ciclo de mantenimiento, 3. (Media): debe planificarse para las próximas semanas, 4. (Alta): debe hacerse en los próximos días y 5. (Inmediata): debe hacerse ahora mismo.

Tabla 4

Matriz de Priorización – Factores de Entrada (FE).

MATRIZ DE PRIORIZACIÓN - FACTORES DE ENTRADA					
Actividad	Tipo de Actividad	Impacto (1-5)	Urgencia (1-5)	Puntuación de Prioridad	Nivel de Prioridad
Prueba de Impulso al devanado	Pruebas funcionales	3	2	6	Baja
Termografía Infrarroja IR	Monitoreo periódico de condiciones	5	4	20	Alta
Medición Resistencia de Aislamiento	Pruebas funcionales	5	4	20	Alta
Diagnostico Físico Químico del Aceite Aislante (ADFQ)	Monitoreo periódico de condiciones	5	4	20	Alta
Análisis de Gases Disueltos (DGA)	Monitoreo periódico de condiciones	5	4	20	Alta
Ultrasonido Propagado al Aire	Monitoreo periódico de condiciones	5	2	10	Media
Inspección visual de aspas	Inspección	1	1	1	Baja
Prueba funcional del componente	Pruebas funcionales	1	1	1	Baja
Medición de Variables Operativas	Bajo demanda	3	1	3	Baja
Medición Porcentaje de Carga	Bajo demanda	5	4	20	Alta

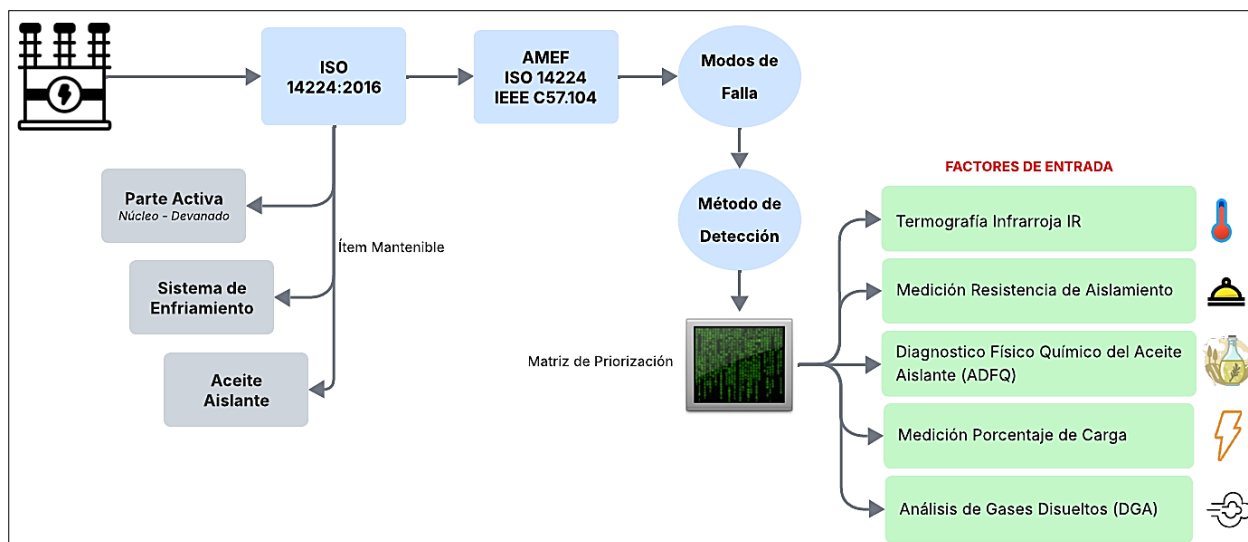
Nota. La tabla muestra la relación entre el impacto y la urgencia de las actividades de monitoreo y diagnóstico. Ambas tienen puntuación de 1 a 5 para determinar la prioridad a través de niveles (Alta, Media y Baja). Además, traduce el nivel de la prioridad alta de las actividades como los factores de entrada (FE) para calcular el índice de salud (IH). Elaboración propia con el apoyo y adaptación de (Tavares, 2020).

Modelo de Priorización – Factores de Entrada (FE).

Los factores de entrada tienen categorización en función del nivel de prioridad (ALTA), donde para cada actividad se establece una relación directa con una variable operativa que define el insumo para el cálculo del índice de salud. En consonancia con esto, para determinar los factores de entrada, se elabora un modelo de obtención tal como se observa en la Ilustración 19, que condensa el flujo de acciones hasta alcanzar los cinco factores de entrada, que constituyen los pilares fundamentales para la construcción del índice de salud (IH).

Ilustración 19

Modelo de Obtención – Factores de Entrada.



Nota. La ilustración muestra el proceso para obtener los factores de entrada (FE) según el análisis de modos y efectos de falla de los tres elementos que se pueden mantener, con base en los métodos de detección del estándar ISO 14224 y por el tamizaje a través de la matriz de priorización que toma las actividades de prueba y diagnóstico con nivel alto. Elaboración propia con apoyo de (Akbari, 2013).

Factores de Entrada (FE) - Base de Construcción.

Los métodos de diagnóstico y seguimiento que aplica a los transformadores de potencia centran su atención en un amplio espectro de efectos, entre ellos, los mecánicos, eléctricos, químicos, físicos y visuales. Esto posibilita el análisis del estado de los equipos y la información sobre el envejecimiento, para sugerir acciones de mejora en términos de mantenimiento y rendimiento (Gorgan & Notingher, 2010).

Los factores de entrada a través del índice de salud (IH) son una herramienta práctica para la práctica para la evaluación general del estado, que combina varias magnitudes de la condición en un solo valor para mostrar el estado general de un transformador (Guo & Guo, 2022).

El índice de salud forma parte de las herramientas de gestión del ciclo de vida de los activos. Permite tomar posición de los planes de mantenimiento respecto a su estado. Por ello,

el índice aborda la ponderación de varios factores como la degradación del papel y el análisis de gases disueltos (DGA) a través de factores de entrada que caractericen la condición y salud del transformador (Singh & Swanson, 2018).

Los factores de entrada como pilares en la construcción del índice de salud (IH) consideran la medición a través de técnicas como la termografía infrarroja, la medición de resistencia de aislamiento, el análisis físico químico y de gases al aceite aislante, como vaso comunicante para determinar el estado de salud de los transformadores a través de un índice, bajo diagnósticos prácticos y preciso con los recursos con los que cuenta la organización para tener mayor conexión con el contexto operativo del Consorcio Servicios Asociados SAS – Confipetrol.

Objetivo Tres – Datos y Captura, Factores de Entrada.

Ilustrar cómo los factores de entrada fisicoquímicos, análisis de gases disueltos (DGA) en el aceite aislante y pruebas eléctricas a los transformadores, permiten la construcción del índice de salud de activos, bajo un enfoque de factores de entrada y su relación con la captura de datos según el estándar ISO 14224:2016.

Desarrollo.

Los datos de acuerdo con una correcta estructura dentro de las organizaciones durante las fases del ciclo de vida de los activos son en muchos casos ineficientes y mal estructurados. Por ello, los procesos de gestión de la información de los activos son un proceso metódico que tiene como beneficio determinar el rendimiento óptimo de los activos y tomar decisiones certeras sobre la gestión de los equipos (English et al., 2022).

La norma ISO 14224:2016 define un marco de datos estándar para la recopilación e intercambio de información sobre el mantenimiento y la confiabilidad de los equipos, lo que es útil para documentar situaciones de fallos en las instalaciones. Por ello, es crucial contar con información específica y apropiada acerca de elementos como diagnósticos, inspecciones o datos de falla (por ejemplo, en los transformadores), ya que esto permite entender mejor la condición del equipo y tomar decisiones adecuadas sobre el mantenimiento (Ciliberti et al., 2019).

La condición de los activos descrita a través de información adecuada y diagnósticos facilita el desarrollo y comprensión del conocimiento sobre el estado de los equipos, además de mejorar las prácticas de salud de los activos. Los datos del rendimiento de los equipos permiten unificar un lenguaje común dentro de la organización bajo un marco de información clara. Sin embargo, los datos como insumo puede que tengan ruido o errores que, con ayuda de una estructuración adecuada y parámetros medibles, la subjetividad e incertidumbre se verán apaciguadas (Zhu et al., 2024).

Los factores de entrada (FE), para efectos del presente trabajo, se traducen como los parámetros medibles que ayudan en su papel de insumo a estructurar la condición de los

transformadores (MT) a través de técnicas de diagnóstico. Los datos resultados tienen una configuración en cuanto a estructura, así como a información de equipos, mantenimiento y fallas, de acuerdo con los lineamientos de la norma ISO 14224:2016.

Integración Entre los Factores de Entrada (FE) y la norma ISO 14224.

La norma ISO 14224:2016 proporciona información de relevancia sobre cómo tratar con claridad la información sobre los equipos para la toma de decisiones. Incluye orientación específica sobre conceptos de recopilación de datos y cómo registrar y categorizar las causas de las fallas, bajo un marco de tres categorías principales. Esto se observa en la Ilustración 20, donde se pone de manifiesto el espíritu de la norma (Selvik & Bellamy, 2020).

Ilustración 20

Categorías de Recolección de Datos según ISO 14224:2016.



Nota. La ilustración muestra los tres pilares de recolección de datos para el uso de diferentes metodologías de análisis, en este caso con énfasis en los factores de entrada (FE), estos como insumo base de la construcción del cálculo del índice de salud (IH). Adaptado de (Lee et al., 2023).

Los factores de entrada conjugan los parámetros para establecer la relación con los atributos principales de la norma ISO 14224. En primer lugar, la información de los equipos se centra en su codificación taxonómica, identificación y en sus atributos, como la temperatura, el aislamiento, el porcentaje de carga y las condiciones del aceite aislante. El segundo componente está constituido por los datos de mantenimiento, que se respaldan conforme a cada prueba, tipos de intervenciones y sus respectivas calificaciones según la norma. El tercer componente incluye

los datos de fallo y su categorización, ya sea si está en una etapa temprana o avanzada, causas o consecuencias (Díaz, 2022).

La captura de datos gira alrededor de las categorías de recolección según el estándar ISO 14224. Por lo tanto, es clave compilar la información más esencial para cada uno de los factores de entrada (FE). Esto con el objeto de analizar cada factor y su tipo de influencia en el rendimiento de los transformadores, y conectar con el índice de salud de los activos, bajo un enfoque organizado y completo, centrado en tomar decisiones con base en datos confiables (Urruty, 2025).

Captura Datos – Factor Termografía Infrarroja (IR).

La termografía infrarroja es una técnica no invasiva que permite traducir la radiación de los cuerpos en una imagen visible a través de un detector que integra la información de entrada. Esto permite establecer una magnitud de temperatura en una imagen radiométrica. Al no ser destructiva e intrusiva, permite una aplicación práctica a la luz de los requerimientos de la industria (Ganem Karlen, 2018).

Captura Datos de Equipos, Falla y Mantenimiento.

Los datos del equipo no solo indican las características de los transformadores, sino que también muestran la información sobre la temperatura a la que trabajan. Esto incluye las temperaturas de funcionamiento que muestran cómo trabaja el transformador, desde el punto más caliente hasta el punto más alto del devanado. También se incluye la temperatura del bobinado según la carga eléctrica y la temperatura del aceite mientras está en funcionamiento (Shanghai Co., 2024).

Las fallas tienen relación con la velocidad de desgaste de los componentes, el deterioro de los materiales aislantes y las malas conexiones. Estos aspectos son de relevancia en la información sobre fallos para el factor de temperatura en los transformadores (MT). Así como también el tipo de fallo, la fecha de mantenimiento y de fallo, el impacto de ese fallo y la categoría de mantenimiento según lo que indica la técnica de diagnóstico (Uyaguari Castillo et al., 2025).

La calificación de las fallas y la recomendación en virtud de ellas tiene registro de acuerdo con el estándar ANSI NETA ATS. Esta tabla, sugiere acciones recomendadas de acuerdo con el valor de temperatura a medir en el transformador, tal como se observa en la Tabla 5 del presente documento.

Tabla 5

Acciones con Base en Temperatura ANSI NETA ATS.

Sugerir Acciones Basadas en el Aumento de Temperatura		
Diferencia de temperatura (AT) basada en comparaciones entre componentes similares bajo cargas similares.	Diferencia de temperatura (AT) basada en comparaciones entre la temperatura del componente y la temperatura del aire ambiente.	Acciones recomendadas
1°C - 3°C	1°C - 10°C	Deficiencia Posible: requiere investigaciones.
4°C - 15°C	11°C - 20°C	Indica una Deficiencia Probable: reparar cuando sea posible.
---	21°C - 40°C	Monitorear hasta que se puedan realizar las medidas correctivas.
>15°C	>40°C	Discrepancia Mayor: reparar de inmediato.

Nota. La tabla muestra las acciones sugeridas de acuerdo con los niveles de clasificación de los deltas de temperatura respecto al elemento similar o al ambiente, junto con las recomendaciones para cada una de las categorías de intervalos. Tomado de página 138, tabla 100.18, (NETA, 2021).

Captura Datos – Resistencia de Aislamiento.

La prueba de aislamiento es muy útil para entender de manera confiable y práctica el estado de los devanados a tierra y entre ellos. Las diferencias en la resistencia de aislamiento pueden deberse a varios factores, como el diseño, la temperatura y la humedad. Esto ayuda a reconocer el daño en las propiedades eléctricas y mecánicas del papel aislante (Jiménez-Araya & Gómez-Ramírez, 2016).

Captura Datos de Equipos, Falla y Mantenimiento.

La captura de información en relación con el factor de entrada de resistencia de aislamiento exige datos como la temperatura ambiente, la humedad relativa, la altitud, así como la temperatura del devanado y del aceite, con el fin de determinar un valor de resistencia del sistema de aislamiento. Un valor de resistencia de aislamiento nulo o muy bajo señala un devanado conectado a tierra o un cortocircuito entre los mismos (Bonalde, 2024).

La calificación de las fallas y la recomendación en virtud de ellas está de acuerdo con la tabla 100.5 que propone el estándar ANSI NETA ATS. Esta tabla, sugiere los valores mínimos recomendados de acuerdo con el valor de resistencia de aislamiento registrado en el transformador, tal como se observa en la Tabla 6 del presente documento.

Tabla 6

Pruebas de Aceptación – Resistencia de Aislamiento.

Resistencia de Aislamiento del Transformador			
Pruebas de Aceptación			
Bobina de Transformador Tipo de Clasificación en Voltios	Test mínimo Voltaje DC	Mínimo Recomendado	
		Resistencia de Aislamiento en Megaohmios Inmerso de Líquido	Seco
0-600	1000	100	500
601 - 5000	2500	1000	5000
Más de 5000	5000	5000	25000

Nota. La tabla presenta los valores de aceptación de resistencia de aislamiento en megohmios para transformadores nuevos, tanto los que están en aceite dieléctrico como los secos, según los niveles de tensión en los devanados y del voltaje mínimo que se requiere para cada prueba de diagnóstico. Tomado de (Bonalde, 2024).

Los transformadores en servicio tienen otro criterio; según la guía para mantenimiento de transformadores de CIGRE referencia 445, sugiere que la resistencia medida a 20 °C debe ser mayor a 500 MΩ para los de tensión de hasta 69 kV, mientras que el límite admisible es de 1 GΩ para los de tensiones superiores (Rajote C et al., 2011).

Captura Datos – Análisis Dieléctrico y Físico Químico del Aceite Aislante.

El transformador, durante su ciclo de vida, interactúa con una extensa variedad de factores internos y externos que, a la larga, disminuye su confiabilidad y lo hace envejecer. Esto tiene un impacto significativo en el sistema de aislamiento sólido y líquido. Por esta razón, el análisis dieléctrico y fisicoquímico del aceite aislante es útil para evaluar, diagnosticar y sugerir acciones de mantenimiento de acuerdo con las condiciones típicas del equipo (Gallo, 2010).

Captura Datos de Equipos, Falla y Mantenimiento.

La captura de datos sobre el factor de entrada del análisis dieléctrico y fisicoquímico del aceite aislante (ADFQ) tiene como objetivo destacar la caracterización del sistema dieléctrico líquido y su relevancia como refrigerante y aislante dentro del transformador. Un parámetro relevante que se considera es el valor de la rigidez dieléctrica, el cual es crucial para proteger al equipo contra potenciales cortocircuitos y sobrecargas (Quitiaquez et al., 2019).

La evaluación de las pruebas y los criterios de aceptación correspondientes están alineados con lo establecido en la tabla 100.4.1, según lo indica el estándar ANSI NETA ATS. En la Tabla 7 de este documento se señalan los datos a registrar, los cuales tienen una repercusión considerable en la operatividad de un sistema complejo, tal como ocurre con el transformador.

Tabla 7

Límites de Aceptación de Aceite Aislante – Métodos ASTM.

Límites Sugeridos Para Aceite Aislante Aceite Mineral				
Prueba	ASTM Método	Valores aceptables		
		69 kV y Menos	Por encima de 69 kV Por debajo de 230 kV	230 kV y Por encima
Ruptura Dieléctrica, kV mínimo	D877	26	26	26
Ruptura Dieléctrica, kV mínimo a 1 mm (0,04 pulgada) de espacio	D 1816	23	28	30
Ruptura Dieléctrica, kV mínimo a 2 mm (0,08 pulgada) de espacio	D 1816	40	47	50
Tensión Interfacial nM/m mínimo	D 971 o D 2285	25	30	32
Número de Neutralización, mg KOH/g máximo	D 974	0,2	0,15	0.10
Contenido de Agua, ppm máximo a 60°C	D 1533	35	25	20
Factor de Potencia a 25° C, %	D 924	0.5	0.5	0.5
Factor de Potencia a 100° C,	D 924	5.0	5.0	5.0
Color	D 1500	3.5	3.5	3.5
Condición Visual	D 1524	Brillante, claro y libre de partículas	Brillante, claro y libre de partículas	Brillante, claro y libre de partículas
Gravedad Específica (Densidad Relativa) @15°C Máximo	D 1298	0,91	0,91	0,91

Nota. La tabla muestra todas las pruebas ASTM con aplicación a los transformadores y los valores aceptables del aceite aislante según el nivel de tensión de los equipos. Esta información es útil para las pruebas de aceptación, ya que ayuda a verificar la calidad del aceite en equipos eléctricos. Tomado de página 216, tabla 100.4.1; (NETA, 2021).

Captura Datos – Análisis de Gases Disueltos (DGA).

El DGA es una técnica que permite identificar los diversos tipos de fallos que pueden ocurrir en los transformadores de potencia. Con fundamento en los fenómenos eléctricos y térmicos que afectan el sistema de aislamiento, varía según la concentración de cada gas en particular. Los tipos y las concentraciones de gases que se generan son importantes, ya que el proceso de envejecimiento normal produce volúmenes mínimos de gases, en comparación con condiciones iniciales de fallos reportados que generan cantidades significativas (Crespo & Rodríguez, 2015).

El análisis de gases disueltos (DGA) proporciona resultados cuantitativos. En la Tabla 3 de este documento (Límites Claves de Concentración de Gases Disueltos en el Aceite), se presenta la aceptación según la antigüedad de cada transformador, considerando su nivel de tensión, así como la composición de los gases generados como subproductos. Se puede emplear para distinguir entre diferentes clases de fallas (Ali et al., 2023).

Captura Datos – Capacidad de Carga.

La demanda en el sector eléctrico en las industrias modernas requiere de incrementar las cargas al operar los transformadores y elevar los equipos más allá de su capacidad nominal para responder a un mercado cada día más exigente. Esto implica un exceso respecto al límite de la temperatura nominal de funcionamiento, lo que complica el intercambio térmico con el entorno, eleva la temperatura interna y favorece el deterioro del sistema aislante (Orejuela, 2021).

La capacidad de carga de los transformadores está definida con base en el tipo de refrigeración (forzada, por aire o agua, o auto refrigerada) y la temperatura. La reducción de carga se establece por cada grado de elevación en la temperatura y el incremento de carga por cada grado de disminución de temperatura (Rodríguez & Orejuela, 2013).

Captura de Datos en Función de los Factores de Entrada (FE).

Los transformadores (MT) en el sector Oil & Gas que administra el Consorcio Servicios Asociados SAS - Confipetrol tienen un registro de identificación (ID³⁰) para ser ubicados de acuerdo con requerimientos de consulta y caracterización, esto permite visualizar dentro del (CMMS³¹) el historial de avisos, ordenes de mantenimiento y la información referente a la individualización de cada activo.

La estructura taxonómica tiene como plataforma de trabajo para el año 2025 la caracterización de los transformadores operativos en campo, de acuerdo con información de características técnicas y un historial de acciones de mantenimiento que indica las novedades para cada activo. Sin embargo, la información diagnóstica que se ingresa es espuria y está pobremente estructurada para su comprensión y tratamiento.

La integración de técnicas de mantenimiento predictivo y seguimiento de la condición en el contexto de la norma ISO 14224:2016 ayuda a las organizaciones a convertir datos en bruto en información estructurada y con alta calidad. Las compañías tienen la posibilidad de llevar a cabo análisis más detallados de la causa raíz, optimizar sus tácticas de mantenimiento y aumentar notablemente la fiabilidad y disponibilidad de sus activos. Esto se logra al documentar no solamente el fallo, sino también cómo se identificó la avería temprana y en qué condiciones operativas ocurrió (Campos-López et al., 2019).

La Ilustración 21 presenta el desarrollo de un modelo de plantilla de capturan de datos, siguiendo el estándar ISO 14224. Incluye los aspectos más relevantes sobre cada uno de los factores de entrada (FE) y las características que se deben recopilar para cada prueba de diagnóstico, en miras de establecer el valor de índice de salud (IH) de cada equipo.

³⁰ ID - Suele referirse a identidad, identificación (el proceso de identificar) o un identificador, en este caso hace referencia al código de identificación de cada transformador (MT)

³¹ CMMS - son las siglas de Computerized Maintenance Management System (Sistema de Gestión de Mantenimiento Asistido por Computadora)

Ilustración 21

Plantilla Captura de Datos – Factores de Entrada.

 PLANTILLA CAPTURA DE DATOS - FACTORES DE ENTRADA (FE) DATOS DEL ACTIVO (ISO 14224:2016)																
Ubicación Exacta		Campo Mangos														
Código Interno/Etiqueta		6043593														
Datos de Mantenimiento (ISO 14224).																
Fabricante	ABB															
Modelo	1LCB															
Serie	165658															
Año de Fabricación	2003															
Potencia Nominal (kVA)	100															
Tensión (kV)	0,480 / 4160															
Conexión (Y/Δ)	Delta															
		Refrigeración (ONAN/ONAF/ODAF)				ONAN		Crítico (Sí/No)		SI						
		Tipo de Aceite				Mineral		Estado Operativo (En servicio/Reserva)		En Servicio						
		Fecha Puesta en Servicio				2003		Edad de Transformador (Años)		22						
Análisis de Gases Disueltos (DGA).																
Fecha Muestra	Relación O ₂ /N ₂ O ₂ /N ₂ <=0,2 O ₂ /N ₂ >=0,2	Edad (Años)			Gases Disueltos								Tasa (ppm/mes)	Estado DGA		
		1 a 9	10 a 30	>30	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	TDCG		Est. 1	Est. 2	Est. 3
25/05/2025	0,1		22		18,6	30,6	11,6	18,8	<0,3	1323,1	>17985	1403	-		X	
5/10/2025	0,1		22		19,5	32,5	12,1	22,9	<0,3	1352	>17985	1439	7,2		X	
Aceite Aislante (Análisis fisicoquímico/dieléctrico).																
Fecha Muestra	Rigidez Dieléctrica [kV]	Índice de Acidez (mgKOH/g)	Densidad Relativa (adimensional)	Contenido de Agua [PPM]	Color ASTM	Tensión Interfacial [Nm/m]										
25/05/2025	56	<0,02	0,8912	6	<0,5	31,2										
5/10/2025	53	<0,02	0,8924	8	<0,5	30,8										
Termografía Infrarroja IR.																
Fecha de Monitoreo	Temp. Ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]	Temp. Conexiones Baja Tensión [°C]	Temp. Conexiones Media Tensión [°C]	Temp. Cuerpo [°C]	Temp. Disipadores [°C]										
25/05/2025	29,4	54,5	38,5	36,6	89,1	93,4										
5/10/2025	30,5	56,8	40,5	34,5	91,3	92,1										
Pruebas Eléctricas de Aislamiento.																
Fecha de Monitoreo	Alta Tensión Vs Tierra (MΩ)	Baja Tensión Vs Tierra (MΩ)	Alta Tensión Vs Baja Tensión (MΩ)	IP Índice de polarización	Criterio IP											
25/05/2025	851	722	1510	1,3	Aceptable											
5/10/2025	845	709	1501	1,25	Aceptable											
Datos de Mantenimiento (ISO 14224).																
Fecha Mantenimientos	Categoría de Mantenimiento	Actividad/Clase	Inicio-Fin	H-H/Costos	Impacto de la Operación											
25/05/2025	Mantenimiento basado en condiciones Preventivo	Inspección	25/05/2025 - 25/05/2025	4,0 / \$1.250.000	Cero											
5/10/2025	Pruebas e Inspección Preventivo	Inspección	5/10/2025 - 5/10/2025	2,0 / 750.000	Cero											
Datos de Falla (ISO 14224).																
Fecha de Fallas	Modo de Falla	Mecanismo de Falla	Causa de Falla	Consec. (Seg./Opera./Amb.)	Método Detección											
25/05/2025	Alta Temperatura OHE	Falla Eléctrica General	Causas relacionadas a la operación/mantenimiento. (Desgaste esperado)	Operación	Monitoreo periódico de condiciones											
Calidad y Trazabilidad del Dato (ISO 14224).																
Criterio	Integridad (campos completos / sin vacíos críticos)	Exactitud (valores plausibles, unidades correctas)	Consistencia (formato taxonómico, codificación homogénea)	Temporalidad (fechas y frecuencias según plan CBM)	Trazabilidad (fuente, adjuntos, responsable)	Repetibilidad (método/condiciones estables)										
SI	X	X	X	X	X	X										
NO																

Nota. La Ilustración presenta el formato para capturar datos que combina los aspectos importantes de cada técnica de diagnóstico de los factores de entrada (FE) mencionados antes, así como las variables operacionales que se pueden medir de cada uno. Elaboración propia con base en las recomendaciones del estándar ISO 14224, página 43, capítulo 9.4, 9.5 y 9.6 (Datos recomendados para equipos, fallas y mantenimiento).

La captura, intercambio y análisis de datos de confiabilidad y mantenimiento bajo el marco de la ISO 14224 pone de manifiesto la necesidad de aclarar cuidadosamente los tipos de datos como insumo para la mejora de la estandarización del lenguaje dentro de la organización. Además, describe los parámetros para obtener datos útiles en equipos, fallas y mantenimiento (Selvik & Bellamy, 2020).

Los factores de entrada (FE), además de configurar las variables de pruebas de cada diagnóstico, debe mostrar los datos de tal manera que se tenga claridad de lo que representan. Es por ello por lo que una estructura adecuada de captura de la información es vital para facilitar la interpretación en vista de una comunicación homogénea y acertada dentro de la organización. Esto potencia el entendimiento y la toma de decisiones bajo un marco de comprensión para todos los actores involucrados y para el presente documento, aclara los componentes de cada factor de entrada en vista de la construcción del índice de salud (IH) (Montané-García et al., 2021).

Objetivo Cuatro – Modelo (IH), Puntajes, Pesos y Cálculo.

Analizar el modelo de evaluación bajo un enfoque de factores de condición, para calcular el índice de salud de activos (Index Health, IH) de los transformadores, a partir de datos de factores de entrada fisicoquímicos, análisis de gases disueltos (DGA) en el aceite aislante y pruebas eléctricas.

Desarrollo.

El índice de salud (IH) sintetiza en un único valor (de 0 a 100; donde cero representa la peor condición y cien la mejor posible) la condición del transformador, a través de datos producto de las propiedades del aceite, el análisis de gases disueltos (DGA) y las pruebas eléctricas. Se asigna puntajes y pesos a cada factor para conseguir un indicador que se pueda comparar a lo largo del tiempo. Esto contribuye a la elaboración de un índice global que da prioridad a las decisiones tácticas relacionadas con el mantenimiento y la inversión (Jahromi et al., 2009).

Cálculo Índice de Salud – Formula General.

El método de cálculo de índice de salud (IH) propuesto tiene base en la suma de puntajes ponderados según los factores de entrada mencionados con antelación. Este cálculo se apoya en distintos estándares de calificación, recomendaciones de fabricantes y desarrollo de varios autores de acuerdo con la Ecuación 3, en la que tiene en cuenta todos los parámetros y factores producto del estado de la condición.

Ecuación 3

Fórmula para cálculo del Índice de Salud (IH).

$$HI = \frac{\sum_{j=1}^n K_j * HIF_j}{\sum_{j=1}^n 4K_j} * 100\%$$

Donde:

- *HIF_j*, Factor del índice de salud de la prueba j, esta entre (0 y 4).
- *K_j*, Factor de peso asignado a la prueba j, que va de (1 a 10).
- *n*, Número máximo de pruebas utilizadas.

Nota. La ecuación permite el cálculo del HI como la suma de las multiplicaciones entre el peso de cada factor de entrada (K_j) y el factor del índice de salud en cada parámetro (HIF), dividido por la suma de las multiplicaciones entre la constante cuatro y los pesos de cada factor de entrada. Tomado de (Naderian et al., 2008).

Los valores del factor de índice de salud (HIF), de acuerdo con cada prueba de diagnóstico y factor de entrada se establece en la Tabla 8 de la siguiente manera:

Tabla 8

Valores del Factor de Índice de Salud (HIF).

VALORES DEL FACTOR DEL ÍNDICE DE SALUDO HIF.	
HIF	Condición
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Pobre
0	Muy pobre

Nota. La tabla muestra detalladamente el rango del factor de índice de salud (HIF) correspondiente a cada prueba específica en función de los diversos factores de entrada considerados en el estudio. Este valor se encuentra en un rango que va desde cero hasta cuatro, en el cual cero representa una calidad muy deficiente y cuatro una calidad excelente. Tomado de (Castro-Meneses et al., 2022b).

Factor de Peso (K) y Modos de Falla.

El factor de peso (k) es un valor con asignación en el rango de 1 a 10. Esto en virtud de cada una de las pruebas y la relación con cada modo de falla y el impacto que pueden llegar a tener en el estado del transformador, tal como se observa en la Tabla 9.

Tabla 9

Pesos del Factor (K).

FACTOR DE PESO (k) POR CADA FACTOR DE ENTRADA		
FACTOR DE ENTRADA	MODO DE FALLO	PESO DEL FACTOR K _j
Termografía Infrarroja IR	Puntos calientes internos / externos	10
	Alta Temperatura	
	Conexiones deficientes	
Resistencia de Aislamiento	Degradación del aislamiento externo	6
	Obstrucción en Disipadores	
	Aislamiento entre devanados	
	Excesiva Humedad	
Análisis Dieléctrico y Físico químico ADFQ	Pérdida de conductividad, mal contacto e	6
	Degradación del aislamiento líquido /sólido	
	Aislamiento Contaminado	
Análisis de Gases Disueltos DGA	Degradación del papel	6
	Degradación del aislamiento	
	Corona (Descargas parciales)	
Carga	Arco Interno	10
	Sobrecarga	
		6

Nota. La tabla muestra la ponderación que se asigna a cada factor de peso K_j , de acuerdo con el impacto que puede tener los modos de falla de cada factor de entrada en la operación del transformador. Elaboración propia con adaptación de An Approach to Power Transformer, página 27 (Jahromi et al., 2009).

Factor de Índice de Salud (HIF) – Resistencia de Aislamiento.

La prueba de resistencia de aislamiento tiene aplicación para los devanados de baja y media tensión. Según la normatividad, los niveles se clasifican de acuerdo con el factor de índice de salud de esta prueba y se ponderan de 0 a 4, como se observa en la Tabla 10. Allí, los niveles se ajustan de acuerdo con los valores establecidos por la norma ANSI NETA ATS y se clasifican según el factor de índice de salud (HIF) como insumo para el cálculo del índice de salud (IH).

Tabla 10

Factor del Índice de salud – Prueba resistencia de aislamiento.

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO TRANSFORMADORES	
HIF	Resistencia de Aislamiento Mínima MΩ Transformadores en Aceite
4	≥5000
3	2501-5000
2	1501-2500
1	500-1500
0	≤500

Nota. La información presentada en la tabla detalla la jerarquización de los distintos niveles de resistencia al aislamiento en los transformadores sumergidos en aceite, con base en el factor de índice de salud (HIF) asignado a cada uno de ellos. Adaptado de tabla 100.5 página 219; (NETA, 2021).

Factor de Índice de Salud (HIF) – Termografía Infrarroja.

La temperatura de operación en los transformadores oscila entre 60°C y 90°C en un régimen de trabajo nominal. Bajo cargas pesadas o sobrecargas, la temperatura inherente de los equipos puede superar incluso los 100°C. Esta temperatura inevitablemente degrada el papel aislante inmerso en aceite y el aceite mismo (Jusner et al., 2021).

El rango de temperaturas en la Tabla 11 muestran la organización en intervalos para reflejar las temperaturas de operación, con base en el análisis termográfico del transformador. Esto da una idea de lo que puede estar sucediendo térmicamente dentro de él y permite clasificar el factor (HIF) como insumo para el cálculo del índice de salud (IH).

Tabla 11*Factor del Índice de salud – Termografía IR.*

TEMPERATURA EN TRANSFORMADORES		
HIF	Rango de Temperaturas en Transformador °C	Interpretación
4	$0^{\circ}\text{C} \leq 60^{\circ}\text{C}$	TR opera en un rango de temperatura ideal
3	$61^{\circ}\text{C} < T \leq 75^{\circ}\text{C}$	TR normal, considerada segura y aceptable
2	$76^{\circ}\text{C} < T \leq 80^{\circ}\text{C}$	TR con indicio temprano de sobrecarga
1	$81^{\circ}\text{C} < T \leq 100^{\circ}\text{C}$	TR opera en un rango de temperatura elevado
0	$T > 100^{\circ}\text{C}$	TR con problema grave de sobrecarga o refrigeración

Nota. La información presentada en la tabla detalla los diferentes rangos de temperatura que se registran en el transformador, con el propósito de categorizar de manera precisa cada intervalo de magnitud térmica con relación al factor de índice de salud (HIF). Adaptado de página 53 (Popova et al., 2011).

Factor de Índice de Salud (HIF) – Análisis de Gases Disueltos DGA.

El análisis de gases disueltos tiene ponderaciones de acuerdo con la Tabla 12 para cada uno de ellos; cada gas tiene su propio puntaje (S_j) y peso (W_j). La Ecuación 1 del presente documento es útil para calcular en porcentaje el factor de análisis de gases disueltos (DAGF) y su relación con el HIF (Castro-Meneses et al., 2022b).

Tabla 12*Factor del Índice de Salud – DGA.*

HIF PARA LA PRUEBA DGA	
HIF	%DAGF
4	$\text{DAGF} \leq 20\%$
3	$20\% < \text{DAGF} \leq 30\%$
2	$30\% < \text{DAGF} \leq 40\%$
1	$40\% < \text{DAGF} \leq 50\%$
0	$\text{DAGF} \geq 50\%$

Nota. La tabla muestra los intervalos del factor de análisis de gases disueltos (DAGF) en porcentaje de acuerdo con la ecuación 1, cada valor producto se integra a un nivel según la clasificación del factor de índice de salud (HIF). Tomado de (Jahromi et al., 2009).

El puntaje (S_j) para cada uno de los siete gases se pondera desde (1 hasta 6). 1 corresponde a un valor Muy Bueno respecto a su medida y 6 a una condición Muy Pobre. Del mismo modo, se asigna un puntaje al peso (W_j) de 1 a 5 a cada gas. Esto con base en el origen

de la avería más común. El gas acetileno (C_2H_2) corresponde con arcos eléctricos; el hidrógeno (H_2) con descargas parciales; el etileno (C_2H_4) con el sobrecalentamiento del aceite, y el monóxido de carbono (CO) con el sobrecalentamiento del papel aislante (Sarria-Arias et al., 2014).

El mayor número de peso (W_j) se otorga a estos cuatro gases claves representativos, tal como se observa en la Tabla 13.

Tabla 13

Puntajes (S_j) y Pesos (W_j) DGA.

PUNTAJES Y PESOS PARA PRUEBA DGA [ppm].								
Gas		Puntaje (S_j)						Peso (W_j)
		1	2	3	4	5	6	
		Muy Bueno	Bueno	Promedio	Regular	Pobre	Muy Pobre	(1-5)
Hidrógeno	H2	≤ 100	101-200	201-300	301-500	501-700	> 700	4
Metano	CH4	≤ 75	76-125	126-200	201-400	401-600	> 600	3
Etano	C2 H6	≤ 65	66-80	81-100	101-120	121-150	> 150	1
Etileno	C2 H4	≤ 50	51-80	81-100	101-150	151-200	> 200	4
Acetileno	C2 H2	≤ 3	4-7	8-35	36-50	51-80	> 80	5
Dióxido de carbono	CO	≤ 350	351-700	701-900	901-1100	1101-1400	> 1400	3
Monóxido de carbono	CO2	≤ 2500	≤ 3000	≤ 4000	≤ 5000	≤ 6000	> 7000	1

Nota. La tabla presenta la clasificación de puntajes (S_j), que va de 1 Muy bueno a 6 Muy pobre, y los pesos (W_j) para cada uno de los siete gases. Esto es útil para calcular el factor (DAGF) según la ecuación 1. Adaptado de (Ortiz et al., 2016).

Factor de Índice de Salud (HIF) – Dieléctrico ADFQ.

Las pruebas ASTM caracterizan de manera global el análisis dieléctrico y fisicoquímico (ADFQ) del aceite aislante, a través del factor de calidad del aceite o OQF (Oil Quality Factor), que se calcula de acuerdo con la Ecuación 4 (Castro-Meneses et al., 2022b).

Ecuación 4

Fórmula para Cálculo del Factor de Calidad del Aceite (OQF).

$$OQF = \frac{\sum_{j=1}^6 S_j * W_j}{\sum_{j=1}^6 W_j} * 100\%$$

Donde:

- OQF, Factor de Calidad del Aceite.
- S_j , Puntaje asignado a la prueba j ASTM, que va de 1 a 4.
- W_j , Peso de acuerdo con el resultado de cada prueba ASTM que va de 1 a 4.

Nota. Esta fórmula calcula el índice de calidad general (OQF) al combinar los puntajes de las 6 pruebas ASTM en un porcentaje único (OQF), con base en los pesos (W_j) y puntajes (S_j) que indican la salud o calidad general del aceite aislante. Tomado de (Naderian et al., 2008).

Los límites que se definen en la Tabla 14 tienen como objetivo ayudar a calcular la calidad del aceite, con base en las seis pruebas ASTM. Es fundamental destacar que estos valores se recomiendan para aceites aislantes que están en uso. Los resultados de cada prueba dan un puntaje (S_j) de 1 a 4, donde 1 representa la mejor condición y 4 la peor. El peso (W_j) también va de 1 a 4, donde 1 indica que la prueba tiene poco impacto en la caracterización del aceite aislante y 4 que tiene mucho impacto. Estos valores son el insumo para calcular el factor de calidad del aceite o OQF (Jahromi et al., 2009).

Tabla 14

Puntajes (S_j) y Pesos (W_j) para caracterizar el ADFQ.

PUNTAJES Y PESOS PRUEBAS ASTM (ADFQ)						
Puntaje (S_j)	Rango					
	Rigidez dieléctrica [kV]	Tensión interfacial [N/m]	Número de acidez mgKOH/g	Contenido de humedad [ppm]	Color Unidades de Color ASTM	Factor de potencia del líquido @25 °C [%]
1	≥45	≥25	≤0,05	≤15	≤1,5	≤0,1
2	35-45	20-25	0,05-0,1	15-20	1,5-2,0	0,1-0,5
3	30-35	15-20	0,1-0,2	20-25	2,0-2,5	0,5-1,0
4	≤30	≤15	≥0,2	≥25	≥2,5	≥1,0
PESO (W_j)	3	2	1	4	2	3

Nota. La tabla presenta los puntajes (S_j) y el peso (W_j) para cada prueba ASTM, con base en el producto de los resultados y análisis de cada muestra de aceite aislante. Esto sirve como referencia para calcular el factor de calidad del aceite (OQF). Adaptado de (Arias & Mejía, 2018).

El factor de calidad del aceite (OFQ) clasifica los niveles de calidad del cero al cuatro. Como se muestra en la Tabla 15, el porcentaje de calidad del aceite aislante se ajusta según el factor (HIF) de cada nivel.

Tabla 15

Factor del Índice de Salud – Calidad del Aceite OQF.

HIF EN FUNCIÓN DE %OQF	
HIF	%OQF
4	$OQF \leq 1,2\%$
3	$1,2\% < OQF \leq 1,5\%$
2	$1,5\% < OQF \leq 2,0\%$
1	$2,0\% < OQF \leq 3,0\%$
0	$OQF \geq 3,0\%$

Nota. La tabla muestra los intervalos del factor de calidad del aceite (OFQ) producto de la ecuación 4, y la relación de acuerdo con el nivel del factor de índice de salud (HIF). Tomado de (Castro-Meneses et al., 2022b).

Factor de Índice de Salud (HIF) – Factor de Carga β .

La capacidad de carga del transformador teóricamente muestra la corriente que pasa por los devanados de baja y media tensión, lo que afecta la temperatura en el sistema de aislamiento. Por lo tanto, la eficiencia del transformador cambia según el nivel de carga. La tasa de carga del transformador (β) es la relación entre la carga promedio que tiene el transformador (S) y su capacidad nominal (Se), como se muestra en la Ecuación 5 (Guo & Guo, 2022).

Ecuación 5

Fórmula para Cálculo del Factor de Carga de Transformador.

$$\beta = \frac{S}{Se} * 100\%$$

Donde:

- β , Factor de carga del transformador en porcentaje.
- S, Potencia promedio del transformador en un lapso.
- Se , Potencia nominal del transformador (Dato de Placa).

Nota. Esta fórmula permite el cálculo en porcentaje de carga de un transformador, con base en la relación entre la carga promedio en corriente eléctrica, respecto a la capacidad nominal que entrega el devanado en dirección a la carga, ello a través de un factor de carga β . Tomado de página 9040 (Guo & Guo, 2022).

El factor (β) porcentual tiene origen a través de la ecuación 5 y clasifica el factor de índice de salud (HIF), tal como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16

Factor del Índice de salud – Factor de carga β .

HIF FACTOR DE CARGA β	
HIF	% β
4	$\beta \leq 50\%$
3	$50\% < \beta \leq 60\%$
2	$60\% < \beta \leq 80\%$
1	$80\% < \beta \leq 95\%$
0	$\beta \geq 95\%$

Nota. La tabla define las cinco categorías de los niveles de carga (β) del transformador en porcentajes, con base en la potencia medida y la potencia nominal de placa, según cada valor del índice de salud (HIF). Adaptado de (Kim et al., 2016).

Modelo Índice de Salud (IH) – Categorías de la Condición.

Un índice de salud (IH%) de 100 significa que el transformador está en buen estado o como nuevo. Si el valor es más bajo, significa que el transformador está bastante deteriorado. Las categorías se dividen en cinco grupos: Muy bueno, bueno, regular, pobre y muy pobre, como se muestra en la Ilustración 22.

Ilustración 22

Descripción de la Categoría del Índice de Salud.

ÍNDICE DE SALUD (IH) - EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN GENERAL			
% HI	Condición	Detalle de la Condición	Semáforo de Condición
$85\% < IH \leq 100\%$	MUY BUENO	Tan bueno como nuevo	
$70\% < IH \leq 85\%$	BUENO	Buena condición, equipo estable	
$50\% < IH \leq 70\%$	REGULAR	Alarma, requiere análisis o monitoreo	
$30\% < IH \leq 50\%$	POBRE	Insatisfactorio, requiere intervención programada	
$IH \leq 30\%$	MUY POBRE	Inaceptable, requiere intervención inmediata	

Nota. La ilustración muestra las categorías del índice de salud en rangos porcentuales, producto del cálculo de pesos y ponderaciones por cada factor de entrada (FE), cada nivel tiene relación con un estado de la condición del transformador. Adaptado de (Tamma et al., 2021b).

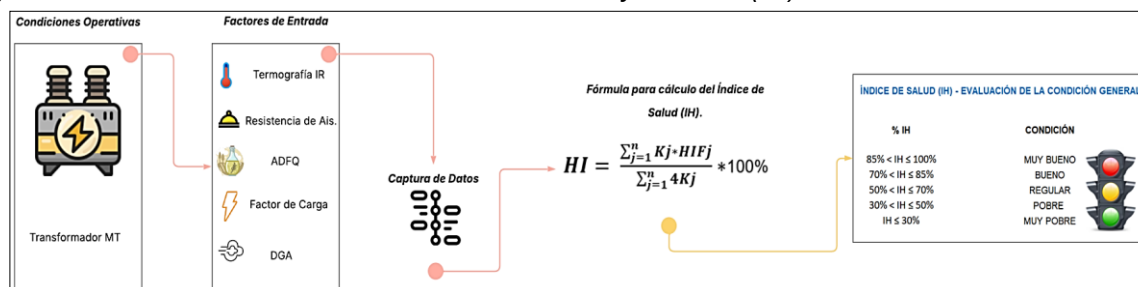
Flujo de Proceso – Modelo Índice de Salud (IH).

El modelo de evaluación del índice de salud (IH) bajo un enfoque de factores de condición tiene un diseño de tal forma que aprovecha las herramientas con las que cuenta para el 2025 el Consorcio SAS – Confipetrol. Estas herramientas son necesarias para establecer y caracterizar cada uno de los cinco factores de entrada (FE), determinantes para el cálculo del estado de los transformadores (MT).

El proceso para calcular y evaluar el índice de salud (IH) de los transformadores MT conecta las condiciones en las que operan los equipos con las variables operativas que resultan de estas condiciones, tal como se observa en la Ilustración 23. También incluye la captura de datos e información relevante que caracterice el comportamiento de los activos, tal como se describió en el objetivo 3. Esto es necesario para lograr ponderar en pesos y puntajes cada uno de los factores de entrada (FE) y determinar finalmente el valor global del índice de salud (IH) de cada transformador (MT).

Ilustración 23

Flujo de Proceso Macro del Modelo de Evaluación y Cálculo (IH).



Nota. La ilustración muestra, de manera general, el flujo de proceso de los factores de entrada (FE), captura de los datos de caracterización del comportamiento y el cálculo del valor del índice de salud (IH) que describe el estado y condición de cada transformador (MT). Elaboración propia.

Casos de Estudio – Aplicación de Modelo (IH).

El modelo de índice de salud (IH) tiene aplicación en cinco casos de estudio en este trabajo de profundización. Del 12,3% de los transformadores MT que se monitorearon para el año 2024 de forma simultánea de acuerdo con los cinco factores de entrada (FE), se selecciona un grupo de manera aleatoria para aplicar el modelo de factores de condición (puntajes y pesos).

Esto se observa en la Tabla 17. De acuerdo con la captura de datos a través de la Plantilla de captura factores de entrada FE (ver Ilustración 21), se evalúa cada parámetro para calcular el índice de salud (IH).

Tabla 17

Casos de Estudio - Aplicación de Modelo (IH).

CASOS DE ESTUDIO ÍNDICE DE SALUD				
	Potencia [kVA]	Nivel de Tensión MT [V]	Nivel de Tensión BT [V]	Año Fabricación
CASO 1	12500	34500	480	2002
CASO 2	10000	34500	480	1980
CASO 3	880	13800	480	1984
CASO 4	25000	34500	480	2001
CASO 5	10000	34500	480	1997

Nota. La tabla muestra las características de cada transformador de potencia (caso de estudio) candidatos para ser puesto a evaluación a través del modelo de índice de salud (IH), según el inventario de equipos operativos testeados. Tomado de (Consortio Grupo SAS - Confipetrol, 2025).

Los datos necesarios para el cálculo en este estudio provienen de la base de datos de la empresa y están registrados en la Tabla 18. Los resultados de las pruebas para cada uno de los factores de entrada (FE) corresponden con datos que se capturan en el año 2024 (Consortio Grupo SAS - Confipetrol, 2025).

Tabla 18

Casos de Estudio Calculo Modelo (IH) – Datos Factores de Entrada (FE).

CASOS DE ESTUDIO ÍNDICE DE SALUD																
	FACTOR TERMOGRAFÍA IR [°C]	FACTOR RESISTENCIA DE AISLAMIENTO [MΩ]	FACTOR ADFQ						FACTOR DGA [%]						FACTOR CARGA [%]	
			Rigidez Dieléctrica [kV]	Tensión Interfacial [N/m]	Número de Acidez [mgKOH/g]	Contenido de Humedad [PPM]	Color Unidades ASTM	Factor de Potencia del Líquido @25 °C [%]	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2	CO		CO2
CASO 1	52,3	5200	33	25,3	0,05	30	0,2	0,1	4,1	5,6	<1	20,9	<0,3	489,2	765,3	74,5
CASO 2	78,5	2660	40	27,7	0,03	26	2,5	0,25	7,6	8,8	2,3	66,2	<0,3	496,5	3135,2	80,3
CASO 3	80,9	1270	36	27,5	0,02	29	2	0,43	<0,6	1,7	<1	1,2	<0,3	710	558	69,6
CASO 4	54,3	560	32	20,6	0,07	34	2	0,22	63,3	19,2	17,7	11,2	5,6	483,6	2188,2	60,1
CASO 5	91,3	1450	32	32,8	<0,02	32	3	1,1	<0,6	4,3	<1	5,1	<0,3	910	5148,5	86,9

Nota. La tabla muestra los resultados de las pruebas diagnósticas que Consortio SAS – Confipetrol ejecuta a estos cinco transformadores de acuerdo con las rutinas de monitoreo y muestreo. Elaboración propia con base en resultados compilados por el departamento eléctrico y CBM.

El índice de salud tiene origen a través del método de pesos y ponderaciones de los factores de entrada (FE) que representa la combinación de resultados de la operación, inspección y pruebas con el objetivo de cuantificar el valor del índice de salud en un indicador global de la condición de los equipos (Nurcahyanto et al., 2019).

El cálculo del índice de salud (IH) tiene aplicación para los casos de estudio de manera manual con las ecuaciones descritas con anterioridad y se valida al aplicar el código Python que se construyó a través del entorno de desarrollo de Google Colab, para dar validez y escalabilidad de aplicación en la compañía. La Ilustración 24 muestra los resultados para cada uno de los casos de aplicación y la condición final de cada uno de los transformadores (MT).

Ilustración 24

Casos de Estudio Calculo Modelo (IH) – Resultados.

ÍNDICE DE SALUD (IH)							
	 FACTOR TERMOGRAFÍA IR	 FACTOR RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	 FACTOR ADFQ Peso (Kj)	 FACTOR DGA	 FACTOR CARGA		
	HIF	HIF	HIF	HIF	HIF	$HI = \frac{\sum_{j=1}^n K_j \cdot HIF_j}{\sum_{j=1}^n 4K_j} * 100\%$	VALIDACIÓN CÓDIGO PYTHON
							CONDICIÓN
CASO 1	4	4	1	4	2	80,26%	80,26% BUENO
CASO 2	2	3	1	3	1	52,63%	52,63% REGULAR
CASO 3	1	2	1	3	2	46,05%	46,05% POBRE
CASO 4	4	1	1	3	2	61,84%	61,84% REGULAR
CASO 5	1	1	0	2	1	27,63%	27,63% MUY POBRE

Nota. La Ilustración presenta el resultado del índice de salud (IH) para cada uno de los casos de estudio en virtud de los resultados de los factores de entrada (FE), a través de la Ecuación 3 y el uso del código Python diseñado para este propósito a través de la herramienta Google Colab. Elaboración propia.

El índice de salud (IH) es una medida importante que muestra el estado de un transformador, con base en los resultados de las pruebas diagnósticas. Ofrece un valor que facilita su comprensión a partir de un solo número. Este modelo tiene sustento en la suma de pesos y ponderaciones de cada factor relevante que ayuda a evaluar la condición general del transformador (Kim et al., 2016).

La herramienta Python permite, a través de sus funciones, evaluar el estado de los transformadores calculando el índice de salud (IH). Esto se hace en un marco de programación flexible y sensible. Como se muestra en la Ilustración 25, los datos e información son muy importantes para las actividades de mantenimiento y el análisis de equipos (Kabir et al., 2024).

Ilustración 25

Código Python – Calculo Índice de Salud (IH).

```
def calcular_indice_de_salud(factoros_k, factores_hif):
    numerador = 0
    denominador = 0
    # 1. Asegurarse de que los factores K y HIF tengan las mismas claves
    if factores_k.keys() != factores_hif.keys():
        raise ValueError("Las claves de factores k y factores hif no coinciden.")
    # Iterar por cada factor de entrada
    for factor in factores_k:
        # Obtener los valores de K y HIF
        k = factores_k[factor]
        hif = factores_hif[factor]
        # Validar que el puntaje HIF esté en el rango 0-4
        if not (0 <= hif <= 4):
            print(f"Advertencia: El puntaje HIF para '{factor}' ({hif}) está fuera del rango esperado (0-4).")
        # Calcular el numerador (puntaje ponderado)
        numerador += k * hif
        # Calcular el denominador (puntaje máximo ponderado posible)
        denominador += k
    # Evitar división por cero
    if denominador == 0:
        return 0.0
    # Calcular el HI como porcentaje
    hi = (numerador / denominador) * 100
    return hi

def evaluar_condicion_hi(hi_calculado):
    if 86 <= hi_calculado <= 100:
        return "MUY BUENO"
    elif 71 <= hi_calculado < 86:
        return "BUENO"
    elif 51 <= hi_calculado < 71:
        return "REGULAR"
    elif 31 <= hi_calculado < 51:
        return "POBRE"
    elif 0 <= hi_calculado < 31:
        return "MUY POBRE"
    else:
        return "Fuera de rango"

FACTORES_K = {
    "Termografía IR": 10,
    "Resistencia de Ais.": 6,
    "ADFO": 6,
    "Factor de Carga": 10,
    "DGA": 6
}

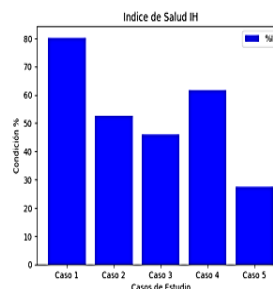
# 2. Definir los Factores HIF (Resultados de las pruebas)
FACTORES_HIF = {
    "Termografía IR": 4, # Condición: Muy Buena
    "Resistencia de Ais.": 1, # Condición: Buena
    "ADFO": 1, # Condición: Buena
    "Factor de Carga": 3, # Condición: Muy Buena (carga ligera)
    "DGA": 2 # Condición: Regular (presencia de gases)
}

# 3. Calcular el índice de Salud
indice_salud = calcular_indice_de_salud(FACTORES_K, FACTORES_HIF)

# 4. Evaluar la condición general
condicion = evaluar_condicion_hi(indice_salud)

# 5. Mostrar resultados
print("--- Cálculo del Índice de Salud del Transformador ---")
print(f"Factores de Importancia (K): {FACTORES_K}")
print(f"Resultados de Pruebas (HIF 0-4): {FACTORES_HIF}")
print("\n--- RESULTADO ---")
print(f"Índice de Salud (HI): {indice_salud:.2f}%")
print(f"Evaluación General: {condicion}")

--- RESULTADO ---
Índice de Salud (HI): 61.84%
Evaluación General: REGULAR
```



Nota. La ilustración presenta el desarrollo del código Python en dos grandes pasos de construcción a través de variables condicionales y funciones, para calcular el valor global del indicador (IH) como medida de comprobación al método de análisis que se presenta en la Ecuación 3. Elaboración propia.

El Índice de Salud es una herramienta clave para evaluar la condición actual de un transformador. Este índice mide los resultados de observaciones durante su funcionamiento, pruebas en el laboratorio y en el campo, y también de inspecciones técnicas. El Índice de Salud (IH) es una forma de evaluar y medir el estado de cada transformador; así como también es útil para clasificar un grupo de transformadores según su estado técnico y determinar, por ejemplo, cuáles acciones de mantenimiento son más urgentes (Martins, 2014).

Objetivo Cinco – Índice de Salud y Tácticas.

Proponer una metodología para construir decisiones tácticas en relación con los transformadores (MT), con base en el índice de salud (IH) y el nivel de evaluación de riesgo, dentro de un marco de toma de decisiones sobre acciones de mantenimiento, con referencia a las normas ISO 55001:2024, UNE EN 17485:2023 e ISO 31000:2018.

Desarrollo.

La gestión de riesgos es muy importante para las organizaciones de hoy que desean ser competitivas. En este contexto, es importante crear un marco para tomar decisiones según el estado de los activos, que para el caso de los transformadores son clave en todas las actividades y en la forma en que se trabaja con ellos. Esto incluye la toma de decisiones como un elemento clave para las acciones de mantenimiento, tanto a nivel estratégico, táctico como operativo (Hardjomidjojo et al., 2022).

El índice de salud (IH) como factor para el análisis y evaluación de riesgos con base en la norma ISO 31000:2018 es útil para establecer acciones y tácticas de mantenimiento; por un lado, permite evaluar el riesgo a través del cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (RPN³²) por cada modo de falla y, por el otro, clasificar el nivel de riesgo de cada transformador (MT) en función del valor del (IH).

Valoración de Riesgos y Acciones de Mantenimiento.

La técnica de evaluación de riesgos según la norma ISO 31010:2020 a emplear es el análisis de modos y efectos de fallas y criticidad (FMECA). Considera los modos de falla a los ítems mantenibles Parte Activa (Núcleo - Devanado), Enfriamiento (Moto-Ventilador) y Aceite Aislante. Clasifica cada uno de estos modos de falla en función de su criticidad a través del método del número de prioridad de riesgo (RPN), este método toma el producto de la clasificación de la severidad, ocurrencia y detectabilidad (Kalathil et al., 2020).

³² RPN - Para obtener el valor de (RPN) Solo se multiplican los valores de la Severidad, Ocurrencia y Detección que fueron seleccionados de la tabla correspondiente. $RPN = (S \times O \times D)$.

La conjugación del desarrollo del (FMECA) para los tres ítems mantenibles mencionados anteriormente es fundamental para construir acciones según cada modo de falla que se presenta. En este contexto, tienen desarrollo tres tipos de acciones de mantenimiento, como se muestra en la Ilustración 26, con base en el valor total del índice de salud (IH) y el rango del número de riesgo prioritario (RPN).

Ilustración 26

Tipos de Acciones de Mantenimiento (Propuestas).

TIPO DE ACCIÓN	ACCIONES
TIPO III	ACCIÓN CORRECTIVA - INMEDIATA
TIPO II	ACCIÓN PREVENTIVA
TIPO I	ACCIÓN PREDICTIVA

Nota. La ilustración presenta el enfoque de las acciones de mantenimiento con aplicación a cada modo de falla según el desarrollo del (FMECA) en conjugación con los rangos del índice de salud global para cada equipo; la ilustración ofrece una mirada macro de las acciones a implementar en función de una perspectiva del desarrollo del número prioritario del riesgo (RPN). Adaptado de (Villacrés-Parra et al., 2021).

El desarrollo del FMECA con aplicación en los transformadores (MT) y a los tres ítems mantenibles tiene determinación a través del número de prioridad de riesgo (RPN). Para cada nivel del índice de salud (IH), hay una relación con los tipos de acciones de mantenimiento, como se muestra en la Ilustración 27. En este caso, se atienden primero las fallas con un RPN alto, y luego las que tienen un RPN más bajo, hasta solucionar todas (Stamatis D.H., 2003).

Ilustración 27

Conjugación (IH) y RPN (Mapa de Calor Según Acciones).

ÍNDICE DE SAUD (IH)		AMEFC (RPN)				
		RPN [1-150]	RPN [151-300]	RPN [301-500]	RPN [501-800]	RPN [801-1000]
MUY BUENO	85% < IH ≤ 100%	TIPO I				
BUENO	70% < IH ≤ 85%					
REGULAR	50% < IH ≤ 70%	TIPO II				
POBRE	30% < IH ≤ 50%					
MUY POBRE	IH ≤ 30%	TIPO III				

Nota. La ilustración muestra la relación entre el valor global del (IH) y el (RPN) en virtud de localizar cada modo de falla según el mapa de calor para ubicar la correspondencia con el tipo de acción de mantenimiento que le corresponda. Elaboración propia.

Aplicación – Número de Prioridad de Riesgo (RPN).

El análisis de modos y efectos de fallas y criticidad (FMECA) se ocupa de dar prioridad a los fallos al calcular el número de prioridad de riesgo (RPN). Esto con base en la identificación de tres criterios: severidad (S), ocurrencia (O) y detectabilidad (D). Para este análisis, son útiles las tablas guía que propone D. H. Stamatis en su libro "Failure Mode and Effect Analysis".

El modelo de construcción del (FMECA) para el ítem mantenible Parte Activa (Núcleo - Devanado) se describe en la Ilustración 28, donde se analiza cada modo de falla y su respectiva evaluación a través del valor (RPN).

Ilustración 28

FMECA RPN – Núcleo Devanado.

DESCRIPCIÓN ÍTEM MANTENIBLE	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODOS FALLA	POTENCIAL CAUSA DE FALLA	SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECTABILIDAD	RPN
Parte Activa (Núcleo - Devanado)	* Convertir la energía eléctrica alterna de un nivel de tensión mayor a uno menor, manteniendo la potencia eléctrica con capacidad nominal de demanda a un máximo de carga de 25 [MVA] a 115000 +/- 2 % [V] en el lado primario y 34500 [V] +/- 10% en su lado secundario, sin superar una temperatura de Devanado de 110[°C] máximo en su punto interno, para suministrar energía de forma continúa a todos los circuitos asociados.	Suministrar Potencia a más de 25 [MVA].	Alta Temperatura	Falla de espiras por calor excesivo, la corriente entregada a la carga, es mayor a la nominal	6	6	6	216
			Deterioro de las Juntas		4	6	3	72
			Error en nivel de medida, falsa alarma, indicación errónea en instrumento.	Falla de aislamiento por descalibración de protecciones térmicas y de presión	7	5	4	140
		Operar con magnitud de temperatura en devanado, superior a 110 [°C].	Deterioro de recubrimiento aislante (grietas, desgaste, fracturas)	Falla de aislamiento por degradación, efectos de envejecimiento, humedad, sobretensión, sobrecarga o diseño inadecuado	6	4	7	168
			Resistencia de Aislamiento baja.		7	4	6	168
			Temperatura interna demasiado alta.		7	5	5	175
			Descargas Parciales	Falla del Papel Aislante por degradación química, productos de oxidación y pérdida de su resistencia mecánica	6	3	7	126
			Baja Eficiencia		7	4	7	196
			Alta Temperatura		5	5	5	125
			Alto contenido PPM de agua en el papel		7	4	6	168
		Generar Vibraciones y ruidos en su interior, perceptibles desde su exterior.	Alta Vibración	Falla de partes mecánicas por deterioro de aislamiento entre laminas	4	5	4	80
			Alto Ruido		5	6	5	150
		No hay conversión de energía eléctrica	Alta Corriente	Falla de Aislamiento por corrientes de cortocircuito	9	5	7	315

Nota. La ilustración muestra el desarrollo del número de prioridad de riesgo (RPN) para cada modo de falla en relación con el ítem mantenible núcleo devanado, este es el producto de la severidad, ocurrencia y detectabilidad. Elaboración propia con apoyo para la construcción (RPN), (Severidad Pág. 117), (Ocurrencia Pág. 123) y (Detectabilidad Pág. 126) del libro Failure Mode and Effect Analysis (Stamatis D.H., 2003).

El análisis FMECA, con aplicación al sistema de enfriamiento y al aceite aislante, se presenta en la Ilustración 29. En este análisis, se examina el riesgo de cada tipo de modo de falla según su valor RPN.

Ilustración 29

FMECA RPN – Sistema de Enfriamiento y Aceite Aislante.

DESCRIPCIÓN ÍTEM MANTENIBLE	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO FALLA	POTENCIAL CAUSA DE FALLA	SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECTABILIDAD	RPN
Enfriamiento (Moto-Ventilador)	* Suministrar transferencia de aire cuando se requiera para disipar calor producido por la red de radiadores, con un flujo de 8,11 m ³ /h a 1650 RPM y potencia entregada de 0,5 HP, sin superar 155°C de temperatura en su devanado.	Generar flujo de aire hacia los disipadores menor a 8,11 m ³ /h.	Alta Temperatura	Falla en rodamientos de los Ventiladores por sobrecalentamiento	5	6	5	150
			Baja Eficiencia del Flujo		4	6	6	144
		Operar transformador con registro de temperatura en devanado, superior a 155 [°C].	Alta Temperatura	Falla de Aislamiento del motor de los ventiladores por sobrecalentamiento	9	6	6	324
			Deterioro de recubrimiento aislante (grietas, desgaste, fracturas)	Falla de aislamiento por Degradación, efectos de envejecimiento, humedad, sobretensión, sobrecarga o diseño inadecuado	6	6	7	252
		Identificar aspas y eje con ruidos y vibraciones.	Deterioro de recubrimiento aislante (grietas, desgaste, fracturas)	Falla de eje excéntrico por daños en los rodamientos	7	7	7	343
			Alta Vibración	Falla en aspas por desbalance mecánico	4	7	4	112
			Alto Ruido	Falla en aspas por ajuste o ensamblado	5	7	5	175
		No hay generación de flujo de aire.	No responde a señal de activación	Falla en el suministro eléctrico por falsos contactos	5	4	6	120
			Indicación errática del instrumento	Falla del control de activación por descalibración en las protecciones	6	4	6	144
Aceite Aislante	* Aislar eléctricamente las bobinas con rigidez dieléctrica mayor a 28 [kV] e índice de calidad mayor a 300, para garantizar su aislamiento térmico, refrigeración, protección al papel aislante y control de la descarga corona.	Aceite aislante con propiedad de Rigidez Dieléctrica Menor a 28 [kV].	Alta Temperatura	Falla (Degradación) del fluido aislante por sobrecalentamiento	7	5	5	175
			Baja Rigidez Dieléctrica		7	4	6	168
			Sobrecarga (Corriente)		8	5	5	200
		Índice de Calidad del Aceite Aislante Menor a 300.	Baja Índice de Calidad	Falla (Degradación) del Fluido aislante por Contaminación, humedad y productos de oxidación	8	6	7	336
			Alta Temperatura		7	6	5	210

Nota. La ilustración muestra el desarrollo del número de prioridad de riesgo (RPN) para cada modo de falla en relación con el ítem mantenible sistema de enfriamiento y aceite aislante, este es el producto de la severidad, ocurrencia y detectabilidad Elaboración propia con apoyo para la construcción (RPN), (Severidad Pág. 117), (Ocurrencia Pág. 123) y (Detectabilidad Pág. 126) del libro Failure Mode and Effect Analysis (Stamatis D.H., 2003).

El valor del (RPN) tiene relación con el índice de salud (IH), tal como se muestra en la Ilustración 27. De esta manera, se vinculan los tres tipos de acciones de mantenimiento sugeridos para el Consorcio Servicios Asociados SAS – Confipetrol.

Concatenación (RPN) y (IH) – Tipos de Acciones de Mantenimiento.

El contexto operativo de los transformadores (MT) en el Consorcio Servicios SAS - Confipetrol pone de manifiesto la necesidad de construir acciones de mantenimiento bajo una realidad organizacional ajustada. En este sentido es fundamental el desarrollo de tres tipos de acciones de mantenimiento, tal como se observa en las Ilustraciones 30 y 31, con adaptación a las herramientas, equipos, personal y recursos disponibles en la organización para el año 2025. Esto pensando en cómo se pueden aplicar y escalar en la rutina diaria de las actividades de mantenimiento.

Ilustración 30

Acciones de Mantenimiento Tipo I y II.

TIPO	COMPONENTE	ACTIVIDAD PREDICTIVA	PRUEBA / ACCIÓN	FRECUENCIA TAREA PLANEADA	DURACIÓN (HH)	FRENTE DE TRABAJO	EQUIPOS / RECURSOS DE PRUEBA	ESTADO DEL TRANSFORMADOR
TIPO I ACCIÓN PREDICTIVA	DEVANADO	Pruebas Eléctricas de Campo	Relación de Transformación	9-12 MESES	6,0	CBM Profesional CBM Eléctrico Técnico CBM Eléctrico Técnico Eléctrico	Equipo de Inyección en Media Tensión	Des energizado
			Factor de Potencia					
			Resistencia de Aislamiento					
			Corriente de Excitación en Taps					
	ACEITE AISLANTE	Análisis Dieléctrico y Físico químico (ADFQ)	Capacitancia a Tierra	9-12 MESES	2,0	CBM Profesional CBM Eléctrico Técnico CBM Eléctrico	Kit de Toma Muestras (Recipientes, Jeringas)	Energizado
			Rigidez Dieléctrica					
			Tensión Interfacial					
			Contenido de Agua					
			Factor de Potencia					
			Tensión Interfacial					
			Color					
TIPO II ACCIÓN PREVENTIVA	DEVANADO	Pruebas Eléctricas de Campo	Relación de Transformación	6-9 MESES	6,0	CBM Profesional CBM Eléctrico Técnico CBM Eléctrico Técnico Eléctrico	Equipo de Inyección en Media Tensión	Des energizado
			Factor de Potencia					
			Resistencia de Aislamiento					
			Corriente de Excitación en Taps					
	ACEITE AISLANTE	Análisis Dieléctrico y Físico químico (ADFQ)	Capacitancia a Tierra	6-9 MESES	2,0	CBM Profesional CBM Eléctrico Técnico CBM Eléctrico	Kit de Toma Muestras (Recipientes, Jeringas)	Energizado
			Rigidez Dieléctrica					
			Tensión Interfacial					
			Contenido de Agua					
		Cromatografía de Gases Disueltos en el Aceite Aislante	Factor de Potencia	6-9 MESES	2,0	CBM Profesional CBM Eléctrico Técnico CBM Eléctrico	Kit de Toma Muestras (Recipientes, Jeringas)	Energizado
			Tensión Interfacial					
			Color					
			Análisis de Gases Disueltos en el Aceite (DGA)					
	DISIPADORES / BUJES / CONDUCTORES	Técnicas CBM Eléctrico	Inspección por Termografía	6 MESES	3,0	CBM Profesional CBM Eléctrico Técnico CBM Eléctrico	Cámara Termográfica Equipo Ultrasonido	Energizado
			Ultrasonido Aerotransportado					
		Lectura y Registro de Parámetros Operativos	Revisión del Nivel de Aceite	3-6 MESES	0,5	Eléctrico - Técnico Eléctrico	Cámara Digital	Energizado
			Verificar estado de Silica gel (Estado de Saturación)	3-6 MESES	0,5	Eléctrico - Técnico Eléctrico	Cámara Digital	Energizado
			Verificar Estado de Medidores así como Fugas en Uniones y Tuberías	3-6 MESES	1,0	Eléctrico - Técnico Eléctrico Instrumentación	Cámara Digital	Energizado
		Inspección de Ventiladores	Verificar Condición Mecánica, pruebas de Rose y Ruido.	3-6 MESES	1,5	Eléctrico - Técnico Eléctrico	Cámara Digital	Energizado
		Revisión de Conexiones	Revisión de componentes eléctricos de control, ajuste de conexiones, limpieza de elementos.	3-6 MESES	2,4	Eléctrico - Técnico Eléctrico	Herramientas Manuales Dieléctricas, Pinza Voltiampérimétrica y Traje Contra Arco Eléctrico	Energizado

Nota. La ilustración muestra los detalles de cada una de las acciones de mantenimiento tipo I y II. Se destaca la importancia de la frecuencia, la responsabilidad y los recursos. Esto se hace en vista de la concatenación del valor (RPN) de cada modo de falla con el valor total del índice de salud (IH) de cada equipo. Adaptado de (Bolaños, s. f.).

Las acciones de mantenimiento del tipo III tienen un enfoque a valores altos según el número de prioridad de riesgo (RPN) y un valor global del índice de salud (IH). Tal como se observa en la Ilustración 31, las frecuencias de atención son menores en la práctica y, en casos extremos, debe ser inmediata ante la inminente pérdida total de la función del equipo.

Ilustración 31

Acciones de Mantenimiento Tipo III.

TIPO	COMPONENTE	ACTIVIDAD REACTIVA	PRUEBA / ACCIÓN	FRECUENCIA TAREA PLANEADA	DURACIÓN (HH)	FRENTE DE TRABAJO	EQUIPOS / RECURSOS DE PRUEBA	ESTADO DEL TRANSFORMADOR
TIPO III ACCIÓN CORRECTIVA INMEDIATA	ESTRUCTURA	Reparación	Reparación de Fugas de Aceite Mayores	INMEDIATA	N/A	Eléctrico - Técnico Eléctrico	Insumos consumibles / Herramientas manuales Dieléctricas, Pinza Voltiamperimétrica y Traje Contra Arco Eléctrico	Energizado Des energizado
		Sustitución	Sustitución de aisladores o boquillas	INMEDIATA	N/A	Eléctrico - Técnico Eléctrico	Aisladores / Herramientas manuales Dieléctricas, Pinza Voltiamperimétrica y Traje Contra Arco Eléctrico	Des energizado
	INSTRUMENTOS	Atención a Disparos	Atención a Alarmas Críticas o Disparos del Transformador	INMEDIATA	N/A	Eléctrico - Técnico Eléctrico Instrumentación Redes Eléctricas	Según sea el Caso	Des energizado
		Reparación	Reparación o sustitución de relés y interruptores	INMEDIATA	N/A	Eléctrico - Técnico Eléctrico Instrumentación Redes Eléctricas	Según sea el Caso	Des energizado
	SISTEMAS REFRIGERACIÓN EXTERNO	Reparación de Sistemas Auxiliares	Reemplazo de Ventiladores o Bombas de Refrigeración Averiados	INMEDIATA	N/A	Eléctrico - Técnico Eléctrico	Repuestos / Herramientas manuales Dieléctricas, Pinza Voltiamperimétrica y Traje Contra Arco Eléctrico	Energizado Des energizado
	ACEITE AISLANTE / DEVANADO / CONEXIONES ELÉCTRICAS	Intervención Producto de Predictivo	Intervención por Resultados Críticos de Análisis Predictivos	INMEDIATA	N/A	Eléctrico - Técnico Eléctrico Servicio Especializado	Según sea el Caso	Energizado Des energizado

Nota. La Ilustración muestra las actividades en relación con las acciones tipo III, con relevancia en la frecuencia de las tareas planeadas, esto en vista de corresponder a un valor de un (RPN) alto y bajo índice global de salud (IH), con atención inmediata según sea el caso. Adaptado de (Rajote C et al., 2011).

La metodología de concatenación entre el número (RPN) y el índice (IH) permite a la organización tener un marco decisorio en virtud de un análisis global del equipo a través de las técnicas de diagnóstico o, como se denomina en el presente trabajo, los factores de entrada (FE) y del análisis de los modos de falla propuestos. En este sentido, la relación de estos dos elementos se convierte en un componente decisorio de acciones con claridad y sobre todo con sentido de frecuencia para actuar en vista de la caracterización y comportamiento de los transformadores y sus modos de falla.

Tácticas, CBM y Cobertura de Diagnósticos.

Las tácticas son fundamentales en el marco decisorio de la compañía, al considerar el estado de los transformadores (MT) y la evaluación de riesgo a través de la matriz de riesgos. Estas tácticas establecen configuraciones cruciales para abordar la gestión de los activos, con base en información sobre su comportamiento operativo, modos de fallo y riesgo. El propósito fundamental radica en optimizar la eficiencia operativa a través de la implementación táctica que fomenten una cultura organizacional orientada hacia el mantenimiento, priorizando la atención en equipos críticos como los transformadores (Pérez & Colque, s. f.).

La construcción de estas tácticas pretende enlazar la realidad del Consorcio Servicios Asociados SAS – Confipetrol con el ambiente en que operan los transformadores para implementar medidas realistas con sentido de practicidad y escalabilidad, en el cual se puedan tomar decisiones con información real de los activos.

Táctica – CBM en Transformadores (MT).

La táctica busca focalizar el monitoreo de la condición (CBM) como medida para anticipar fallas antes de que ocurran, para permitir planificar las intervenciones con antelación, en vista de tener un panorama más amplio a través del cálculo del índice global de salud (IH).

La táctica tal como se observa en la Ilustración 32, tiene como eje principal abordar el tratamiento de los transformadores de media tensión (MT) del Consorcio Servicios Asociados SAS – Confipetrol. Integra de manera sistemática el diagnóstico fisicoquímico del aceite aislante, el análisis de gases disueltos (DGA), las pruebas eléctricas y en general los factores de entrada (FE), como insumos del Índice de Salud (IH). Implementar una táctica de Gestión de Mantenimiento Basada en Condición (CBM) que use el Índice de Salud (IH) como referencia para decidir, planificar y justificar las acciones de mantenimiento en los transformadores (MT).

Involucrar a la alta dirección en la consolidación de la táctica al mejorar las actividades de monitoreo de condiciones con equipos especializados que permitan amplificar la población de transformadores a diagnosticar.

Ilustración 32

Táctica CBM-IH.

TÁCTICA - BASADO EN CONDICIÓN (CBM) BAJO EL MARCO DEL (IH)		
Actividades	Elegir la tecnología correcta que cumpla con los requisitos para diagnosticar las variables operativas en los TR. Establecer un porcentaje realista de cobertura de TR que se debe diagnosticar, considerando los equipos que más afectan la producción de barriles de crudo. Informar a la alta dirección sobre los beneficios de las técnicas de CBM Eléctrico.	
Bloques de Información	Aceite Aislante (Físicoquímico / Dieléctrico) DGA (Análisis de Gases Disueltos) Pruebas Eléctricas de Aislamiento Termografía Infrarroja IR Historial de Cargabilidad	
Recolección y Validación de Datos	Plantilla Captura de Datos de Factores de Entrada (ver ilustración 21)	
Cálculo periódico del IH	Para cada transformador de media tensión (MT), se actualiza el índice de horas (IH) según las mediciones más recientes y se registran los cambios en la banda.	
Bloque de Decisión	85% < IH ≤ 100% – Condición Excelente 70% < IH ≤ 85% – Condición Buena 50% < IH ≤ 70% – Condición Aceptable con Alertas Incipientes 30% < IH ≤ 50% – Condición Degradada IH ≤ 30% – Condición Crítica	Mantener esquema rutinario de monitoreo CBM. Confirmar estabilidad de tendencias de factores de entrada (FE). Mantener esquema rutinario de monitoreo CBM. Construir tendencias de factores de entrada (FE). Aumentar la frecuencia de monitoreo (DGA, Físicoquímico, Eléctricas). Revisar condiciones de operación (carga, temperatura ambiente, maniobras). Diseñar un plan de intervención correctiva programada (reacondicionamiento de aceite, ajustes, reparación, etc.). Evaluar riesgos asociados bajo el estándar ISO 31000:2018 y la criticidad del activo AMEFC (RPN). Clasificar el transformador como activo de alto riesgo. Considerar parada controlada, sustitución o reacondicionamiento mayor.
Responsable	Coordinador de Contrato - Ecopetrol Coordinador de Contrato - Servicios Asociados SAS - Confipetrol Supervisor CBM Supervisor Eléctrico	Profesionales CBM Eléctrico. Técnicos Eléctricos.
KPI (UNE EN 15341)	M3 - Implementación de la Estrategia de Mantenimiento P14 - Certificación E10 - Tiempo de Indisponibilidad por Mantenimiento Basado en Condición	Realización Cuantitativa %, la estrategia muestra los objetivos clave de mantenimiento, los recursos disponibles y los planes a seguir. Medición cada tres meses. Número de profesionales certificados / Número de profesionales con proyección a ejecutar diagnóstico CBM Tiempo de indisponibilidad por CBM / Tiempo total de indisponibilidad por razones de mantenimiento.

Nota. La Ilustración muestra el desarrollo de la táctica con los detalles de las actividades, la información necesaria del diagnóstico, las decisiones y los indicadores de rendimiento (KPI) para evaluar la táctica. Elaboración propia con apoyo de la norma UNE EN 15341:2021 respecto a los indicadores.

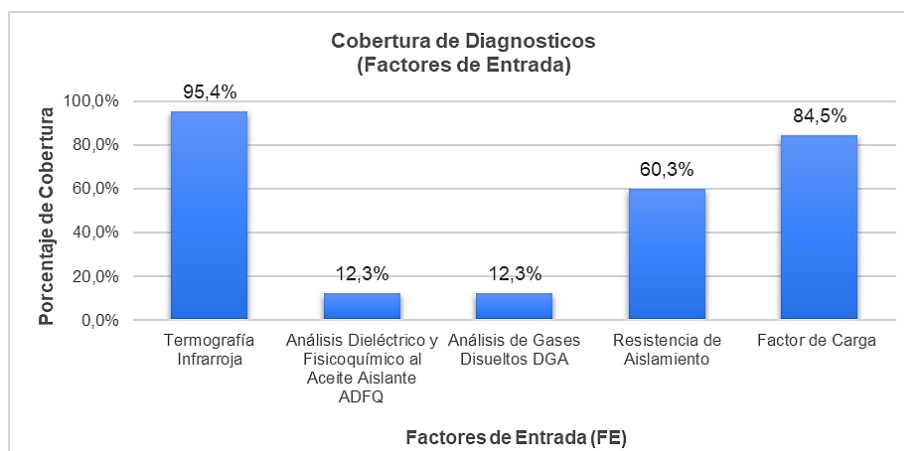
Táctica – Población de Muestreo ADFQ, DGA y Pruebas Eléctricas.

Los factores de entrada (FE) tienen un peso determinante para la elaboración de la presente propuesta; para el año 2025, la población de equipos cubiertos por todos los diagnósticos de forma simultánea según los cinco factores de entrada tiene un comportamiento como se muestra en la Ilustración 33. En este contexto, la cobertura del diagnóstico para el

análisis dieléctrico, fisicoquímico (ADFQ) y para el análisis de gases disueltos en el aceite aislante (DGA) es menor en comparación con otros tipos de análisis.

Ilustración 33

Cobertura de los Factores de Entrada (FE).



Nota. La ilustración muestra que, de un total de 413 transformadores en operación (100%), se indica el uso de cada factor de entrada (FE) en este grupo. Se observa que los valores son más bajos para los diagnósticos ADFQ y DGA. Elaboración propia adaptado de (Consortio Grupo SAS - Confipetrol, 2025).

La táctica busca amplificar el número de transformadores muestreados por los diagnósticos (ADFQ) y (DGA); si bien el método del índice de salud tiene logro al aplicar a los equipos que se diagnostican con la totalidad de los factores de entrada, una de las bondades del estudio es la escalabilidad. En este sentido, se desarrolla un marco decisorio (flujo decisorio) que ayude a la organización a buscar candidatos a ser monitoreados en su totalidad de acuerdo con ciertos requisitos que interactúan entre sí y que van desde el riesgo que el equipo tiene para la operación hasta requisitos de su comportamiento operacional.

El marco de decisión tiene desarrollo a través de un diagrama de flujo en el que el riesgo es un elemento importante y ocupa una posición inicial en el proceso. Además, es fundamental valorar la pérdida funcional del transformador candidato a muestrear, con base en la consecuencia para las personas, la economía, el medioambiente, los clientes y la reputación. Esta valoración tiene como referencia la matriz de riesgo, tal como se observa en la Ilustración 34.

Ilustración 34

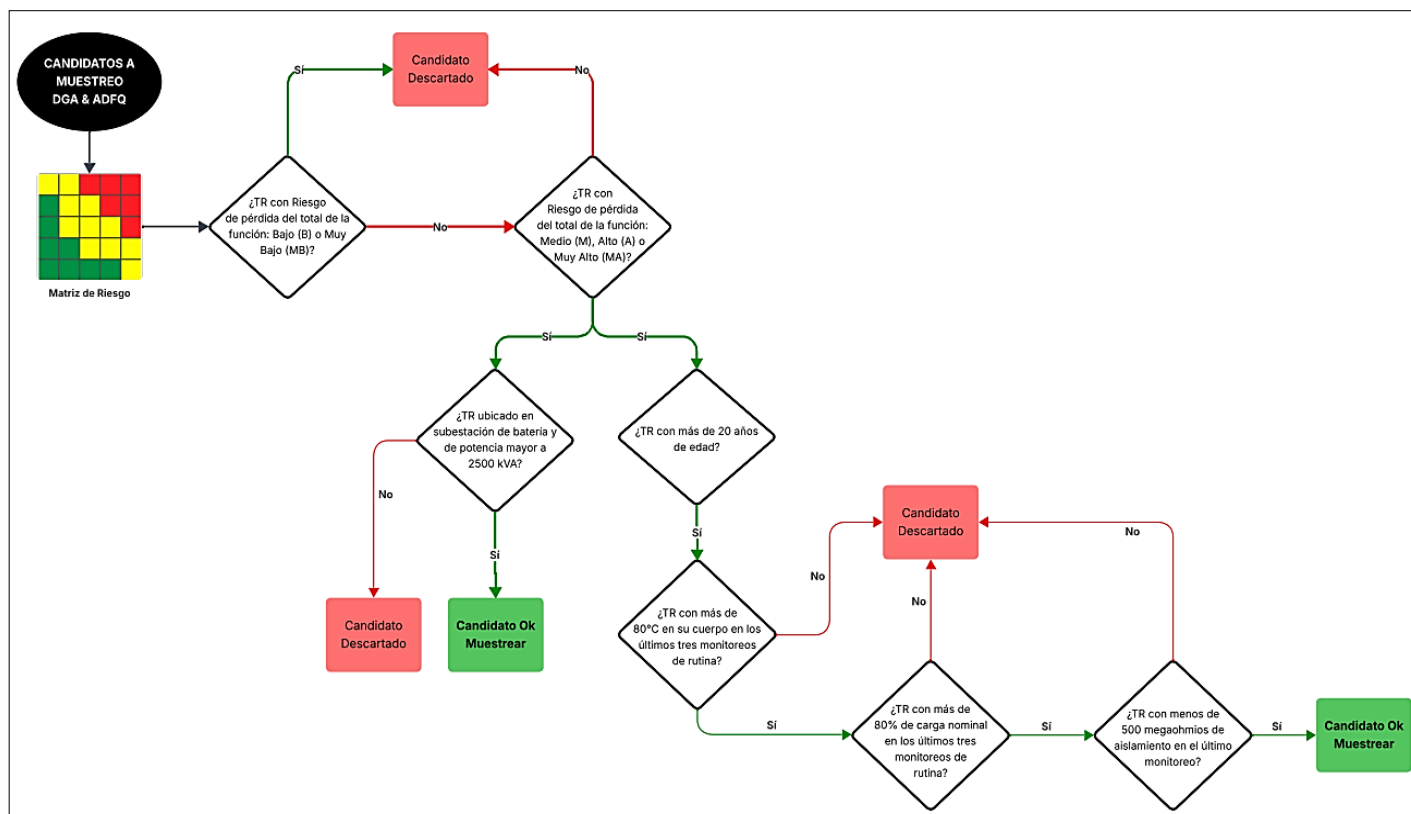
Matriz de Riesgo – Transformador (MT).

MATRIZ VALORACIÓN DE RIESGOS -TRANSFORMADOR										
CONSECUENCIAS						No ha ocurrido en la industria	Ha ocurrido en la Empresa o en la industria	Ha ocurrido en la Empresa en los últimos 10 años	Sucede varias veces al año en la Empresa. De probable ocurrencia en un lapso entre 1 y 5 años	Sucede varias veces al año en el Departamento*. Puede ocurrir en el transcurso del año
CATEGORÍAS						PROBABILIDAD				
G R A V E D A D	PERSONAS	ECONÓMICA (USD\$)	AMBIENTAL	CLIENTES	REPUTACIÓN	A	B	C	D	E
5	Una o Más Fatalidades de trabajadores ó incapacidades permanentes a personal de la comunidad	Mayor a 10 Millones	Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Internacional	M	M	A	A	MA
4	Incapacidad Permanente (Total o Parcial) de trabajadores ó Incapacidad temporal de personal de la comunidad	Mayor a 1 Millon y Menor o Igual a 10 Millones	Importante	Pérdida de clientes de mercado sensible o prioritario	Nacional y con rechazo de un grupo de interés	B	M	M	A	A
3	Incapacidad Temporal (Mayor o Igual a 1 Día) de trabajadores u hospitalización en centros asistenciales de personal de la comunidad	Mayor a 100,000 y Menor o Igual a 1 Millon	Localizada	Desabastecimiento y/o Pérdida de Clientes	Nacional y sin rechazo de un grupo de interés	MB	B	M	M	A
2	Lesión Menor (Sin Incapacidad) en trabajadores ó Primeros auxilios, sin hospitalización a personal de la comunidad	Mayor a 10,000 y Menor o Igual a 1 00.000	Menor	Quejas y/o Reclamos	Nacional y baja importancia	MB	MB	B	M	M
1	Lesión Leve de trabajadores (Primeros Auxilios)	Menor a 10.000	Leve	Incumplimiento de Especificaciones solucionado	Local y baja importancia	MB	MB	MB	B	B
0	Sin Lesión	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	MB	MB	MB	MB	MB

Nota. La ilustración detalla la matriz de evaluación de riesgo para un transformador, al considerar tanto la consecuencia como la probabilidad de la pérdida total de la función, con una clasificación que abarca desde niveles muy bajos (MB) hasta niveles muy altos (MA). Adaptado de (Huertas, 2008).

El marco de decisión respecto a los transformadores a muestrear por (ADFQ) y (DGA) está fundamentado en las técnicas de diagnóstico con las que cuenta la compañía. Para ello, es importante considerar el flujo de proceso, tal como se observa en la Ilustración 35. Este diagrama de flujo combina muchos factores que caracterizan la condición del equipo en vista de establecer requisitos útiles para discriminar qué equipos son candidatos para muestrear.

La táctica busca maximizar la población de equipos con diagnósticos completos, al utilizar muchos datos que la compañía puede manejar, como la edad de los equipos en operación, la temperatura, entre otros. Para el año 2025, el 47,1% de los transformadores no tiene una caracterización total de su condición. En este contexto, el modelo del índice de salud (IH) propuesto es aún más crucial dentro de un sistema que permita aumentar el número de equipos con datos para calcular y tomar decisiones de gestión según su estado.

Ilustración 35*Flujo de Decisión – TR Candidatos a Muestrear.*

Nota. La ilustración muestra el proceso de decisión con aplicación a los transformadores que cumplen con ciertos criterios. Esto ayuda a filtrar los posibles candidatos con potencial de selección a través de todas las técnicas en relación con los factores de entrada (FE). Elaboración propia en apoyo con (Días & María Soledad, 2015).

Plan de Implementación Táctica.

El plan de implementación, para el contexto de operación del Consorcio Servicios Asociados SAS – Confipetrol, pretende establecer y desarrollar, en razón al beneficio que otorga el modelo en términos de aplicabilidad y escalabilidad, el índice de salud (IH) de los transformadores (MT). Además, pretende definir estrategias o tácticas de mantenimiento acordes a la realidad, en función del riesgo desde un punto de vista global y por modos de fallas a través del número (RPN), en concordancia con los objetivos de la organización.

La Tabla 19 presenta las cuatro etapas del plan de implementación, donde se incluyen todos los detalles de cada una de ellas, así como el soporte técnico normativo y el departamento a cargo de realizar su ejecución dentro de la organización.

Tabla 19*Plan de Implementación Táctica.*

PLAN DE IMPLEMENTACIÓN				
ETAPA	DESCRIPCIÓN DE LA ETAPA	DESARROLLO DE LA IMPLEMENTACIÓN	SOPORTE TÉCNICOS / NORMAS	HABILITADORES ORGANIZACIÓN
1	<i>Conceptualización – CBM</i>	Definir el marco de Mantenimiento Basado en Condición (CBM) y explicar las principales técnicas de diagnóstico (DGA, ADFQ, IR, Resistencia de Aislamiento). META: La meta es entender la relación entre el diagnóstico y la toma de decisiones.	ISO 17359:2018 ISO 55000:2024 ISO 55001:2024	Departamento CBM (Líder CBM Eléctrico)
2	<i>Parametrización y Factores de Entrada (FE).</i>	Definir los "Factores de Entrada" (FE) críticos para el cálculo del Índice de Salud, como: Termografía IR, Resistencia de Aislamiento, Gases Disueltos (DGA), Análisis Físicoquímico del Aceite (ADFQ) y Factor de Carga. META: La meta es comprender cómo se derivan los factores de entrada (FE) a partir del AMEF.	Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF)	Departamento CBM (Líder CBM Eléctrico) Departamento Eléctrico (Sup. Eléctrico)
3	<i>Construcción del Índice de Salud (IH)</i>	Recopilar y procesar los datos de los Factores de Entrada (FE). Usar la fórmula general del Índice de Salud con los Factores de Peso (K) y los Factores de Índice de Salud (HIF) propios de cada prueba. META: La meta es calcular el índice de salud usando los datos de los factores de entrada (FE) de los transformadores que tienen todos los diagnósticos disponibles.	ISO 14224:2016 (Para captura de datos) Ecuación 3 (Fórmula de IH).	Departamento CBM (Profesionales CBM Eléctrico)
4	<i>Síntesis y Tácticas</i>	A. Evaluación del riesgo (RPN): Usar el análisis FMECA para determinar el Número de Prioridad de Riesgo (RPN) para los diferentes modos de falla. B. Unión de IH y RPN: Usar el valor del IH y el RPN en un mapa de calor para clasificar el riesgo de cada transformador. C. Qué son las tácticas: Decidir qué tipo de acción de mantenimiento (tipo I, II o III) se debe aplicar al activo, con base en el producto de la conjugación IH-RPN. D. Definición de transformadores con potencial a ser seleccionados para muestreo (flujo de decisión). META: El objetivo es unir el índice de salud (IH) con el riesgo, según los tipos de fallas y el FMECA, para crear acciones de mantenimiento.	ISO 31000:2018 (Gestión de Riesgos) UNE EN 17485:2023 (Estrategias de Mantenimiento)	Líderes Mantenimiento Eléctrico Departamento Confiabilidad (Profesional Confiabilidad) Departamento CBM (Profesionales CBM Eléctrico)

Nota. La tabla describe los detalles de cada una de las fases del plan de implementación. Define el contenido de cada una de ellas con una meta para cada escalón, así como también el soporte normativo y la conexión con cada uno de los roles responsables dentro de la organización. Elaboración propia.

Las etapas metodológicas de implementación tienen como objetivo adaptar al contexto de la compañía un marco técnico y normativo que, en primer lugar, ayude a entender el

mantenimiento basado en condición (CBM) como un elemento clave de la metodología propuesta y busque explicar cómo el desarrollo de un AMEF permite, a través de actividades de detección, identificar lo que en este documento se denomina los factores de entrada (FE), necesarios para calcular el índice de salud (IH) de los transformadores (MT).

La implementación en la fase de síntesis y tácticas muestra la conexión entre el valor total del índice de salud (IH) y el número de prioridad de riesgo (RPN) a través de un mapa de calor. Esto ayuda a identificar qué tipo de acciones de mantenimiento (Predictivo, Preventivo, Correctivo o Intervención inmediata) son las más prioritarias desde la perspectiva del riesgo.

La metodología tiene adaptación al contexto de los transformadores (MT) y busca de forma práctica y creativa entender el estado de los activos para tomar decisiones informadas sobre su comportamiento. Esto a través de pruebas de diagnóstico y el índice de salud (IH), dentro de un marco de decisión que considera el riesgo y, especialmente, en función de los recursos disponibles para el año 2025 en el Consorcio Servicios Asociados SAS – Confipetrol.

Descripción de cómo se alcanza el logro de objetivos.

Los objetivos de este documento tienen alcance a través de procesos claves, con el fin de conectar cada logro con la situación de la organización para así desarrollar actividades relevantes que hagan posible la propuesta.

UNO

La fundamentación técnica alcanza su máximo logro al describir detalladamente las técnicas fundamentales del mantenimiento predictivo eléctrico y del mantenimiento basado en condición (CBM) de acuerdo con lo establecido en la norma internacional ISO 17359:2018. Asimismo, es relevante destacar los procedimientos fundamentales para la evaluación de los transformadores (MT), tales como el Análisis de Gases Disueltos (DGA), el Análisis Dieléctrico y Fisicoquímico del Aceite Aislante (ADFQ), la Termografía Infrarroja (IR) y la prueba de Resistencia de Aislamiento.

La articulación de la relación de las técnicas de diagnóstico con el principio del valor y la toma de decisiones dentro del marco de la gestión de activos alineado con los requisitos de la norma ISO 55000:2024 e ISO 55001:2024 a través de un modelo conceptual que pone de manifiesto el flujo de la integración de las decisiones.

DOS

El objetivo de Variables de Construcción tiene alcance al identificar los factores de entrada (FE) que son importantes para el modelo del índice de salud (IH). Esto a través del uso del análisis de modos y efectos de falla (AMEF), que funciona como un traductor para identificar cinco factores de entrada relacionados con tres elementos que se pueden mantener de los transformadores.

La conjugación del desarrollo del (AMEF) de acuerdo con los modos de falla según el estándar ISO 14224:2016 e ISO 17359:2018, logra identificar los factores de entrada más relevantes y cruciales. Esto a través de una matriz de priorización que define los cinco factores

más representativos como insumo base del desarrollo del modelo de construcción del índice de salud (IH).

TRES

El propósito principal del objetivo de datos captura y factores es brindar una visión detallada sobre cómo los diversos factores de entrada (FE) influyen en la construcción del índice de salud (IH). Estos factores, que tienen fundamento en el análisis dieléctrico y fisicoquímico (ADFQ), el análisis de gases disueltos (DGA), la termografía, las pruebas eléctricas y el factor de carga, desempeñan un papel crucial en el proceso de evaluación de la salud del sistema.

La integración de los datos sobre los factores de entrada está estrechamente vinculada con la norma ISO 14224:2016 en términos de captura y análisis de datos, ya que especifica qué información es importante recopilar según cada uno de los factores de entrada mediante un modelo de plantilla para la recolección de datos conforme a la norma. Esto se realiza al combinar todos los elementos relevantes en relación con cada técnica y variable operacional.

CUATRO

El objetivo de Análisis tiene un alcance dentro del presente documento a través de la construcción y aplicación del modelo de evaluación para el cálculo del índice de salud (IH) en los transformadores (MT), con base en la ponderación de los cinco factores de entrada (FE). En este contexto, se asignan pesos y ponderaciones a cada técnica de diagnóstico en virtud de sus niveles de aceptabilidad según norma al utilizar los factores del índice de salud (HIF) específicos para cada factor de entrada.

El proceso para este objetivo culmina con la construcción de las categorías de la condición a través de los niveles del índice de salud y del semáforo de colores que indica visualmente el estado de la condición para cada transformador. El objetivo se completa al mostrar el modelo de evaluación del estado con cinco ejemplos prácticos usando la fórmula general del índice de salud, seguida de una verificación posterior utilizando el código Python de validación.

CINCO

El objetivo de formalización de las tácticas propone una metodología como marco para la toma de decisiones tácticas dentro del consorcio Servicios Asociados SAS – Confipetrol a los transformadores de media tensión (MT), esto a través de la estructura de un marco decisorio que conecta el índice de salud (IH) y el número de prioridad de riesgo (RPN).

La conexión entre el (IH) y el (RPN) permite la construcción de acciones de mantenimiento diferenciadas de tres tipos (I, II y III). Además, deriva en tácticas del mantenimiento basado en condición y ampliación de la población de transformadores a muestrear por las técnicas de los cinco factores de entrada. Junto con un plan de implementación que engloba su estructura en cuatro etapas alineadas con los estándares internacionales de gestión de activos y riesgos (ISO 55001:2024, UNE EN 17485:2023 e ISO 31000:2018).

SEIS

La propuesta define la estructura de un modelo para el cálculo del índice de salud de los transformadores en media tensión (MT), bajo un proceso de fundamentación metodológica de cuatro etapas, a partir de una base de diagnósticos que caracterizan el comportamiento operativo de los equipos, a través de lo que en el presente documento tiene denominación como los factores de entrada (FE), insumo base para el cálculo del valor global del índice de salud (IH) mediante una metodología de pesos y ponderaciones que permite establecer de manera práctica y escalable el estado de salud de los transformadores.

La metodología actúa como un gran traductor de los datos que antes tenían un enfoque documental sin importancia analítica, en un insumo fundamental y novedoso para la toma de decisiones en la organización de mantenimiento, en un contexto de riesgo al desarrollar un vínculo entre el índice de salud (IH) y el número de prioridad de riesgo (RPN) a través del mapa de calor, con el fin de proponer un marco de decisiones y acciones de mantenimiento bajo una gestión de activos coherente y alineada según los estándares ISO 55001, UNE EN 17485 e ISO 31000.

Resultados más relevantes

El resultado principal es el desarrollo de una metodología que posibilita la cuantificación del estado de los transformadores mediante un índice que caracteriza su condición a partir de diagnósticos que muestran la situación, en el marco operativo del Consorcio Servicios Asociados SAS – Confipetrol. Esto con el propósito de potenciar las acciones que la compañía lleva a cabo en 2025 respecto al manejo de los transformadores, puesto que los datos no son significativos para la toma de decisiones.

La propuesta integra información fundamental del diagnóstico, incluyendo el análisis fisicoquímico, la evaluación de gases disueltos y las pruebas eléctricas, en un marco metodológico respaldado por normativas internacionales. Estas normativas incluyen la ISO 14224, que se refiere a la captura de datos; la UNE EN 17485:2023, que establece la relación entre el mantenimiento y la gestión de activos; y la ISO 31000:2018, que aborda la valoración de riesgos.

El impacto más importante de esta propuesta para la organización es ofrecer una herramienta práctica, clara y coherente que ayude en la toma de decisiones sobre mantenimiento y que esté en línea con los objetivos de la organización. En este contexto, definir un valor global del índice de salud (IH) junto con el número de prioridad de riesgo (RPN) permite elegir diferentes acciones de mantenimiento (correctivo, preventivo y predictivo) según el riesgo operacional. Esto es importante porque el 61,5% de la flota de transformadores (MT) ha estado en funcionamiento por más de 20 años, lo que aumenta el riesgo de fallas debido al envejecimiento.

La metodología actúa como un traductor global que indica alertas tempranas sobre la condición de los equipos. Aborda las necesidades de la organización para transformar los datos de las pruebas existentes en información analítica, al utilizar un marco metodológico adaptable, flexible y escalable según los recursos de la organización en los transformadores (MT) operativos.

Conclusiones

Modelo de Evaluación Integral.

El modelo de evaluación integral establece una forma de calcular el índice de salud (IH) de los transformadores en media tensión (MT) mediante un diagnóstico que describe su funcionamiento a través de cinco factores de entrada (FE).

Transformación de Datos.

La metodología propuesta funciona como un traductor de datos que, para el año 2025, se consideran solo de manera documental, convirtiéndolos en una herramienta esencial para tomar decisiones tácticas en el área de mantenimiento.

Priorización del Riesgo.

La correlación existente entre el índice de salud (IH) y el número de prioridad de riesgo (RPN) es fundamental para la categorización de los activos, permitiendo así la recomendación de diversas medidas de mantenimiento (Tipos I, II y III) en función de la situación actual y el nivel de riesgo asociado a cada uno de los equipos.

Enfoque Activos Críticos.

El 61,5% del total de los transformadores que conforman el parque de activos de la empresa Consorcio Servicios Asociados SAS – Confipetrol ya ha superado los 20 años de vida operativa; por consiguiente, se ha establecido que el enfoque principal se centra en identificar y gestionar los activos que presentan un mayor riesgo de falla debido a su avanzada edad y el proceso natural de envejecimiento.

Validación IA – Python.

Se procedió a llevar a cabo el desarrollo y la validación del modelo a través de la implementación de código en el lenguaje de programación Python, lo cual proporciona un entorno de cálculo altamente adaptable, receptivo y con capacidad de expansión para realizar de manera eficiente la evaluación del estado de los activos.

Recomendaciones

Población.

Es de suma importancia incrementar la cantidad de transformadores que son sometidos a un exhaustivo análisis, dado que para el año 2025 únicamente el 12.3% de estos equipos cuenta con la realización conjunta de las tres técnicas de diagnóstico disponibles (fisicoquímico, análisis de gases disueltos y pruebas eléctricas).

Captura de Datos.

Establecer de forma oficial la adopción del estándar internacional ISO 14224 para la recolección sistemática y exhaustiva de datos de diagnóstico, asegurando la coherencia y relevancia de la información recopilada con el propósito de enriquecer de manera constante el modelo de Integridad.

Cultura de Datos.

Fomentar la concienciación y promover la incorporación de una mentalidad orientada al análisis de datos en el departamento de mantenimiento, con el propósito de garantizar que las decisiones adoptadas se fundamenten en la evaluación de la condición detectable del equipo, evitando así posibles disfunciones y pérdidas de rendimiento.

Táctica.

Se recomienda encarar la ejecución del Plan de Implementación sugerido, el cual se compone de un total de cuatro fases perfectamente alineadas con normativas de renombre a nivel global, tales como la ISO 55001 (Gestión de Activos) y la ISO 31000 (Gestión de Riesgos).

Posibilidad de Trabajos Futuros

Integración Avanzada Inteligencia Artificial.

Implementar algoritmos más sofisticados y complejos, tales como el enfoque de Redes Neuronales de Regresión (GRNN), con el propósito de integrar el estado operativo de los múltiples subsistemas del transformador y realizar pronósticos de posibles fallos con una precisión notablemente superior.

Monitoreo Tiempo Real.

Transitar de un enfoque centrado en la realización de diagnósticos periódicos a la implementación de un sistema de Mantenimiento Basado en Condición (CBM) con monitoreo continuo en tiempo real, lo cual posibilita una reacción instantánea frente a posibles variaciones repentinas en los parámetros operativos.

Degradación del Papel Aislante.

Incorporar técnicas específicas para verificar la degradación del papel aislante (aislamiento sólido), un parámetro primordial para prolongar la vida útil restante que no fue el foco principal de este estudio.

Escalabilidad a otros tipos de Activos -Oil & Gas.

Modificar y ajustar la metodología del Índice de Salud para aplicarla a otros equipos críticos de superficie en el sector de Oil & Gas, tales como variadores de frecuencia o motores de bombas electrosomergibles (BES), con el fin de mejorar la gestión de mantenimiento y optimizar el rendimiento operativo de dichos activos.

Referencias

- Abdulla, H., Sleptchenko, A., & Nayfeh, A. (2024). Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114342>
- Abu-Elanien, A. E. B., Salama, M. M. A., & Ibrahim, M. (2012). Calculation of a health index for oil-immersed transformers rated under 69 kV using fuzzy logic. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4), 2029-2036. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2205165>
- Agudelo, L., Velilla, E., & López, J. M. (2014). Estimación De La Carga De Transformadores De Potencia Utilizando Una Red Neuronal Artificial. *Información tecnológica*, 25(2), 15-23. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000200003>
- Akbari, M. (2013). Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Power Transformers. *28th International Power System Conference*. https://www.academia.edu/36527518/Failure_Modes_and_Effects_Analysis_FMEA_for_Power_Transformers
- Ali, M. S., Abu Bakar, A. H., Omar, A., Abdul Jaafar, A. S., & Mohamed, S. H. (2023). Conventional methods of dissolved gas analysis using oil-immersed power transformer for fault diagnosis: A review. *Electric Power Systems Research*, 216, 109064. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2022.109064>
- Aliani, E., & Romero, A. A. (2014). Consideraciones para la gestión de transformadores de potencia, en el marco de la ISO 55000. *2014 IEEE Biennial Congress of Argentina, ARGENCON 2014*, 594-599. <https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2014.6868556>
- Almeida, N., Trindade, M., Komljenovic, D., & Finger, M. (2022). A conceptual construct on value for infrastructure asset management. *Utilities Policy*, 75, 101354. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2022.101354>

- Alshehawy, A. M., Mansour, D. E. A., Ghali, M., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. F. (2021). Photoluminescence Spectroscopy Measurements for Effective Condition Assessment of Transformer Insulating Oil. *Processes* 2021, Vol. 9, Page 732, 9(5), 732. <https://doi.org/10.3390/PR9050732>
- Álvarez, R. (2007, mayo 20). *Mantenimiento De Transformadores De Potencia*. https://www.academia.edu/126594161/Mantenimiento_De_Transformadores_De_Potencia
- Araujo, M. M., Almeida, O. M., Barbosa, F. R., & Menezes, A. G. C. (2024). Enhancing gas formation theory assessment in power transformers by using decision tree transparency and new guess into decomposition temperatures of insulating mineral oil. *Neural Computing and Applications*, 36(7), 3259-3266. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-09216-2>
- Arias, R., & Mejia, J. (2018). Health index for transformer condition assessment. *IEEE Latin America Transactions*, 16(12), 2843-2849. <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8804247>
- Azuero, Á. E. A. (2019). Significatividad del marco metodológico en el desarrollo de proyectos de investigación. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 4(8), 110-127. <https://doi.org/10.35381/R.K.V4I8.274>
- Blanco, E., Mora, L., & Solano Eder. (2018). *Distribuciones No Tradicionales Para Medir Confiabilidad, Mantenibilidad Y Disponibilidad Cmd, Que Se Ajustan A Varias Fases De La Curva De Davies* (1.^a ed.). ECOE.
- Blažević, D., Keser, T., Glavaš, H., & Noskov, R. (2023). Power Transformer Condition-Based Evaluation and Maintenance (CBM) Using Dempster–Shafer Theory (DST). *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 6731, 13(11), 6731. <https://doi.org/10.3390/APP13116731>
- Bohatyrewicz, P., & Mroziak, A. (2021). The Analysis of Power Transformer Population Working in Different Operating Conditions with the Use of Health Index. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 5213, 14(16), 5213. <https://doi.org/10.3390/EN14165213>
- Bolaños, L. P. (s. f.). *Mantenimiento Predictivo De Transformadores Por Análisis Tendencial De Resultados De Pruebas Dieléctricas Y Aceites En Transformadores De Potencia Del*

- Departamento Central Del Inde*. Recuperado 28 de noviembre de 2025, de https://www.academia.edu/34271084/MANTENIMIENTO_PREDICTIVO_DE_TRANSFORMADORES_POR_ANALISIS_TENDENCIAL_DE_RESULTADOS_DE_PRUEBAS_DIELECTRICAS_Y_ACEITES_EN_TRANSFORMADORES_DE_POTENCIA_DEL_DEPARTAMENTO_CENTRAL_DEL_INDE
- Bonalde, H. P. (2024, enero 1). Resistencia De Aislamiento En Transformadores Sumergidos En Aceite Dieléctrico. *Resistencia de Aislamiento en Transformadores Aceite*. https://www.academia.edu/114825549/Resistencia_de_Aislamiento_en_Transformadores_SUMERGIDOS_EN_ACEITE_DIELECTRICO
- Brauer, S. (2016, junio 13). *La herramienta más poderosa de la industria: Análisis de gases disueltos en aceite (GDA) - Doble Engineering Company*. <https://www.doble.com/la-herramienta-mas-poderosa-de-la-industria-analisis-de-gases-disueltos-en-aceite-gda/?lang=es>
- BSI EN ISO 14224. (2016). *BSI EN ISO 14224 Industrias de Petróleo, Petroquímica y Gas Natural — Recolección e Intercambio de Datos de Confiabilidad y Mantenimiento de Equipos*. <https://doi.org/www.iso.org/directives>
- 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>
- Cañizares, F. R. C., Sevilla, G. M. L., Aillón, T. M. F., & Jacome, D. J. R. (2023). Diffuse expert system for the diagnosis of the health index of electric transformers. *Ingeniare*, 31, 1-17. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052023000100227>
- Carlomagno, G. M., & Cardone, G. (2010). Infrared thermography for convective heat transfer measurements. *Experiments in Fluids*, 49(6), 1187-1218. <https://doi.org/10.1007/S00348-010-0912-2>

- Carnaval, G. (2023, julio 13). *Las decisiones informadas en la gestión de activos fijos*. - GRUPO CPCON. <https://www.grupocpcon.com/es-mx/las-decisiones-informadas-en-la-gestion-de-activos-fijos/>
- Castellanos, E. (s. f.). *Conversión de Energía Catedrático: Sistema de refrigeración de los transformadores*. Recuperado 14 de octubre de 2025, de https://www.academia.edu/10961766/Conversi%C3%B3n_de_Energ%C3%ADa_Catedr%C3%A1tico_Sistema_de_refrigeraci%C3%B3n_de_los_transformadores
- Castro-Meneses, J. M., Gómez-Ramírez, G. A., & Núñez-Mata, O. (2022a). Índice de estimación de la vida residual en transformadores eléctricos de potencia basado en condición. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i4.5776>
- Castro-Meneses, J. M., Gómez-Ramírez, G. A., & Núñez-Mata, O. (2022b). Índice de estimación de la vida residual en transformadores eléctricos de potencia basado en condición. *Revista Tecnología en Marcha*, 35, ág. 71-83. <https://doi.org/10.18845/TM.V35I4.5776>
- Cerón, A. F., Echeverry, D. F., Aponte, G., & Romero, A. A. (2015). Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos en Aceite Mineral con Voltajes entre 69kV y 230kV usando Lógica Difusa. *Información tecnológica*, 26(2), 107-116. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000200013>
- Chirinos, J. (2019, noviembre 19). *Bajo la Norma ISO 17359:2018 cómo optimizar el plan de monitoreo de condición*. <https://www.revistaimg.com/como-optimizar-el-plan-de-monitoreo-de-condicion-bajo-la-norma-iso-173592018/>
- CIGRE GT A2.62. (2024). *Análisis de la Confiabilidad de los Transformadores de CA*. <https://doi.org/www.e-cigre.org>
- Ciliberti, V. A., Østebø, R., Selvik, J. T., & Alhanati, F. J. S. (2019). Optimize safety and profitability by use of the ISO 14224 standard and big data analytics. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, 2019-May*. <https://doi.org/10.4043/29634-MS>

- Consorcio Grupo SAS - Confipetrol. (2025). *Informe de Población de Transformadores Media Tensión Caracterizados*.
- Consultores, M. (2017). ¿Qué es Gestión de Activos? MC 2016 - 2017.
https://www.academia.edu/38199977/_Que_es_Gestio_n_de_Activos
- Crespo, G., & Rodríguez, R. (2015, mayo). *Análisis de gases disueltos para monitoreo y diagnóstico de transformadores de fuerza en servicio*.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000200007
- Díaz, & María Soledad. (2015). *Diagnóstico del Estado de Transformadores de Potencia (AFQ DGA) - Studocu*. 2, 62-70. <https://doi.org/2422-6424>
- Díaz, T. (2022). *Manual del Participante - ISO 14224 en la Gestión de Activos*.
<https://www.studocu.com/ec/document/instituto-superior-tecnologico-central-tecnico/gestion-industrial/manual-del-participante-aplicando-iso-14224/127352665>
- Elele, U., Nekahi, A., Arshad, A., & Fofana, I. (2022). Towards Online Ageing Detection in Transformer Oil: A Review. *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 7923, 22(20), 7923.
<https://doi.org/10.3390/S22207923>
- English, L., Yunusa-Kaltungo, A., Kidd, M., & Labib, A. (2022). Development of a complementary framework for implementing asset register solutions. *Engineering Reports*, 4(6).
<https://doi.org/10.1002/ENG2.12493>
- Fernando-Navas, D., Cadavid-Ramírez, H., & Echeverry -Ibarra, D. F. (2012). Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos. *Ingeniería y Universidad*, 16(1), 201-223. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262012000100012&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Gallo, E. (2010). *Diagnóstico y Mantenimiento a Transformadores en Campo* (2.^a ed.). Gerencia & Diseño LTDA.

- Ganem Karlen, C. (2018). Termografía Infrarroja Para El Diagnóstico Térmico Confiable Con Alta Replicabilidad Y Bajo Costo De Viviendas En Mendoza, Argentina. *Revista hábitat sustentable*, 8(2), 80-89. <https://doi.org/10.22320/07190700.2018.08.02.06>
- GFAM Global Forum on Maintenance & Asset Management. (2024). *El Panorama de la Gestión de Activos* (3.^a ed.). <https://doi.org/gfman.org>
- Ghanad, A. (2023). An Overview of Quantitative Research Methods. *International Journal Of Multidisciplinary Research Analysis*, 06(08). <https://doi.org/10.47191/IJMRA/V6-I8-52>
- Gómez-Ramírez, G. A. (2018). Medición de Descargas Parciales en Transformadores de Potencia bajo los estándares internacionales IEC e IEEE. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 70-80. <https://doi.org/10.18845/TM.V31I1.3498>
- Gorgan, B., & Notingher, P. (2010). *Cálculo de índices de salud de transformadores de potencia* (34).
https://www.researchgate.net/publication/228582140_Calculation_of_power_transformers_health_indexes
- Guevara, G., Verdesoto, A., & Castro, N. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *RECIMUNDO: Revista Científica de la Investigación y el Conocimiento*, ISSN-e 2588-073X, Vol. 4, N°. 3, 2020, págs. 163-173, 4(3), 163-173.
[https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(3\).julio.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173)
- Guo, H., & Guo, L. (2022). Health index for power transformer condition assessment based on operation history and test data. *Energy Reports*, 8, 9038-9045.
<https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.07.041>
- Gutiérrez Chávez, B. A., & Montes de Oca-Ramírez, G. (2021a). Determinación de fallas en transformadores de potencia inmersos en aceite mineral aislante basándose exclusivamente en el DGA y mediante la evaluación del NEI. *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, 4(3), 208-223. <https://doi.org/10.37636/RECIT.V43208223>

- Gutiérrez Chávez, B. A., & Montes de Oca-Ramírez, G. (2021b). Determinación de fallas en transformadores de potencia inmersos en aceite mineral aislante basándose exclusivamente en el DGA y mediante la evaluación del NEI. *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, 4(3), 208-223. <https://doi.org/10.37636/RECIT.V43208223>
- Hardjomidjojo, H., Pranata, C., & Baigorria, G. (2022). Rapid assessment model on risk management based on ISO 31000:2018. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1063(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1063/1/012043>
- Hernández, O., Díaz, E., & Pérez, R. (2024). *Medición del factor de potencia del aislamiento como ensayo de diagnóstico en transformadores de 110 kV | Request PDF*. 45. https://www.researchgate.net/publication/386053864_Medicion_del_factor_de_potencia_d_el_aislamiento_como_ensayo_de_diagnostico_en_transformadores_de_110_kV
- Huang, J., You, J. X., Liu, H. C., & Song, M. S. (2020). Failure mode and effect analysis improvement: A systematic literature review and future research agenda. *Reliability Engineering & System Safety*, 199, 106885. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2020.106885>
- Huertas, S. (2008). *Dirección De Responsabilidad Integral Versión: 01 Ecp-Dri-I-007 Uso De La Matriz De Valoración De Riesgos - RAM Fecha divulgación: 31 de marzo de 2008 Página 1 de 13*. https://www.academia.edu/32399224/DIRECCCI%C3%93N_DE_RESPONSABILIDAD_INTEGRAL_Versi%C3%B3n_01_ECP_DRI_I_007_USO_DE_LA_MATRIZ_DE_VALORACI%C3%93N_DE_RIESGOS_RAM_Fecha_divulgaci%C3%B3n_31_de_marzo_de_2008_P%C3%A1gina_1_de_13
- IEEE C57.104. (2019). *IEEE C57.104-2019 Guía IEEE para la interpretación de gases generados en transformadores sumergidos en aceite mineral*. <https://doi.org/http://standards.ieee.org/ipr/disclaimers.html>.

- Islam, M. M., Lee, G., Hettiwatte, S. N., & Williams, K. (2018). Calculating a health index for power transformers using a subsystem-based GRNN approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(4), 1903-1912. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2770166>
- ISO 17359 Organización Internacional de Normalización. (2018). *ISO 17359 Monitoreo y diagnóstico de condición de máquinas - Directrices generales*. <https://doi.org/www.iso.org>
- ISO 55000 - Organización Internacional de Normalización. (2024). *ISO 55000:2024 Gestión de Activos - Vocabulario, Visión General y Principios*. <https://doi.org/www.iso.org>
- Jahromi, A. N., Piercy, R., Cress, S., Service, J. R. R., & Fan, W. (2009). An approach to power transformer asset management using health index. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 25(2), 20-34. <https://doi.org/10.1109/MEI.2009.4802595>
- Jiang, B., Geng, Y., Wang, H., ... B. Q.-2017 I. E., & 2017, undefined. (2017). Power transformer condition assessment method based on environment and property analysis. *ieeexplore.ieee.org* B Jiang, Y Geng, H Wang, B Qi, M Huang, Z Rong 2017 *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2017*•*ieeexplore.ieee.org*. <https://doi.org/ieeexplore.ieee.org>
- Jiménez-Araya, G., & Gómez-Ramírez, G. A. (2016). Comportamiento de los aislamientos sólidos de transformadores de potencia en condiciones ambientales no controladas. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(3), 99. <https://doi.org/10.18845/TM.V29I3.2891>
- Juan, Galeano, C., Alejandro, C., Becerra, R., Enrique, L., & Cuartas, E. (2015). Experiencia colombiana en reparación de núcleos de transformadores de potencia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27), 235-255. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242015000200015&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Jusner, P., Schwaiger, E., Potthast, A., & Rosenau, T. (2021). Thermal stability of cellulose insulation in electrical power transformers – A review. *Carbohydrate Polymers*, 252, 117196. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.117196>

- Kabir, M. A., Ahmed, F., Islam, M. M., & Ahmed, Md. R. (2024). Python For Data Analytics: A Systematic Literature Review Tools, Techniques, And Applications. *Academic Journal On Science, Technology, Engineering & Mathematics Education*, 4(04), 134-154. <https://doi.org/10.69593/AJSTEME.V4I04.146>
- Kalathil, M. J., Renjith, V. R., & Augustine, N. R. (2020). Failure mode effect and criticality analysis using dempster shafer theory and its comparison with fuzzy failure mode effect and criticality analysis: A case study applied to LNG storage facility. *Process Safety and Environmental Protection*, 138, 337-348. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2020.03.042>
- Kim, C.-M., Kim, Y.-S., Gil, H.-J., & Shong, K.-M. (2016). Investigation and Estimation of Transformer Load Factor for Rationalization of Transformer's Efficiency. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 30(1), 96-101. <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2016.30.1.096>
- Krathwohl, D. R. (2002). A revision of bloom's taxonomy: An overview. *Theory into Practice*, 41(4), 212-218. https://doi.org/10.1207/S15430421TIP4104_2
- Lee, S., Ottermo, M. V., Hauge, S., & Lundteigen, M. A. (2023). Towards standardized reporting and failure classification of safety equipment: Semi-automated classification of failure data for safety equipment in the operating phase. *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 1485-1493. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2023.07.061>
- Li, S. ;, Li, X. ;, Cui, Y. ;, Li, H., Li, S., Li, X., Cui, Y., & Li, H. (2023). Review of Transformer Health Index from the Perspective of Survivability and Condition Assessment. *Electronics* 2023, Vol. 12, Page 2407, 12(11), 2407. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS12112407>
- Lizarzaburu, E., Chavez, M., Garcia, C., Noriega, E., & Tinoco, D. (2025). ISO 31000 guide: Steps used in all types of organizations in Latin American Countries. *Multidisciplinary Reviews*, 8(7). <https://doi.org/10.31893/MULTIREV.2025212>

- Llanes, A., González, D., & Borroto, Y. (2022, septiembre 5). *Mantenimiento Basado en el Riesgo a equipos de la empresa agroindustrial azucarera "JOSÉ MARÍA PÉREZ CAPOTE"*. <https://www.researchgate.net/publication/361912089>
- Lourdes del Rocío Sánchez-Delgado, M., Angelica Rodríguez-Esquivel, M., Castillo-Corral Tecnológico Nacional de México, D., Enrique Manuel Gutiérrez-Gómez, M., & Elena Valdéz-Gutiérrez, M. (2023). Aplicación del Análisis de Modo y Efecto de Falla en Producción y su Impacto en Costos de No Calidad en una Empresa Refresquera. *Conciencia Tecnológica*, 66, 58-69.
- M, D., & I, B. (2019). *Cigre 771 Advances in DGA Interpretation Technical Brochure*. <https://doi.org/https://www.e-cigre.org/publications/detail/771-advances-in-dga-interpretation.html>
- Magnetron Transformadores. (2025). *Elevadores de Frecuencia Variable (SUT Step Up Transformer)*. <https://www.magnetron.com.co/es/productos/petrolero/transformadores-de-frecuencia-variable-o-sut>
- Martínez Gomez, M. (2022). Transformers. *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering: Volumes 1-3*, 1, V1-247-V1-255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00126-4>
- Martins, M. A. (2014). Condition and risk assessment of power transformers: A general approach to calculate a Health Index. *Ciencia e Tecnologia dos Materiais*, 26(1), 9-16. <https://doi.org/10.1016/J.CTMAT.2014.09.002>
- Medina, R. (2024, enero 8). *El estándar UNE EN 16646:2015 y su aporte en cuanto a las responsabilidades de Mantenimiento a lo largo del ciclo de vida de los activos | LinkedIn*. <https://www.linkedin.com/pulse/el-est%C3%A1ndar-une-en-166462015-y-su-aporte-cuanto-las-robinson-jos%C3%A9-pmgie/>
- Mendes, J. C. (2017, febrero). *ABB - Transformador de Potencia en Alta Tensión*.

- Montané-García, J. J., Hernández-Areu, O. N., & Del-Castillo-Serpa, A. M. (2021). Acercamiento al cálculo de índice de salud de transformadores de fuerza en Cuba. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/TM.V34I7.6010>
- Naderian, A., Cress, S., Piercy, R., Wang, F., & Service, J. (2008). An approach to determine the health index of power transformers. *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 192-196. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570308>
- Nanfak, A., Samuel, E., Fofana, I., Meghnefi, F., Ngaleu, M. G., & Hubert Kom, C. (2024). Traditional fault diagnosis methods for mineral oil-immersed power transformer based on dissolved gas analysis: Past, present and future. *IET Nanodielectrics*, 7(3), 97-130. <https://doi.org/10.1049/NDE2.12082>
- NETA. (2021). *NETA ATS-2021 Standard for Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems*. <https://doi.org/www.netaworld.org>
- Nurcahyanto, H., Nainggolan, J. M., Ardita, I. M., & Hudaya, C. (2019). Analysis of Power Transformer's Lifetime Using Health Index Transformer Method Based on Artificial Neural Network Modeling. *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 2019-July*, 574-579. <https://doi.org/10.1109/ICEEI47359.2019.8988870>
- Orejuela, V. (2021). *Modelo computacional para el cálculo de la cargabilidad de transformadores*. https://www.academia.edu/8308760/Modelo_computacional_para_el_c%C3%A1lculo_de_la_cargabilidad_de_transformadores
- Ortiz, F., Fernandez, I., Ortiz, A., Renedo, C. J., & Delgado, F. (2016). Health indexes for power transformers: a case study. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 32(5), 7-17. <https://doi.org/10.1109/MEI.2016.7552372>
- Paez, J. A. (s. f.). *Guía básica para la implementación de la gestión de activos en empresas de energía*. Recuperado 12 de octubre de 2025, de https://www.academia.edu/11498956/Gu%C3%ADa_b%C3%A1sica_para_la_implementaci%C3%B3n_de_la_gesti%C3%B3n_de_activos_en_empresas_de_energ%C3%ADa

- Parra, C., Baldi, C., Cuadra, C., Araya, J., Núñez, J., Ulloa, C., & González-Prida, V. (2024). Implementación de un plan de gestión de activos según la norma ISO 55001 en la Central de Generación Eléctrica Colmito. *Revista de Activos de Ingeniería*, 2(2), 041-052. <https://doi.org/10.29073/RAE.V2I2.913>
- Parra, C., & Crespo, A. (2015). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos* (2.^a ed.).
- Perez, R., & Colque, F. (s. f.). *Estrategias De Mantenimiento Predictivo Aplicables A Transformadores De Potencia De Una Empresa Eléctrica*. Recuperado 15 de noviembre de 2025, de https://www.academia.edu/37080049/ESTRATEGIAS_DE_MANTENIMIENTO_PREDICTIVO_APLICABLES_A_TRANSFORMADORES_DE_POTENCIA_DE_UNA_EMPRESA_ELECTRICA
- Pérez, Y., & Coutín, A. (2005). La gestión del conocimiento: un nuevo enfoque en la gestión empresarial. *ACIMED*, 13(6), 0-0. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1024-94352005000600004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Popova, L., Nerg, J., & Pyrhönen, J. (2011). Combined Electromagnetic and thermal design platform for totally enclosed induction machines. *SDEMPED 2011 - 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, 153-158. <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2011.6063617>
- Prasojo, R. A., Maulidevi, N. U., Soedjarno, B. A., & Suwarno, S. (2019). Health Index Analysis of Power Transformer with Incomplete Paper Condition Data. *4th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, CATCON 2019*. <https://doi.org/10.1109/CATCON47128.2019.CN0073>

- Quatrini, E., Costantino, F., Di Gravio, G., & Patriarca, R. (2020). Condition-Based Maintenance—An Extensive Literature Review. *Machines* 2020, Vol. 8, Page 31, 8(2), 31. <https://doi.org/10.3390/MACHINES8020031>
- Quitiaquez, W., Simbaña, A., Simbaña, I., Isaza2, C., Nieto, C., Quitiaquez, P., & Toapanta, F. (2019). Análisis Comparativo entre el Aceite Mineral y el Aceite Vegetal Utilizados como Dieléctricos y Refrigerantes para Transformadores de Potencia. *Revista Técnica «Energía»*, 16(1). <https://doi.org/10.37116/REVISTAENERGIA.V16.N1.2019.338>
- Rajote C, Foata M, & Jarman P. (2011). *CIGRE 445 Guide for Transformer Maintenance Working 445 Group A2.34*. <https://doi.org/978-2-85873-134-3>
- RETIE Ministerio de Minas y Energía. (2024). *RETIE - Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - Resolución 40117 de 2024*. <https://doi.org/menergia@minenergia.gov.co>
- Rodríguez, J., & Orejuela, V. (2013). Modelo computacional para determinar el nivel óptimo de cargabilidad de los transformadores de potencia del sistema nacional interconectado. *Ingenius*, 9. <https://doi.org/10.17163/INGS.N9.2013.05>
- Rondón, I., Calanche, V., & Rojas, F. (2013). Metodología para estimar la vida útil del autotransformador AT-4, 700 MVA de la subestación Guayana debido a sobrecargas. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 17(67), 57-67. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212013000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Salamanca, S., Céspedes, A., & Aponte, G. (2021). Monitoreo en línea de transformadores de potencia. Una revisión crítica de sensores de temperatura, humedad del aceite y gases disueltos. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/TM.V34I7.6019>
- Sánchez Molina, A. A., Murillo Garza, A., Sánchez Molina, A. A., & Murillo Garza, A. (2021). Enfoques metodológicos en la investigación histórica: cuantitativa, cualitativa y comparativa. *Debates por la historia*, 9(2), 147-181. <https://doi.org/10.54167/DEBATES-POR-LA-HISTORIA.V9I2.792>

- Sarria-Arias, J. T., Guerrero-Bello, N. A., Rivas-Trujillo, E., Tatiana, J., Andrea, S.-A.-N., & Rivas-Trujillo, G.-B.-E. (2014). Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia. *Revista Facultad de Ingeniería*, 23(36), 105-122. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292014000100010&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Segura-Monge, M. Á., Gómez-Ramírez, G. A., Barahona-Guzmán, G., Montero-Jiménez, J. J., Segura-Monge, M. Á., Gómez-Ramírez, G. A., Barahona-Guzmán, G., & Montero-Jiménez, J. J. (2024). Hacia el mejoramiento de la gestión de activos de equipos críticos en Pymes: propuesta de metodología e implementación. *Revista Tecnología en Marcha*, 37(2), 95-108. <https://doi.org/10.18845/TM.V37I2.6699>
- Selvik, J. T., & Bellamy, L. J. (2020). Addressing human error when collecting failure cause information in the oil and gas industry: A review of ISO 14224:2016. *Reliability Engineering & System Safety*, 194, 106418. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2019.03.025>
- Servicios Asociados. (2018). *Grupo S.A.S.* <https://gruposas.co/mision-vision-objetivos>
- Shanghai Co., Ltd. (2024, diciembre). *Aumento de temperatura en transformadores.* <https://shinenergy.net/transformer-temperature-rise-a-comprehensive-guide/>
- Shin, J. H., & Jun, H. B. (2015). On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(2). <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2014.12.006>
- Singh, A., & Swanson, A. G. (2018). *Desarrollo de un índice de riesgo y salud vegetal para transformadores de distribución eléctrica en Sudáfrica.* https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1991-16962018000300002
- Sivilla, J. I., Sierra Gil, E. I., & Contreras Barrera, R. I. (2023). Determinación de la causa raíz de fallas en transformadores de distribución. *Ingeniería Energética*, 44(3), 56-65. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012023000300056&lng=en&nrm=iso&tlng=es

- Soltanali, H., & Ramezani, S. (2023). Smart Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for Safety–Critical Systems in the Context of Industry 4.0. *Industrial and Applied Mathematics, Part F2111*, 151-176. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9909-3_7
- Stamatis D.H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis* (2.^a ed.).
- Tamma, W. R., Prasojo, R. A., & Suwarno. (2021a). High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate. *High Voltage*, 6(2), 314-327. <https://doi.org/10.1049/HVE2.12074>
- Tamma, W. R., Prasojo, R. A., & Suwarno. (2021b). High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate. *High Voltage*, 6(2), 314-327. <https://doi.org/10.1049/HVE2.12074>
- Tavares, L. (2020, agosto 31). *Prioridades en Mantenimiento - Predictiva21*. <https://predictiva21.com/2-5-prioridades-mantenimiento>
- Teixeira, H. N., Lopes, I., & Braga, A. C. (2020). Condition-based maintenance implementation: a literature review. *Procedia Manufacturing*, 51, 228-235. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.10.033>
- UNE EN 16646 Asociación Española de Normalización y Certificación. (2015). *UNE EN 16646:2015 Mantenimiento en la Gestión de los Activos Físicos*. <https://doi.org/www.aenor.es>
- UNE EN 17485 Asociación Española de Normalización. (2023). *UNE EN 17485 Mantenimiento en el marco de la gestión de activos físicos*. <https://doi.org/www.une.org>
- Urruty, Y. (2025, julio 2). *Desbloqueando la excelencia en el mantenimiento de equipos con la norma ISO 14224*. <https://spartakustech.com/reliability-blog/unlocking-equipment-reliability-and-maintenance-excellence-with-iso-14224/>
- Uyaguari Castillo, H. E., Pardo Jiménez, J. S., & Bautista Rivas, J. G. (2025). Análisis termográfico en los sistemas eléctricos de la subestación eléctrica CNEL EP Quito ubicada

- en Santo Domingo. *Revista Científica Multidisciplinar G-nerando*, 6(1).
<https://doi.org/10.60100/RCMG.V6I1.389>
- Villacrés-Parra, S. R., Viscaíno-Cuzco, M. A., & Gallegos-Londoño, C. M. (2021). Metodologías de optimización del mantenimiento enfocado a transformadores de potencia: Una revisión del estado del arte. *ConcienciaDigital*, 4(3.1), 238-252.
<https://doi.org/10.33262/CONCIENCIADIGITAL.V4I3.1.1827>
- Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2013a). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 21(1), 125-138. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052013000100011>
- Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2013b). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 21(1), 125-138. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052013000100011>
- Woodhouse, J. (2019). What is the value of asset management? *Infrastructure Asset Management*, 6(2), 102-108. <https://doi.org/10.1680/JINAM.17.00040>
- Zahra, S. T., Imdad, S. K., Khan, S., Khalid, S., & Baig, N. A. (2025). Power transformer health index and life span assessment: A comprehensive review of conventional and machine learning based approaches. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 139, 109474. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2024.109474>
- Zhang, M., Yu, M., Zhou, W., Liang, Y., Lei, S., Shi, Y., & Qu, L. (2024). Research on the variation of dielectric properties of oil-paper insulation for power equipment over a wide temperature range. *High Voltage*, 9(3), 648-658. <https://doi.org/10.1049/HVE2.12397>
- Zhu, T., Ran, Y., Zhou, X., & Wen, Y. (2024). *A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches*. <https://doi.org/10.1109/COMST.2025.3567802>

- Ziv, A. (2009). Biodegradación de compuestos orgánicos persistentes (COP): i. El caso de los bifenilos policlorados (PCB). *Acta Biológica Colombiana*, 14(1), 57-88.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2009000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Zorrilla, J. D., Céspedes, A., García, D. F., Zorrilla, J. D., Céspedes, A., & García, D. F. (2020). Técnicas para el diagnóstico de transformadores de potencia: Una revisión crítica. *Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 184-203. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000200184>

Glosario de Definiciones

Acciones de Mantenimiento.

Un conjunto diversificado de actividades estratégicas y tácticas diseñadas con el propósito fundamental de conservar y salvaguardar un activo en óptimas condiciones operativas a lo largo del tiempo.

Análisis Dieléctrico y Fisicoquímico.

Es una técnica que busca determinar la calidad del fluido (aceite aislante), el envejecimiento del papel aislante y verificar su contenido de humedad o lodos en el fondo del transformador.

Análisis de Gases Disueltos.

Es una técnica de diagnóstico para transformadores basada en la descomposición de las moléculas de hidrocarburos del aceite aislante y del papel por fallas térmicas o eléctricas. Su objetivo es supervisar el transformador, anticipar fallas y señalarlas, así como su tipo y ubicación.

Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF).

Metodología para reconocer y valorar fallas potenciales en un equipo, proceso o sistema, analizando las causas y consecuencias, y permitiendo establecer prioridades de acciones correctivas para mejorar la calidad, seguridad y confiabilidad.

Factores de Entrada (FE).

Son las pruebas eléctricas y el análisis de gases disueltos en el aceite aislante de los transformadores. Estos elementos son los datos de entrada o variables operativas para calcular el valor global del Índice de Salud (IH) de los activos.

Factor de Carga (β).

Es el valor que permite el cálculo en porcentaje de carga de un transformador. Se calcula con base en la relación entre la carga promedio (S) en corriente eléctrica en un lapso, respecto a la capacidad nominal (Se) o potencia nominal del transformador (Dato de Placa).

Índice de Salud (IH).

Es un indicador general de la condición de los equipos, expresado en un número ponderado que resume los resultados de operación, inspección y pruebas.

Mantenimiento Basado en Condición (CBM).

Estrategia predictiva basada en el monitoreo en tiempo real del estado y desempeño de un equipo para definir cuándo se requiere mantenimiento.

Número de Prioridad de Riesgo (RPN).

Herramienta numérica utilizada en el análisis de riesgos para clasificar y ordenar por prioridad los riesgos potenciales. Se obtiene multiplicando tres factores: Gravedad (S) del fallo, Ocurrencia (O) del fallo y Detección (D) del fallo.

Resistencia de Aislamiento.

Es una forma de medir la calidad y la integridad del aislamiento en equipos y circuitos eléctricos (cables, motores, transformadores, etc.).

Termografía Infrarroja IR.

Es una técnica que convierte la radiación infrarroja en una imagen que muestra la distribución de temperatura en la superficie de un objeto.