



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**CATASTRO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN SUBESTACIONES  
ELÉCTRICAS DE LATACUNGA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE  
SALUD.**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**AUTOR(ES):**

**Synthia Maribel Mora Arboleda**

**Luis Larisson Acosta Lozano**

**TUTOR:**

**Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes**


**LATACUNGA, MARZO 2025**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Acosta Lozano Luis Larisson, con cédula de ciudadanía No. 050379682-3, Mora Arboleda Synthia Maribel, con cédula de ciudadanía No. 050378219-5 declaramos ser autores de la presente propuesta tecnología: " CATASTRO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE LATACUNGA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SALUD.", siendo el Ing. Porras Reyes Jefferson Alberto, Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en la presente propuesta tecnológica, son de nuestra exclusiva responsabilidad.


Latacunga, Marzo 2025



---

Luis Larisson Acosta Lozano

C.C: 050379682-3



---

Mora Arboleda Synthia Maribel

C.C: 050378219-5

Latacunga, 18 de febrero del 2025

### AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: “CATASTRO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE LATACUNGA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SALUD”, propuesto por los estudiantes **ACOSTA LOZANO LUIS LARISSON** y **MORA ARBOLEDA SYNTHIA MARIBEL** de la Carrera de **ELECTROMECAÁNICA**, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.

TUTOR

  
-----  
Ing. Jefferson Alberto Porras Reyes Mg.

C.C.: 070440044-9

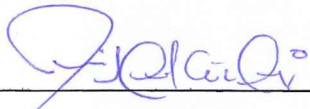
**AVAIL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN**

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban la presente Propuesta Tecnológica de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y, por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto los postulantes: Acosta Lozano Luis Larisson y Mora Arboleda Synthia Maribel, con el título del Proyecto de Titulación: "CATASTRO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE LATACUNGA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SALUD", ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, febrero 2025

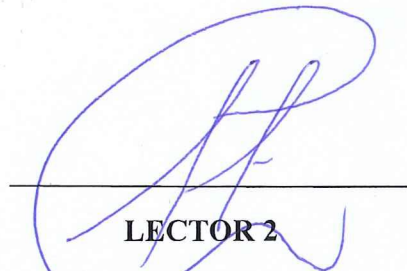
Para constancia firman:



**LECTOR 1**

**Ing. Luis Rolando Cruz Panchi**

**CC: 0502595176**



**LECTOR 2**

**Ing. Carlos Francisco Pacheco Mena**

**C.C: 0503072902**

**LECTOR 3**

**Ing. Luigi Orlando Freire Martínez**

**C.C: 050252958-9**

## AGRADECIMIENTOS

*Con todo mi amor y gratitud, dedico esta tesis a mi madre, Betty Arboleda, mi faro y mi inspiración. Su amor incondicional, apoyo constante y fe en mí me dieron la fuerza para superar obstáculos y alcanzar esta meta. Cada página de esta tesis es un tributo a su sacrificio y dedicación.*

*A mi padre, Segundo Mora, aunque no estás físicamente, tu espíritu vive en cada palabra de esta tesis. Tus enseñanzas, valores y amor son el legado que me impulsa a seguir adelante. Sé que desde el cielo me acompañas, y esta tesis es también tuya, un testimonio de tu influencia eterna en mi vida.*

*Agradezco profundamente al Ing. Jefferson Porras, cuya guía y paciencia fueron fundamentales para este proyecto. Su dedicación como tutor me brindó no solo conocimiento técnico, sino también la confianza para superar desafíos. Su apoyo e inspiración fueron cruciales para alcanzar un nivel de excelencia que nunca creí posible.*

*Finalmente, doy las gracias a mis hermanos y familiares, cuyo apoyo incondicional y palabras de aliento fueron mi mayor motivación en los momentos más difíciles. Su amor y compañía hicieron este camino más llevadero y significativo. A todos los que contribuyeron a este proyecto, les agradezco desde lo más profundo de mi corazón.*

**Synthia Mora Arboleda**

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, pilares de mi vida: A mi papi, que se fue al cielo creyendo en este logro, y cuyo amor y ejemplo de esfuerzo y dedicación me impulsaron a perseguir este sueño hasta el final. A mi mami, Betty Arboleda, por tu inquebrantable confianza, tu amor infinito y por ser mi guía constante en cada paso del camino. Esta tesis es un reflejo de tu fortaleza y tu fe en mí. A mis hermanos, Adonis Mora, José Mora y Hugo Arboleda, quienes siempre creyeron en mi capacidad y me brindaron su apoyo incondicional. Su aliento y compañía fueron fundamentales para superar los desafíos y convertirme en la persona que soy hoy. Esta tesis es un tributo a su amor, sacrificio y creencia en mí. Espero que este logro los llene de orgullo, así como ustedes me llenan de inspiración cada día.*

**Synthia Mora Arboleda**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quiero agradecerles que ha lo largo de este camino de formación académica, he contado con el apoyo incondicional de personas que han sido pilares fundamentales en mi vida. A ellos, quiero expresar mi más profundo agradecimiento.*

*A mi padre, Luis Acosta, y a mi madre, Rocío Lozano, por inculcarme los valores del esfuerzo, la perseverancia y la responsabilidad. Su amor y enseñanzas han sido mi guía y mi motivación constante para alcanzar mis metas.*

*A mi esposa, Patricia Naranjo, por ser mi compañera de vida, por su paciencia, su amor inquebrantable y su constante apoyo en los momentos de mayor desafío. Gracias por creer en mí y por estar a mi lado en cada paso de este camino.*

*A mi hija, Karime Acosta, mi mayor inspiración y motor de vida. Cada logro es por y para ti, con la esperanza de brindarte un mejor futuro y enseñarte que con dedicación y esfuerzo todo es posible.*

*A mi hermana, Yadira Acosta, por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento y por estar siempre presente cuando más lo he necesitado.*

*A cada uno de ustedes, gracias por su amor, su confianza y su respaldo en este importante logro de mi vida.*

**Luis Acosta**

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, pilares de mi vida: A mi papi, que Dedico este trabajo con amor y gratitud a quienes han sido mi mayor apoyo en este camino.*

*A mis padres, Luis Acosta y Rocío Lozano, por inculcarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.*

*A mi esposa, Patricia Naranjo, por su amor, paciencia y constante aliento.*

*A mi hija, Karime Acosta, mi mayor inspiración y motivo para seguir adelante.*

*A mi hermana, Yadira Acosta, por su apoyo incondicional y compañía en cada desafío.*

*Este logro es también de ustedes.*

**Luis Acosta**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**TÍTULO**"CATASTRO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE LATACUNGA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SALUD."

**Autores:** Acosta Lozano Luis Larisson

Mora Arboleda Synthia Maribel,

**Tutor:** Porras Reyes Jefferson Alberto

**RESUMEN**

La investigación desarrolla el Catastro de Transformadores de Potencia en Subestaciones Eléctricas de Latacunga para la Determinación del Índice de Salud, con el objetivo de evaluar su estado operativo y optimizar su gestión y mantenimiento. La ausencia de un registro actualizado y una evaluación integral dificulta la planificación de intervenciones oportunas, aumentando el riesgo de fallas en el sistema eléctrico. Para abordar esta problemática, se aplicó la metodología del Índice de Salud (HI), un indicador basado en parámetros eléctricos, mecánicos y dieléctricos. Este índice se divide en Índice Funcional, que analiza la relación de transformación, resistencia de devanados y análisis de gases disueltos (DGA), e Índice Dieléctrico, que evalúa la calidad del aislamiento a través de pruebas físico-químicas del aceite, furanos y contenido de humedad. El estudio se realizó en diez subestaciones de Latacunga, considerando transformadores de distintas capacidades y fabricantes. Se emplearon La metodología de suma de puntajes ponderados , junto con la metodología de suma de puntajes ponderados (SPP), asegurando precisión y validez en los resultados. Los hallazgos revelaron que los transformadores analizados están en condiciones óptimas, con un Índice de Salud superior al 91.6%, clasificándolos como "Muy Bueno". Sin embargo, en un transformador de la Subestación 4, se detectó deterioro en el aceite dieléctrico, con humedad superior a los límites recomendados, lo que podría afectar su vida útil. Desde un enfoque técnico-económico, la aplicación del Índice de Salud mejora la planificación del mantenimiento predictivo, optimizando recursos y reduciendo costos operativos. Se demostró que el monitoreo continuo y estrategias basadas en condición pueden minimizar fallas inesperadas y prolongar la vida útil de los transformadores. Se recomienda ampliar la metodología a otras subestaciones, mejorar la gestión del catastro mediante herramientas digitales y capacitar al personal de mantenimiento en la interpretación y aplicación del Índice de Salud.

**Palabras clave:** Transformadores de potencia, Índice de Salud, análisis dieléctrico, análisis funcional, análisis de gases disueltos.

**TECHNICAL UNIVERSITY COTOPAXI**  
**FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES**  
**ELECTROMECHANICAL ENGINEERING PROGRAM**

**TITLE:"CATASTRO OF POWER TRANSFORMERS IN ELECTRICAL SUBSTATIONS  
OF LATACUNGA FOR THE DETERMINATION OF THE HEALTH INDEX."**

**Authors:** Acosta Lozano Luis Larisson

Mora Arboleda Synthia Maribel

**Tutor:** Porras Reyes Jefferson Alberto

**ABSTRACT**

The research develops the Cadastre of Power Transformers in Latacunga Electric Substations for the Determination of the Health Index, with the objective of evaluating their operational condition and optimizing their management and maintenance. The absence of an updated record and a comprehensive evaluation hinders the planning of timely interventions, thereby increasing the risk of failures in the electrical system. To address this issue, the Health Index (HI) methodology was applied—an indicator based on electrical, mechanical, and dielectric parameters. This index is divided into a Functional Index, which analyzes the transformation ratio, winding resistance, and dissolved gas analysis (DGA), and a Dielectric Index, which evaluates the quality of insulation through physicochemical tests of the oil, furans, and moisture content. The study was conducted in ten substations in Latacunga, considering transformers of different capacities and manufacturers. The weighted scoring methodology, along with the Weighted Scoring Summation (SPP) method, was employed to ensure precision and validity in the results. The findings revealed that the analyzed transformers are in optimal condition, with a Health Index above 91.6%, classifying them as "Very Good." However, in one transformer at Substation 4, deterioration was detected in the dielectric oil, with moisture levels exceeding the recommended limits, which could affect its lifespan. From a technical-economic perspective, the application of the Health Index improves predictive maintenance planning by optimizing resources and reducing operational costs. It was demonstrated that continuous monitoring and condition-based strategies can minimize unexpected failures and extend the lifespan of the transformers. It is recommended to extend the methodology to other substations, enhance cadastre management through digital tools, and train maintenance personnel in the interpretation and application of the Health Index.

**Keywords:** Power transformers, Health Index, dielectric analysis, functional analysis, dissolved gas analysis.



## ***AVAL DE TRADUCCIÓN***

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: **“CATASTRO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE LATACUNGA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SALUD”** presentado por: **Acosta Lozano Luis Larisson** y **Mora Arboleda Synthia Maribel** egresados de la Carrera de: **Ingeniería Electromecánica**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, Febrero del 2025.

Atentamente,

Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC**

CC: 0502666514



**CENTRO  
DE IDIOMAS**

## **Glosario**

**CIGRE:** acrónimo en francés de *Conseil International des Grands Réseaux Électriques*.

**DGA:** análisis de gases disueltos por el acrónimo en inglés de *Dissolved Gas Analysis*.

**DP:** grado de polimerización por el acrónimo en inglés de *Degree of Polymerization*.

**HI:** índice de salud, por el acrónimo en inglés de *Health Index*.

**HIF:** factor del índice de salud de cada prueba, por el acrónimo en inglés de *Health Index Factor*.

**IEEE:** acrónimo en inglés de *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

**Wi:** factor de peso asignado a cada prueba.

**OQF:** factor de calidad del aceite por el acrónimo en inglés de *Oil Quality Factor*.

**Sj:** puntaje o ponderación.

**SPP:** suma de puntajes ponderados.

**TP:** transformador de potencia.

## ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	ii
AVAL DEL TUTOR DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA.....	iii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN .....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
DEDICATORIA.....	vi
RESUMEN.....	ix
<b>1 INFORMACIÓN GENERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>2 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	4
2.2 FÓRMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	5
2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN .....	5
2.3.1 OBJETO DE INVESTIGACIÓN: .....	5
2.3.2 CAMPO DE ACCIÓN:.....	5
2.4 BENEFICIARIOS .....	5
2.4.1 DIRECTO.....	5
2.4.2 INDIRECTO.....	5
2.5 JUSTIFICACIÓN.....	5
2.6 OBJETIVOS.....	6
2.6.1 GENERAL.....	6
2.6.2 ESPECÍFICOS .....	6
2.7 SISTEMAS DE TAREAS .....	7
<b>3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....</b>	<b>8</b>
3.1 SUBESTACIONES ELÉCTRICAS .....	8
3.2 TRANSFORMADORES DE POTENCIA.....	9
3.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS TRASFORMADORES DE POTENCIA.....	9
3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS TRASFORMADORES DE POTENCIA.....	10
3.3 TIPOS DE TRANSFORMADORES.....	11
3.3.1 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.....	11
3.3.2 TRANSFORMADORES ELEVADORES Y REDUCTORES .....	11
3.3.3 PARTES DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....	12
3.4 TIEMPO DE VIDA ÚTIL DE LOS TRANSFORMADORES.....	14
3.5 ÍNDICE DE SALUD DE UN TRANSFORMADOR.....	15
3.5.1 PRINCIPIOS DEL MÉTODO SPP .....	16
3.5.2 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SALUD (HI) EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA Y NORMATIVAS RELACIONADAS .....	16
3.5.2.1 Pasos para calcular el índice de salud.....	17

3.5.2.2	Asignar puntajes a las pruebas (HIF) .....	18
3.5.2.3	Ponderar los resultados (K) .....	18
3.5.2.4	Procedimiento para el cálculo del índice de salud total .....	18
3.5.2.5	Normativas aplicables al cálculo del Índice de Salud. ....	19
3.6	PRUEBAS REALIZADAS A LOS TRANSFORMADORES .....	19
3.6.1	RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN .....	20
3.6.2	RESISTENCIA DE DEVANADOS .....	20
3.6.3	ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS.....	21
3.6.4	FACTOR DE POTENCIA DEL LIQUIDO .....	24
3.6.5	PRUEBAS FÍSICO QUÍMICAS .....	24
3.6.5.1	Rigidez dieléctrica.....	25
3.6.5.2	Tensión interfacial.....	26
3.6.5.3	Número de acidez.....	26
3.6.5.4	Contenido de humedad.....	27
3.6.5.5	Color de aceites.....	28
3.6.5.6	Factor de disipación.....	29
3.6.6	GASES FURANOS .....	29
3.6.6.1	Papel aislante .....	29

#### **4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS..... 30**

4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	30
4.2	DECLARACIÓN DE VARIABLES.....	31
4.2.1	VARIABLE INDEPENDIENTE.....	31
4.2.2	VARIABLE DEPENDIENTE.....	31
4.3	DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS PROCESOS A REALIZAR.....	32
4.4	DATOS DE ENTRADA .....	34
4.4.1	DATOS DE PLACA .....	34
4.4.2	DATOS DE PRUEBAS DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN Y RESISTENCIA DE DEVANADOS 35	
4.4.3	DATOS DE PRUEBAS DE ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS (DGA).....	35
4.4.4	FACTOR DE POTENCIA.....	36
4.4.5	DATOS DE PRUEBAS DE CALIDAD DE ACEITE (OQ).....	36
4.4.6	DATOS DE PRUEBAS DE GRADO DE POLIMERIZACIÓN (DP).....	37
4.5	PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SALUD. ....	38
4.5.1	SUBÍNDICE DE SALUD FUNCIONAL .....	40
4.5.2	CONDICIONES PARA EL CÁLCULO DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN .....	41
4.5.3	CONDICIONES PARA EL CÁLCULO DE RESISTENCIA DE DEVANADOS.....	42
4.5.4	CONDICIONES PARA EL CÁLCULO DE ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS .....	42
4.5.5	SUBÍNDICE DE SALUD DIELECTRICO .....	43
4.5.6	CONDICIONES PARA EL CÁLCULO DE FACTOR DE POTENCIA.....	44
4.5.7	CONDICIONES PARA EL CÁLCULO DE PRUEBAS FÍSICO-QUÍMICAS.....	44
4.5.8	CONDICIONES PARA EL CÁLCULO DE CONTENIDO DE FURANOS.....	46

<b>5</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
5.1	CÁLCULO DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN .....	47
5.2	CÁLCULO DE RESISTENCIA DE DEVANADOS. ....	47
5.3	CÁLCULO DE ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS .....	48
5.4	CÁLCULO DE ÍNDICE DE SALUD FUNCIONAL.....	51
5.5	CÁLCULO DE FACTOR DE POTENCIA .....	53
5.6	CÁLCULO DE PRUEBAS FÍSICO-QUÍMICAS.....	53
5.7	CÁLCULO DE GASES FURANOS .....	56
5.8	CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SALUD DIELECTRICO. ....	57
5.9	CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SALUD TOTAL. ....	58
5.9.1	ANÁLISIS DE ÍNDICE DE SALUD TOTAL .....	60
5.10	ANÁLISIS ECONÓMICO .....	60
5.10.1	IMPORTANCIA ECONÓMICA DEL ESTUDIO.....	61
5.10.2	IMPACTO EN LOS COSTOS DE MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN .....	61
5.10.3	REDUCCIÓN DEL RIESGO DE INTERRUPCIONES DEL SERVICIO .....	62
5.10.4	VALOR ESTRATÉGICO Y REPLICABILIDAD DEL ESTUDIO .....	62
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>63</b>
6.1	CONCLUSIONES.....	63
6.2	RECOMENDACIONES .....	64
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>1</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Sistema de tareas.....	7
Tabla 3.1 Condiciones y vales del HI.[24] .....	18
Tabla 3.3.2 Pesos de las distintas pruebas [26].....	18
Tabla 3. 3.3 Evaluación de condición[4] .....	18
Tabla 3.4 Normativas Americanas .....	19
Tabla 3.5 Concentraciones límites de gases disueltos [34] .....	23
Tabla 4.1 Parámetros de Evaluación del Transformador y Métodos de Medición.....	30
Tabla 4.2 Datos técnicos de la placa.....	34
Tabla 4.3 Datos Relación de transformación y resistencia de devanados. ....	35
Tabla 4.4 Resultados DGA de la empresa distribuidora. ....	36
Tabla 4.5 factor de potencia.....	36
Tabla 4.6 Resultados OQ de la empresa distribuidora.....	36
Tabla 4.7 Resultados DP de la empresa distribuidora. ....	37
Tabla 4.8 Condiciones y vales del HI[24]. ....	39
Tabla 4.9 Evaluación de condición [24] .....	40
Tabla 4.10 Pesos índice funcional[52].....	41
Tabla 4.11 Criticidad de Relación de transformación (RT)[52]. ....	41
Tabla 4.12 Criticidad Resistencia de devanados[8].....	42
Tabla 4.13 HI para la prueba DGAF [53] .....	42
Tabla 4.14 Puntajes y Pesos para Pruebas DGAF [35].....	43
Tabla 4.15 Pesos de pruebas dieléctricas[52] .....	44
Tabla 4.16 Criticidad de Factor de potencia[8]. ....	44
Tabla 4.17 Pruebas Físico-químicas[3] .....	45
Tabla 4.18 HIF para en OQF[54].....	46
Tabla 4.19 HIF para DP.[49].....	46
Tabla 5.1 Criticidad de Relación de transformación .....	47
Tabla 5.2 Criticidad de resistencia de devanados .....	48
Tabla 5.3 Ponderación de pesos y puntajes DGAF.....	48
Tabla 5.4 Pesos DGA.....	49
Tabla 5.5 Si Max DGAF.....	49
Tabla 5.6 Sumatoria de la multiplicación de pesos y puntajes DGAF.....	50
Tabla 5.7 Peso máximo Total DGAF.....	50

Tabla 5.8 Calculo DGAF .....	51
Tabla 5.9 HI del DGA de la empresa distribuidora .....	51
Tabla 5.10 pesos para índice funcional.....	52
Tabla 5.11 índice de salud funcional .....	52
Tabla 5.12 Criticidad de factor de potencia .....	53
Tabla 5.13 Puntajes OQF de la empresa distribuidora .....	53
Tabla 5.14 Pesos OQF de la empresa distribuidora.....	54
Tabla 5.15 Sumatoria de la multiplicación de pesos y puntajes OQF .....	55
Tabla 5.16 Peso Total OQF.....	55
Tabla 5.17 Calculo OQF de la empresa distribuidora .....	56
Tabla 5.18 HI del OQ de la empresa distribuidora .....	56
Tabla 5.19 Criticidad DPF de la empresa distribuidora.....	56
Tabla 5.20HI del DP de la empresa distribuidora.....	57
Tabla 5.21 pesos para el índice de salud dieléctrico .....	57
Tabla 5.22 Índice de salud dieléctrico .....	58
Tabla 5.23 HI función y HI dieléctrico .....	59
Tabla 5.24 índice total en porcentaje .....	59
Tabla 5.25 índice de salud total .....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Sistema Eléctrico de Potencia (SEP)[12].....	9
Figura 3.2 Transformador de potencia[14].....	9
Figura 3.3 Transformador trifásico con tres juegos de devanados (A, B y C) en los lados primario y secundario.[16] .....	10
Figura 3.4 Transformadores reductor y elevador[19].....	12
Figura 3.5 Partes de un transformador[20].....	13
Figura 3.6 Pruebas de aceites.[31].....	22
Figura 3.7 Prueba de rigidez dieléctrica .....	25
Figura 3.8 Tensiómetro para prueba de tención interfacial.[39].....	26
Figura 3.9 Guía de evolución de color de aceite[44].....	28
Figura 3.10 Papel aislante[48] .....	30
Figura 4.1 Diagrama de flujo del desarrollo del sistema de adquisición de datos. ....	33
Figura 4.2 Diagrama de bloques de la metodología de cálculo del HI.....	38
Figura 5.1 Comprobación de resultados HI en MATLAB.....	60

# 1 INFORMACIÓN GENERAL

## **Tema del proyecto:**

Catastro de transformadores de potencia en subestaciones eléctricas de Latacunga para la determinación del índice de salud.

## **Modalidad de Titulación:**

Propuesta Tecnológica.

## **Carrera:**

Electromecánica

## **Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:**

Modelo de gestión de activos en sistemas electromecánicos en el sector multisectorial de la provincia de Cotopaxi.

## **Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:**

### **Autor 1:**

Nombres: Synthia Maribel  
Apellidos: Mora Arboleda  
Cédula de identidad: 050378219-5  
Email: [synthia.mora2195@utc.edu.ec](mailto:synthia.mora2195@utc.edu.ec)

### **Autor 2:**

Nombres: Luis Larisson  
Apellidos: Acosta Lozano  
Cédula de identidad: 050379682-3  
Email: [luis.acosta6823@utc.edu.ec](mailto:luis.acosta6823@utc.edu.ec)

### **Tutor:**

Nombres: Jefferson Alberto  
Apellidos: Porras Reyes  
Cédula de identidad: 070440044-9  
Email: [jefferson.porras0449@utc.edu.ec](mailto:jefferson.porras0449@utc.edu.ec)

**Área de Conocimiento:** Ingeniería, Industria y construcción.

**Sub-Área;** Ingeniería y profesiones afines.

**Línea de investigación de la universidad;** Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

**Sublíneas de investigación de la Carrera:** Energía en sistemas electromecánicos y uso de fuentes renovables de energía.

## 2 INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia son equipos indispensables en el sistema eléctrico de Latacunga y en las subestaciones eléctricas, ya que garantizan el suministro continuo de energía permitiendo un funcionamiento eficiente en su red. Dependiendo de las condiciones operativas o con el paso del tiempo, los transformadores pueden verse afectados por el desgaste y por el envejecimiento, lo cual puede producirse fallas en su red y generando un impacto considerable en el desempeño técnico y financiero. Establecer de un registro técnico y detallado de los transformadores de potencia nos va a permitir evaluar su condición de operatividad y planificar estrategias de mantenimiento[1].

Un catastro sistematizado adecuadamente va a permitir mantener un monitoreo constante de los transformadores de potencia. En este ámbito el Índice de Salud (HI) se predomina como una herramienta indispensable, ya que permite realizar un análisis amplio del estado de los transformadores.

El HI facilita la planificación efectiva en las intervenciones de mantenimiento ajustándose a las necesidades particulares de cada equipo, esto permite tener una mejor utilización de los recursos y contribuye a extender la vida útil de los activos esenciales.

El propósito central de esta investigación es analizar datos técnicos de los transformadores ubicados en subestaciones eléctricas de Latacunga, considerando específicamente las siguientes subestaciones: Subestación 1, Subestación 2, Subestación 3, Subestación 4, Subestación 5, Subestación 6, Subestación 7, Subestación 8, Subestación 9 y Subestación 10. Lo cual, se emplearán indicadores que van organizados en dos principales índices: el Índice Funcional y el Índice Dieléctrico[2].

El Índice Funcional permite evaluar parámetros eléctricos que son fundamentales en el transformador, también la relación de transformación y la resistencia de devanados. Dentro de este análisis de gases disueltos (DGA) se establecen niveles de hidrogeno, etano, metano, etileno, acetileno, monóxido de carbono y dióxido de carbono[3].

Mientras que el Índice Dieléctrico permite evaluar la condición de aislamiento sólido y líquido, a través del análisis de factor de potencia, contenido de furanos (2 – Furaldehido – 2-FAL) y las pruebas físico-químicas de aceite dieléctrico como la rigidez dieléctrica, la tensión interfacial, numero de acidez, contenido de humedad, color y el factor de potencia del liquido dieléctrico.[4].

Para el cálculo del Índice de Salud se debe tener una información necesaria que se obtendrá de la base de datos proporcionada de la empresa distribuidora de energía, así permitiendo tener una evaluación del estado de los transformadores de potencia en cada una de las subestaciones eléctricas mencionadas. Esto permitirá tener un enfoque de las condiciones que se encuentran los transformadores en cada subestación.[5].

Esta investigación se restringe al cálculo del índice de salud (HI) de los transformadores de potencia en las subestaciones eléctricas mencionadas. Este permitirá identificar la condición técnica de los transformadores y proporcionar un modelo replicable en otras subestaciones del país [6].

Mediante los resultados de esta investigación se puede beneficiar directamente la empresa distribuidora de energía, organismos reguladores, contribuyendo así el suministro de energía más eficiente y seguro para la población en general, este análisis sentara la base para futuras investigaciones y otras aplicaciones técnicas en el área de activos eléctricos. [7].

## **2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA**

En el sistema eléctrico de Latacunga se enfrenta a desafíos significativos en la gestión de los transformadores de potencia, ya que son esenciales para garantizar la distribución continua de energía. Estos equipos están instalados en las subestaciones, estos tienen una vida útil de 25 a 30 años, aunque con un correcto y adecuado mantenimiento pueden alcanzar hasta 60 años de operación eficiente. Sin embargo, debido a condiciones operativas exigentes y factores externos debido a su desgaste acelerado afectan su rendimiento y confiabilidad[8]. Sin embargo, el desgaste acelerado debido a condiciones operativas exigentes y factores externos afecta su rendimiento y confiabilidad.

Estudios técnicos realizados han demostrado que la degradación del aceite dieléctrico y la acumulación de gases en su interior refleja un deterioro de manera progresiva de los transformadores y de esta manera aumentando las fallas inesperadas, dichas fallas generan interrupciones en el suministro eléctrico con ello costos elevados de reparación y pérdidas económicas.[9].

En la ciudad de Latacunga, la falta de un registro actualizado que contenga el estado de los transformadores mediante el índice de salud ha limitado la planificación efectiva de mantenimientos, por ello la implementación de un registro técnico detallado y el cálculo del índice de salud permite evaluar con precisión el estado del transformador y así priorizar

intervenciones estratégicas. Esta problemática impacta directamente la confiabilidad del suministro eléctrico, especialmente en zonas rurales y urbanas. Aplicar una estrategia basada en el HI y en el cálculo de la vida útil residual de los transformadores, maximizaría la eficiencia de los recursos disponibles, reduciría costos operativos y mejoraría la continuidad del servicio eléctrico en la región.

## **2.2 FÓRMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Qué beneficios aporta el índice de salud (HI) como herramienta para evaluar el estado de los transformadores de potencia en las subestaciones eléctricas de Latacunga, y cómo este indicador puede facilitar la planificación de acciones de mantenimiento programadas, para la optimización de la gestión de los transformadores.

## **2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

### **2.3.1 Objeto de Investigación:**

Los transformadores de potencia en subestaciones eléctricas de Latacunga y su índice de salud.

### **2.3.2 Campo de Acción:**

330000 ciencias Tecnológicas /3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.05 Aplicaciones Eléctricas

## **2.4 BENEFICIARIOS**

### **2.4.1 Directo**

Empresa distribuidora de energía, técnicos e ingenieros eléctricos, operadores de subestaciones eléctricas, reguladores del sector energético.

### **2.4.2 Indirecto**

Usuarios Residenciales y Comerciales de Latacunga, Industria Local, Instituciones Académicas y Centros de Investigación

## **2.5 JUSTIFICACIÓN**

La presente investigación surge de la necesidad de obtener un catastro del estado de los transformadores de Latacunga de manera clara y precisa mediante el cálculo del índice de salud,

la falta de un registro actualizado y de una metodología clara para su evolución ha dificultado, el análisis preciso del estado de estos activos, impidiendo conocer con exactitud su estado operativo y su tendencia de deterioro. Este estudio permite a la empresa distribuidora utilizar sus recursos y activos de manera eficiente, ya que puede implementar estrategias de mantenimientos preventivos basados en el estado real de los transformadores con ello se obtiene beneficios como la reducción de costos operativos y también puede garantizar un suministro eléctrico continuo e ininterrumpido y se beneficiara directamente a millones de usuarios.

Desde un punto de vista académico esta investigación aportará conocimientos técnicos y metodología de manera valiosa sobre el estado operativo de un transformador dicho activo eléctrico además establecerá una base sólida para futuras investigaciones, impulsando nuevas metodologías que ayude a condicionar el estado de estos activos aplicando en contextos similares y fortaleciendo la capacidad técnica e innovación en el sector energético.

En el ámbito social mejorará la confiabilidad y calidad del suministro eléctrico tendrá un impacto directo en la vida de los ciudadanos de Latacunga, ya que este avance contribuirá al desarrollo económico y social, evitando fallas imprevistas.

## **2.6 OBJETIVOS**

### **2.6.1 General**

Diseñar un catastro de los transformadores de potencia en subestaciones eléctricas de Latacunga mediante la recopilación y análisis de información, con el propósito de determinar el índice de salud (HI).

### **2.6.2 Específicos**

- Analizar la información relevante sobre los transformadores de potencia, incluyendo datos de placas, resultados de pruebas de gases disueltos, evaluaciones físico-químicas y contenido de furanos, para identificar patrones de deterioro y factores críticos.
- Sintetizar los datos recopilados en una hoja de cálculo de Excel mediante un proceso estructurado, integrando la información clave de los transformadores de potencia para su posterior consulta y actualización eficiente.

- Evaluar el Índice de Salud (HI) de los transformadores de potencia mediante el análisis de parámetros técnicos obtenidos en pruebas específicas, siguiendo los lineamientos de la metodología de suma de puntajes ponderados, con el fin de obtener un diagnóstico detallado de su estado operativo.

## 2.7 SISTEMAS DE TAREAS

En la Tabla 2.1 podemos observar las actividades realizadas con base en los objetivos específicos.

Tabla 2.1. Sistema de tareas

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Actividades (tareas)</b>	<b>Resultados esperados</b>	<b>Técnicas, Medios e Instrumentos</b>
Analizar la información relevante sobre los transformadores de potencia, incluyendo datos de placas, resultados de pruebas de gases disueltos, evaluaciones físico-químicas y contenido de furanos, para identificar patrones de deterioro y factores críticos.	Gestión mediante oficios a la empresa distribuidora	Obtención de datos técnicos, precisos y actualizados	Solicitud de información.
	Recolección de datos técnicos.	Resultados de las pruebas como Relación de transformación. Resistencia de devanados. Análisis de Gases Disueltos, Factor de potencia., evaluación del contenido de furanos:(2-FAL), Pruebas físico-químicas	Información técnica proporcionada por la empresa distribuidora tras la recopilación y validación interna de datos de pruebas como Relación de transformación. Resistencia de devanados. Análisis de Gases Disueltos, Factor de potencia., evaluación del contenido de furanos:(2-FAL), Pruebas físico-químicas
Sintetizar los datos recopilados en una hoja de cálculo de Excel mediante un proceso estructurado, integrando la información clave de los transformadores de potencia para su posterior consulta y actualización eficiente.	Creación de la base de datos inicial	Sistema de catastro establecido	Microsoft Excel y plantillas personalizadas
	Consolidación de la información técnica	Datos unificados y listos para consulta	Ingreso manual y ordenado de los datos proporcionados por la empresa distribuidora en la hoja de cálculo

<p>Evaluar el Índice de Salud (HI) de los transformadores de potencia mediante el análisis de parámetros técnicos obtenidos en pruebas específicas, siguiendo los lineamientos de la metodología de suma de puntajes ponderados, con el fin de obtener un diagnóstico detallado de su estado operativo.</p>	<p>Cálculo del índice de salud (HI) mediante el método de sumas de puntajes ponderadas (SSP)</p>	<p>Índice de salud determinado</p>	<p>Metodología de sumas de puntajes ponderadas</p>
	<p>Comprobación de resultados</p>	<p>Validación y verificación precisa de los datos técnicos</p>	<p>Ejecución de scripts en Matlab para revisión de parámetros</p>

### 3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 3.1 SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Es un componente esencial dentro del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), formado por una combinación de equipos, estructuras y mecanismos que trabajan de manera conjunta para dirigir y distribuir bloques de energía eléctrica, como se observa en la Figura 3.1. Para llevar a cabo se obtiene mediante equipos automatizados que realizan funciones de control y protección, actúa como un punto de interconexión que nos facilita la transición y la distribución de la energía eléctrica con ello asegura que el sistema nacional de transmisión opere de manera flexible, confiable, segura y modulable[10].

Las subestaciones eléctricas son importantes en el sistema eléctrico, ya que se puede tener una operación eficiente y segura en los hogares, industrias y en los sectores estratégicos como hidroeléctricas y termoeléctricas. Su acción principal no se limita en conectar varios niveles de tensión, sino que desempeñan un valor importante en la transformación, regulación y adaptación de la energía eléctrica para una distribución adecuada.

Gracias a su presencia la electricidad puede llegar a diferentes usuarios con óptimas condiciones, garantizando un suministro de energía estable y confiable. Estas infraestructuras cumplen funciones que van más allá de la transmisión de energía ya que contribuyen a la eficiencia y estabilidad en la red eléctrica optimizando su rendimiento y minimizando pérdidas.[11].

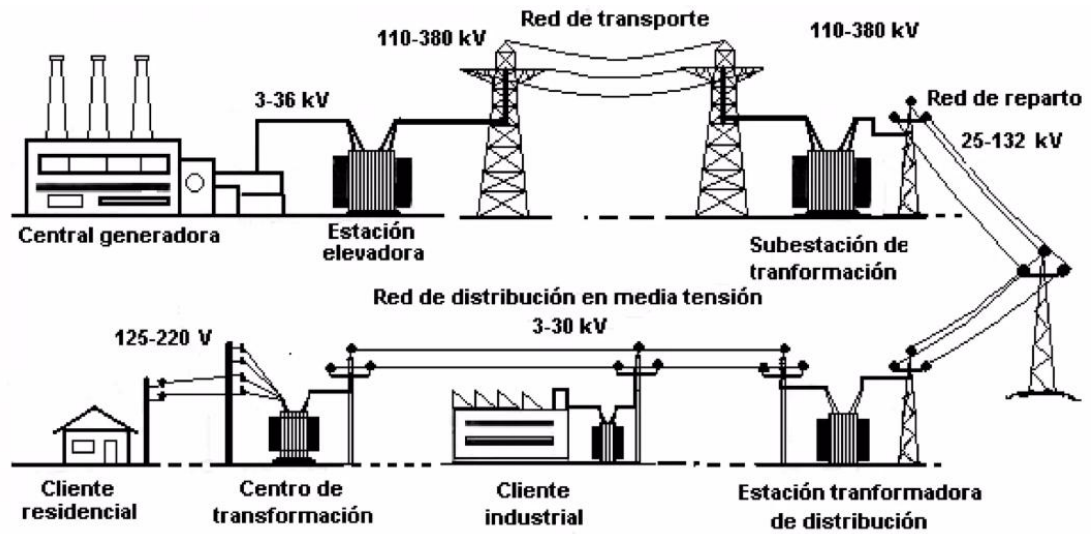


Figura 3.1 Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) [12].

### 3.2 TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

El transformador de potencia, como el mostrado en la Figura 3.2, es utilizado en subestaciones de distribución eléctrica para concentrar la transformación de energía en media y alta tensión. Estos equipos desempeñan un papel fundamental en la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico nacional, adaptándose tanto a centrales de generación como a grandes usuarios industriales que demandan elevadas potencias[13].

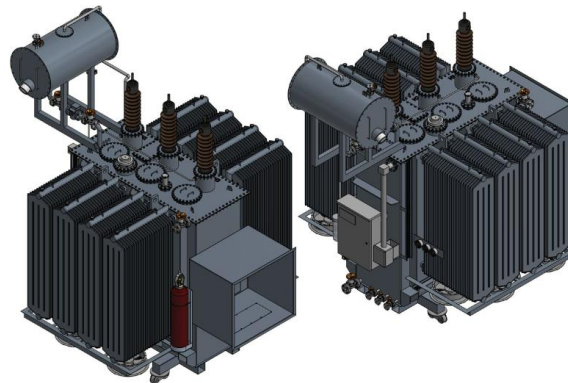


Figura 3.2 Transformador de potencia[14]

#### 3.2.1 Principio de funcionamiento de los transformadores de potencia.

Un transformador de potencia normalmente consta de un par de bobinados, primario y secundario, unidos por un circuito o núcleo magnético, como lo muestra en la Figura 3.3. Cuando se aplica una tensión alterna a uno de estos bobinados, generalmente por definición el primario, circulará una corriente que establece una f.m.m. alterna y, por lo tanto, un flujo alterno en el núcleo. Este flujo alterno al unir ambos bobinados induce una f.e.m. en cada uno de ellos.

En el devanado primario, esta es la "fuerza electromotriz inversa" y, si el transformador fuera perfecto, se opondría al voltaje primario aplicado hasta el punto de que no fluiría corriente. En realidad, la corriente que fluye es la corriente magnetizante del transformador. En el devanado secundario, la fuerza electromotriz inducida es el voltaje secundario de circuito abierto. Si se conecta una carga al devanado secundario que permite el flujo de corriente secundaria, entonces esta corriente crea una fuerza electromotriz inversa desmagnetizante, destruyendo así el equilibrio entre el voltaje primario aplicado y la fuerza electromotriz inversa. Para restablecer el equilibrio, se debe extraer una corriente primaria mayor de la fuente para proporcionar una fuerza electromotriz inversa exactamente equivalente, de modo que el equilibrio se restablezca una vez más cuando esta corriente primaria adicional cree un equilibrio de amperios-vuelta con los del secundario. Como no hay diferencia entre el voltaje inducido en una sola espira, ya sea que forme parte del devanado primario o del secundario, entonces el voltaje total inducido en cada uno de los devanados por el flujo común debe ser proporcional al número de espiras.[15]

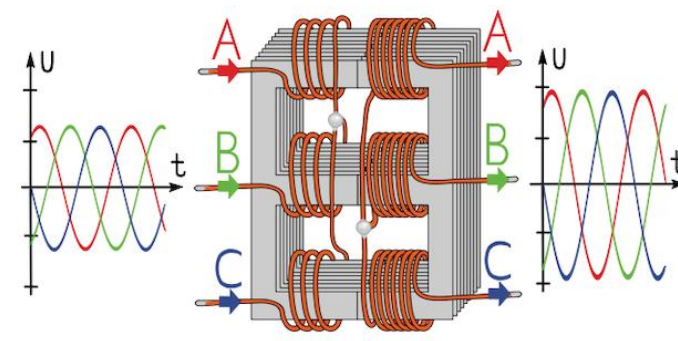


Figura 3.3 Transformador trifásico con tres juegos de devanados (A, B y C) en los lados primario y secundario.[16]

### 3.2.2 Características De Los Transformadores De Potencia.

- Tensiones de 4.16 / 6.3 / 13.8 / 22 / 22.8 / 34.5 / 47 / 69kV.
- En potencias desde 30kVA hasta 15MVA
- Configuraciones tipo subestación, convencional, Padmounted
- Ventilación natural ONAN y forzada ONAF en 1 o 2 etapas
- Aislados en aire, aceite mineral libre de PCB's o con aceite vegetal biodegradable FR3™
- Accesorios con contacto tipo seco o tipo analógico de 4-20ma
- Monitores de señales del transformador con comunicación con sistema SCADA a través de puertos Ethernet o RS485

- Configuraciones especiales para dos, tres o más devanados secundarios.
- Diseños de bobinados con grupos vectoriales de conexiones especiales para 6, 9 y 12 fases de salida.
- Tipo de preservación de aceite con tanque de expansión con membrana de nitrilo y deshidratador de sílica gel o cámara de nitrógeno
- Monitor de Gases de 1, 4, 6 u 8 gases más humedad del aceite
- Cambio de taps con operación manual (NLTC) o automática (OLTC).[14]

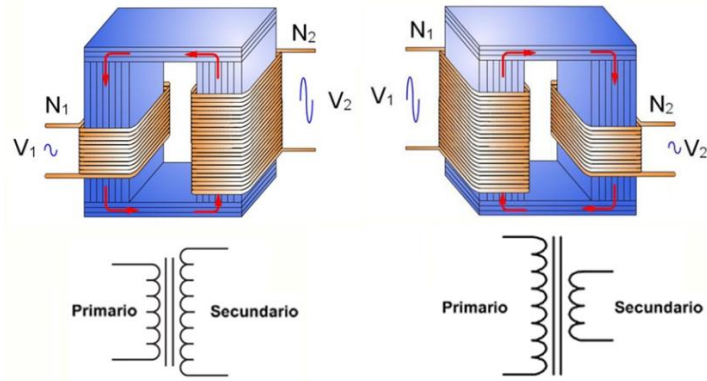
### **3.3 TIPOS DE TRANSFORMADORES**

#### **3.3.1 Transformadores de distribución.**

Se denomina transformadores de distribución, generalmente a los transformadores de potencias iguales o inferiores a 500 kVA y de tensiones iguales o inferiores a 67 000 V, tanto monofásicos como trifásicos. Aunque la mayoría de tales unidades están proyectadas para montaje sobre postes, algunos de los tamaños de potencia superiores, por encima de las clases de 18 kV, se construyen para montaje en estaciones o en plataformas. Las aplicaciones típicas son para alimentar a granjas, residencias, edificios o almacenes públicos, talleres y centros comerciales.[17]

#### **3.3.2 Transformadores elevadores y reductores**

Un transformador elevador aumenta el voltaje de entrada y lo suministra a la carga, mientras que un transformador reductor reduce el voltaje de entrada a la carga, como se lo observa en la Figura 3.4. Se requiere alto voltaje para una transmisión eficiente de electricidad, pero los consumidores deben utilizar voltajes más bajos por razones de seguridad. Un transformador reductor convierte energía eléctrica de alto voltaje en energía eléctrica de bajo voltaje. Esto le permite ajustar el nivel de potencia a las necesidades de cada dispositivo conectado al sistema eléctrico del hogar o negocio con el objeto de satisfacer adecuadamente las exigencias de operación[18]



(a) Transformador elevador (b) Transformador reductor

Figura 3.4 Transformadores reductor y elevador[19]

### 3.3.3 Partes de un transformador de potencia.

Los transformadores de potencia son esenciales en el sistema eléctrico, y cada uno de sus componentes asegura su eficiencia y seguridad. Elementos como la cuba y el relé Buchholz trabajan de manera conjunta para prevenir fallos y mantener el rendimiento del equipo. Estos elementos se pueden observar en la, Figura 3.5 que detalla las partes principales del transformador.

1. Cuba del transformador: Tanque hermético que protege los componentes internos y soporta el vacío sin deformaciones.
2. Tapa empernada: Soporta la instalación de los elementos internos, como bobinados y núcleo.
3. Pasa tapas de media tensión: Aisladores que conectan los devanados del primario y secundario (delta-estrella).
4. Pasa tapas de baja tensión: Conectan el bobinado secundario con la red eléctrica de salida.
5. Cambiador de derivaciones: Permite variar la relación de transformación para regular la tensión.
6. Chasis: Estructura de soporte para todos los componentes del transformador.
7. Soporte de izado: Facilitan el movimiento del transformador según su tamaño y potencia.
8. Válvula de drenaje: Permite vaciar el aceite del transformador.
9. Tapón de llenado: Cierra el orificio de llenado de aceite y previene la entrada de impurezas.
10. Válvula de sobrepresión: Alivia el exceso de presión interno.

11. Indicador de nivel de aceite: Monitorea cambios en el nivel del líquido.
12. Provisión para llenado de aire: Válvula manual para tratamiento del aceite.
13. Ruedas bidireccionales: Facilitan el movimiento en dos direcciones.
14. Conectores a tierra: Unen partes metálicas a la malla de tierra para protección contra sobretensiones.
15. Placa de características: Muestra los datos nominales como potencia y relación de transformación.
16. Termómetro tipo dial: Indica la temperatura general del transformador.
17. Indicador de temperatura del líquido: Mide la temperatura del aceite cercano a la parte superior.
18. Indicador de temperatura del bobinado: Estima el punto más caliente del bobinado.
19. Relé Buchholz: Detecta fallos internos por acumulación de gases.
20. Secador de aire: Filtra la humedad del aire que entra y sale del tanque.
21. Sistema de conservación del líquido: Aísla el ambiente interno del transformador del exterior.
22. Caja de conexiones: Centraliza las conexiones eléctricas de los accesorios[20].

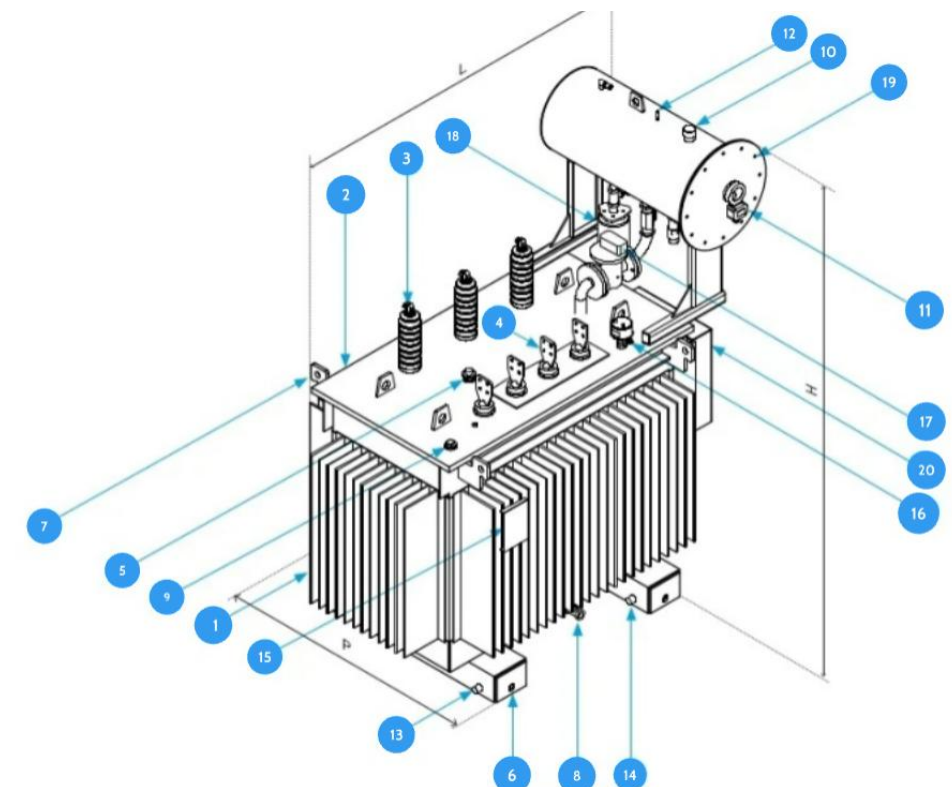


Figura 3.5 Partes de un transformador[20]

### 3.4 TIEMPO DE VIDA ÚTIL DE LOS TRANSFORMADORES

La durabilidad de los transformadores de potencia es un aspecto clave para las empresas eléctricas, los fabricantes de estos equipos y las aseguradoras. Conocer la vida útil remanente de un transformador resulta fundamental para gestionar los riesgos relacionados con la confiabilidad del sistema de transmisión y, en consecuencia, garantizar un suministro eléctrico eficiente y de alta calidad. La estimación de la vida útil de un equipo está directamente vinculada a su proceso de deterioro progresivo. En el caso de las máquinas eléctricas, su degradación varía según su diseño y función operativa. Estos equipos están sujetos, en diferentes niveles, a factores térmicos, mecánicos, eléctricos y ambientales, los cuales influyen en su rendimiento y longevidad. Por esta razón, la evaluación del estado del transformador, a través de técnicas de monitoreo en línea y fuera de línea, se convierte en una estrategia esencial para determinar su condición y optimizar su mantenimiento. Un transformador se considera al final de su vida útil cuando deja de cumplir su función principal: actuar como un enlace seguro y eficiente entre los distintos componentes de un sistema de potencia operando a diferentes niveles de tensión.[21]

Los transformadores de potencia son equipos diseñados para operar durante un periodo de entre 20 y 35 años de manera eficiente, con una expectativa mínima de 25 años cuando está operando en un rango de temperatura de 65°C a 95°C. Por lo tanto, su vida útil se puede extender hasta los 60 años con un mantenimiento adecuado y dependiendo de la calidad de fabricación y en qué condiciones estén operando, pero investigaciones recientes han revelado que diferentes transformadores de nueva generación presentan fallas significativas que se estiman en apenas 14.9 años e incluso cuando operan en las mismas condiciones a las de modelos antiguos. Esto ha generado inquietudes en el sector eléctrico, impulsando diferentes estudios para poder aumentar la durabilidad de estos equipos.

Los materiales de aislamiento más utilizados en los devanados de los transformadores es el papel impregnado con aceite, la cual es aceptada en la industria como "el papel aislante es la vida útil del transformador". Este material es vulnerable dentro del sistema de aislamiento ya que su degradación es un proceso inevitable influenciado por múltiples factores. Unos de los factores que aceleran su deterioro es la temperatura, humedad, campos eléctricos, oxígeno y otras condiciones internas propias del transformador.

Debido a su papel crítico en el desempeño del equipo el monitoreo y la preservación del estado del papel aislante son esenciales para prolongar la vida útil del transformador y así garantizar un funcionamiento eficiente y seguro.

Además de los factores internos, los elementos externos como fallas en la red y sobretensiones pueden acelerar el deterioro del material aislante, comprometiendo su operatividad. A medida que el aislamiento envejece y pierden sus propiedades se debe tener un monitoreo constante y así poder detectar fallas catastróficas, ya que están expuestos a esfuerzos mecánicos especialmente en algún evento de cortocircuito. Estas exigencias pueden afectar directamente su fiabilidad y reducir su vida útil, lo que subraya la importancia de estrategias de mantenimiento preventivo y análisis predictivo para optimizar su desempeño a lo largo del tiempo[22].

### **3.5 ÍNDICE DE SALUD DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA**

El Índice de Salud (HI) es un parámetro numérico ampliamente utilizado para evaluar la condición general de un transformador de potencia, lo cual proporciona una visión integral del estado operativo. El uso del índice de salud permite y facilita la toma de decisiones de forma estratégica para la planeación de mantenimientos o en situaciones más críticas la reparación total del equipo. Para la elaboración de este índice de salud se genera a partir de la recolección de resultados obtenidos por las pruebas realizadas de la empresa distribuidora dichos datos son adquiridos a través de las pruebas de diagnóstico, revisión visual, evaluaciones de funcionamiento, y registros históricos los cuales dan como resultado la muestra de degradación acumulada del transformador.

Para la elaboración del índice de salud se necesita seguir una metodología la cual es suma de puntajes ponderados (SPP) en la cual se debe atribuir valores numéricos a diversas pruebas efectuadas al equipo cada prueba obtiene una calificación basada en su cuadro de criticidad y aceptación en la cual debe reflejar su resultado y peso de manera concreta que señala su importancia en el análisis completo.

Este tipo de método posibilita categorizar a los transformadores en distintos tipos de salud desde la mejor puntuación en criticidad “MUY BUENA” y con una calificación de 4 siendo la mejor calificación que se puede obtener en este tipo de evaluación de igual forma la peor calificación en criticidad sería “MUY POBRE” con una calificación de 0 y con esta metodología se simplifica la toma de decisiones en relación a las estrategias de mantenimientos. Adicionalmente el índice de salud no solo proporciona una valoración actual del equipo si no

también facilita la proyección y mantenimiento de su vida útil residual y la priorización de intervenciones según el grado de riesgo de fallo.

La aplicación de este índice en la industria eléctrica a probado ser un instrumento efectivo para mejorar, mantenimiento, y adquisición de estos activos debido al costo de adquisición, a tiempo que este tarda durante su traslación hasta su implantación debido a esta metodología incrementa la fiabilidad de la infraestructura eléctrica y así disminuye significativamente la interrupción en el abastecimiento de energía eléctrica a los beneficiarios de esta red en Latacunga.

El índice de salud al ofreceres un análisis cuantificado y fundamentado en datos aporta de manera significativa y respaldada a la planificación de estrategias de mantenimiento y asi posibilitando la disminución de los gastos operativos[23].

### **3.5.1 Principios del Método Suma de Puntajes Ponderados (SPP)**

Este enfoque se basa en que cada prueba de diagnostico que se realiza al transformador de potencia proporcione datos acerca de un aspecto concreto del estado del trasformador cave tomar en cuenta que no todas las pruebas generan el mismo impactado de importancia en la evolución global del índice de salud por ello se otorga un peso relativo (K) a cada una en base a su relevancia, en la detección critica de de los transformadores de potencia este enfoque facilita el cálculo del índice de salud (HI) de forma organizada e imparcial ofreciendo un examen completo del estado del transformador de potencia, Además esta metodología fundamenta en datos cuantificables permite la toma de decisiones fundamentada que favorezca su funcionamiento y disminución de costos como en su mantenimiento, sustitución del equipo y fallas imprevistas en la líneas eléctricas que pueden generar costos excesivos para la empresa distribuidora[23].

### **3.5.2 Procedimiento para el cálculo del índice de salud (HI)**

En índice de salud es un cálculo que nos indica de manera global una serie de datos para señalar con exactitud la condición de un transformador de potencia basándose en múltiples pruebas que diagnostican en los campos eléctricos, químicos, físicos, mecánicos y deterioros en general lo que nos facilita una perspectiva general del estado operativo del equipo

Este enfoque esta basando en la metodología de suma de puntajes ponderados en el que nos da un enfoque simple pero verídico para calificar con una ponderación al transformadore de potencia siendo una estrategia altamente recomendable para su calificación y verificación del estado actual del trasformador en uso y operación [24].

### 3.5.2.1 Procedimiento para calcular el índice de salud.

Para la evaluación de un transformador de potencia implica la recopilación de y estudio de varios parámetros esenciales que facilitan la determinación de estado de funcionamiento y la identificación de posibles fallos causado por el envejecimiento o deterioro de su componente o a la vez la pérdida de calidad del aceite. Dentro del calculo se divide en dos subíndices muy importantes el primero es el subíndice funcional en el que se enfoca en el estudio de los elementos eléctricos del dispositivo para ellos se lleva a cabo las siguientes evaluaciones;

- Medición de la relación de transformación
- Medición de la resistencia de devanados
- Análisis de Gases Disueltos

El subíndice dieléctrico siendo el segundo índice más importante para el cálculo del índice de salud se basa en la condición del aislamiento del transformador, tanto en su estado sólido como en el líquido dieléctrico. Para ello, se realizan las siguientes pruebas:

- Medición de la relación de transformación: Verifica si el transformador está operando con la conversión de voltaje adecuada.
- Resistencia de devanados: Se mide para identificar posibles problemas en los conductores internos, como conexiones defectuosas o envejecimiento del material.
- Análisis de Gases Disueltos (DGA): Se evalúan los niveles de gases como hidrógeno, metano, etano, etileno, acetileno, dióxido de carbono y monóxido de carbono. La presencia y concentración de estos gases ayudan a diagnosticar fallas internas, sobrecalentamiento o posibles descargas parciales.

#### Evaluación del Índice Dieléctrico

Esta evaluación se centra en la condición del aislamiento del transformador, tanto en su estado sólido como en el líquido dieléctrico. Para ello, se realizan los siguientes exámenes:

- Factor de potencia: Permite determinar el nivel de degradación del aislamiento.
- Contenido de furanos (2-Furaldehído - 2-FAL): Indica el grado de envejecimiento del papel aislante dentro del transformador.
- Pruebas físico-químicas del aceite dieléctrico, que incluyen:
  - Rigidez dieléctrica: Evalúa la capacidad del aceite para resistir descargas eléctricas.
  - Tensión interfacial: Ayuda a conocer el estado de envejecimiento del aceite.
  - Número de acidez: Determina el nivel de acidez del aceite, lo que influye en su deterioro.
  - Contenido de humedad: Un exceso de agua en el aceite puede afectar negativamente el rendimiento del aislamiento.
  - Color del aceite: Un cambio en el color puede indicar oxidación o contaminación.
- Factor de potencia del líquido dieléctrico: Refleja la degradación del aceite y su capacidad de aislamiento.

### 3.5.2.2 Asignar puntajes a las pruebas (HIF)

Cada parámetro evaluado recibe una ponderación específica según su impacto en el desempeño del transformador. Posteriormente, se combinan los resultados obtenidos en las pruebas funcionales y dieléctricas para calcular el Índice de Salud (HI). Este valor final permitirá clasificar el estado del transformador dentro de categorías en una escala de 0 a 4, donde 0 indica una condición muy deficiente y 4 representa un estado óptimo se lo puede observar en la Tabla 3.1 [25].

Tabla 3.1 Condiciones y vales del HI.[24]

HIF	CONDICIÓN
4	MUY BUENO
3	BUENO
2	REGULAR
1	POBRE
0	MUY POBRE

### 3.5.2.3 Ponderar los resultados (K)

Se asigna un factor de peso a cada prueba como lo muestra la Tabla 3.3.2 según su relevancia en el diagnóstico del transformador [24].


Tabla 3.3.2 Pesos de las distintas pruebas [26]

Pruebas Funcional	k	Pruebas Dieléctrico	k
Relación de transformación	8	Factor de potencia	10
Resistencia de devanados	6	Calidad del aceite, contenido de humedad y factor de potencia del líquido	6
Gases disueltos	10	Contenido de compuestos furánicos	8

### 3.5.2.4 Procedimiento para el cálculo del índice de salud total

El índice total se obtiene realizando una sumatoria de la multiplicación de cada prueba tomando en cuenta sus pesos y puntajes establecidos Este valor se expresa en porcentaje y clasifica el estado del transformador según el siguiente Tabla 3. 3.3[23].

Tabla 3. 3.3 Evaluación de condición[4]

% Condición	Clasificación	COLOR
86 - 100	MUY BUENO	
71 - 85	BUENO	
51 - 70	REGULAR	

31 - 50	POBRE	
0 - 30	MUY POBRE	

### 3.5.2.5 Normativas aplicables al cálculo del Índice de Salud.

El cálculo del HI y las pruebas de diagnóstico están regulados por las normativas americana internacionales y guías técnicas. Se encuentra detallada en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Normativas Americanas

Prueba Realizada	Normativa de Análisis
Relación de transformación Resistencia de Devanados	IEEE Std C57,12.90
Análisis de Gases (DGA)	IEEE Std C57,104
Factor de Potencia Rigidez Dieléctrica Tensión Interfacial Numero de Acidez Contenido de Humedad Color Factor de disipación Dieléctrico	IEEE Std C57,106
Evaluación de Contenidos de Furano(2-FAL)	IEEE Std C57,147

## 3.6 PRUEBAS REALIZADAS A LOS TRANSFORMADORES

Es de vital importancia la revisión continua de los transformadores de potencia para así asegurar su funcionamiento y extender su vida útil asegurando su durabilidad y correcto funcionamiento, algunas de las pruebas más significativas son las enfocadas en la identificación de gases disueltos en la que esta agrupada a gases como hidrogeno, metano, etano, etileno, acetileno, dióxido de carbono, y monóxido de carbono. Estos estudios posibilitan la comprobación de posibles fallos internos tales como sobrecalentamiento o descargas parciales que podrían poner en riesgo el desempeño y la funcionalidad del equipo.

En la evaluación de transformador de potencia también se lleva a cabo pruebas físico químicas que analizan factores esenciales en el aceite dieléctrico como la acidez, el contenido de humedad, tensión interfacial, color, factor de disipación y características dieléctricas. La extensión de las sustancias como furanos ofrece datos cruciales acerca del estado del sistema de aislamiento facilitando la identificación de señales de deterioro o envejecimiento anticipado.

Este análisis posibilita la detección de irregularidades en sus faces iniciales previniendo que se transformen en averías de mayor envergadura así se perfecciona las tácticas de conservación incrementando la fiabilidad del equipo y disminuyendo posibles fallos o interrupciones en el sistema eléctrico lo que favorece a una administración de los recursos eléctricos.

### **3.6.1 Relación de transformación**

El coeficiente de transformación es un indicador esencial en los transformadores potencia esta prueba establece la relación entre el devanado primario y el devanado secundario esto es fundamental para un correcto funcionamiento y asegurar una condición eficaz sin interrupciones de la energía eléctrica asegurando que los niveles de voltaje sean apropiados para la red de distribución y el consumo final de los usuarios.

Cuando la relación de transformación no coincide con la que el fabricante ha especificado en su placa o manual de mantenimiento puede señalar posibles fallos internos tales como cortocircuitos en las espiras, conexiones incorrectas o deterioro del aislamiento [27].

Para la obtención de este parámetro se utilizan ensayos especializados a través de medidores de relación de transformación (TTR), son aparatos creados para la constatación de voltajes asignados a los devanados primarios y secundarios, es de vital importancia analizar estos resultados para detectar posibles fallos en el equipo. Los resultados de las pruebas se examina de acuerdo con la normativa IEEE stdC57.12.90 , lo que facilita la definición de criterios de aceptación y la determinación de la necesidad de intervenciones correctivas para asegurar su operación óptima

De acuerdo con su diseño, un transformador tiene como capacidad de actuar como reductor o elevador o de relación lo que le confiere un rol fundamental en los sistemas eléctricos de potencia especialmente en los sistemas de transmisión de energía eléctrica [28].

### **3.6.2 Resistencia de devanados**

Las evaluaciones a la resistencia de devanados es un indicador de suma importancia para el valor del estado operativo de un transformador de potencia pues posibilita la detección de posibles irregularidades en los conductores internos como conexiones incorrectas deterioros de aislamientos y de material conductor. Para la medición de este se lleva a cabo su medición de una corriente continua a los devanados y la anotación de la caída de voltaje, lo cual permite el cálculo de la resistencia de devanados por medio de la ley de Ohm.

Los resultados que se encuentran de manera anormal pueden señalar el deterioro de las espiras uniones incorrectas o un calentamiento excesivo, lo que impacta la eficiencia y la fiabilidad del transformador de potencia [29].

Las evaluaciones en la resistencia de devanados se los realiza bajo condiciones de temperatura regulada, dado que la resistencia eléctrica de los conductores fluctúa con la temperatura lo que podría ocasionar inconsistencias en los hallazgos. Debido a la eficacia del resultado de estas pruebas este estudio es esencial para la identificación precoz de fallos imprevistos antes de q se transformen en averías serias que pueden afectar el correcto funcionamiento del transformador [28].

### **3.6.3 Análisis de gases disueltos**

El estudio de gases disueltos, también conocido como DGA por sus siglas en ingles es un método que se utiliza para el cálculo dl índice de salud y es esencia para determinar el estado interno de los transformadores de potencia. Este procedimiento permite conocer y medir los gases producidos como resultado de procesos de degradación térmica o eléctrica en el aceite dieléctrico.

La existencia de sustancias como hidrogeno, metano, etano, etileno, acetileno, monóxido de carbono, hidróxido de carbono proporciona datos cruciales de posibles irregularidades como descargas eléctricas y sobrecalentamientos local o deterioro del aislamiento. Para corregir una identificación exacta de el DGA se completa con métodos sofisticados de cromatografía de aceites tal como se ilustra en la Figura 3.6 esto permite la separación y análisis individual de cada gas existente, mejorando la identificación y cuantificación de los compuestos esenciales.

Este análisis es muy importante debido a la capacidad para detectar fallas en fases iniciales se a transformado en un instrumento de suma importancia y de manera crucial en los programas de mantenimientos preventivos y en la administración eficaz de los activos eléctricos. Su principal obtuvo es describir de forma clara y con exactitud los diferentes gases disueltos en el aceite extraído del transformador de potencia ofreciendo un análisis exhaustivo de su condición de funcionamiento y facilitando la aplicación de medidas correctivas con el tiempo [30].



Figura 3.6 Pruebas de aceites[31]

Las principales concentraciones y de los gases producidos en un transformador constituye un índice esencial para valorar su correcto funcionamiento óptimo. Es común que durante el proceso normal de envejecimiento del equipo de generen pequeñas cantidades determinados gases sin embargo cuando se presentan circunstancias anormales, averías o fallas imprevistas estos niveles pueden incrementar considerablemente dando señales de posibles problemas internos.

Los gases que intervendrán en este estudio son el hidrógeno ( $H_2$ ), oxígeno ( $O_2$ ), nitrógeno ( $N_2$ ), metano ( $CH_4$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), etano ( $C_2H_6$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), etileno ( $C_2H_4$ ) y acetileno ( $C_2H_2$ ). La existencia de estos gases dentro del aceite dieléctrico brinda datos de mucha importancia para el diagnóstico del transformador facilitando la identificación de fenómenos como descargas parciales sobrecalentamiento degradación del aislante o fallos térmicas [32].

Los gases que generan el deterioro del transformador juegan un papel crucial en la detección precoz de averías eléctricas y térmicas, se determina su clasificación basándose en su concentración y la interacción de ciertos compuestos que se encuentran dentro del aceite dieléctrico. Su clasificación se determina basándose en la concentración y la interacción de ciertos compuestos una de las señales más significativas es la existencia de acetileno ( $C_2H_2$ ), el cual suele estar asociado generalmente con averías eléctricas, y cuando se encuentra combinación con el metano ( $CH_4$ ) e hidrogeno ( $H_2$ ) indica presencia de un arco de descarga limitado en el aceite dieléctrico.

Este fenómeno marcado por un alta emisión de energía puede causar un declive considerable en el correcto funcionamiento del transformador de potencia afectando el aislamiento impactando la solidez del mismo y así elevando la probabilidad de fallos en las operaciones. Por esta razón el seguimiento continuo de estos gases es esencial para la puesta en marcha de

estrategias de mantenimiento y la prolongación de durabilidad en el equipo. Si además de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>, se encuentran CO<sub>2</sub> y CO, el problema es más crítico esto indica que el arco eléctrico esta en deterioro la solidez del aislamiento del transformador de potencia.

En al caso que se detecte hidrocarburos saturados e insaturados, se puede observar descargas parciales y arcos eléctricos en el combustible si se identifica como C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>, sin presencia de CO ni CO<sub>2</sub>, pero con C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, se lo interpreta como fuertes descargas parciales o arcos eléctricos Enel combustible si se añade CO a la misma mezcla.

Para temperaturas superiores a 500°C, el C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> se vuelve predominante, aunque ocasionalmente pueden aparecer pequeñas cantidades de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> si la temperatura supera 1300°C, el CO<sub>2</sub> se convierte en el gas predominante, indicando una descomposición térmica severa en el transformador, presencia de monóxido y dióxido de carbono (CO + CO<sub>2</sub>) – Indicio de envejecimiento térmico del papel, la degradación del papel impregnado en aceite es un fenómeno normal debido al envejecimiento térmico. Sin embargo, un incremento significativo en los valores de CO y CO<sub>2</sub> puede advertir un deterioro acelerado del aislamiento sólido del transformador, Predominio de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y relación CO/CO<sub>2</sub> superior a 0.1 – Señal de descargas parciales prolongadas, este patrón indica la presencia de mini descargas parciales, las cuales deterioran el aislamiento sólido (papel impregnado) de manera lenta y prolongada, generando un riesgo acumulativo en el sistema, detección exclusiva de hidrógeno (H<sub>2</sub>) – Indicio de pequeñas descargas parciales la presencia aislada de H<sub>2</sub> es un signo temprano de gasificación del aceite, indicando que el transformador está experimentando pequeñas descargas parciales que podrían escalar a fallas mayores, Combinación de nitrógeno (N<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) – Primera manifestación de falla eléctrica la detección de N<sub>2</sub> junto con CH<sub>4</sub> sugiere el inicio de una falla eléctrica incipiente o una falla grave en etapa inicial, Combinación de nitrógeno (N<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>) posible introducción de aire en la parte activa del transformador Este fenómeno es similar a la falla del aislamiento sólido, ya que la presencia de aire puede acelerar la degradación del sistema de aislamiento y generar condiciones adversas para el rendimiento del transformador[33].

Tabla 3.5 Limites de Concentraciones de gases disueltos [34]

Gases	Fórmula	Ppm límite en el transformador
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	100/700
Metano	CH <sub>4</sub>	120/400
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	65/100
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	50/100

Acetileno	$C_2H_2$	2-may
Monóxido de Carbono	CO	350/570
Anhidrido Carbónico	$CO_2$	2500/4000

### 3.6.4 Factor de potencia del líquido

De potencia es un indicador fundamental para el cálculo del índice de salud se encuentra en el subíndice dieléctrico y es esencial ya que representa ,a condición del aislamiento tanto en el medio solido como en el líquido eléctrico este parámetro esta establecido como la proporción entre la potencia activa utilizada de manera efectiva y la potencia aparente total en el sistema, así mostrando la cantidad de energía que se convierte en trabajo útil. Un factor de potencia elevado en el aislamiento puede indicar que existe presencia de humedad en el transformador, contaminación o el envejecimiento del material dieléctrico lo que podría impactar el rendimiento operativo del equipo [35].

Para realiza mediciones se lleva a cabo ensayos mediante la aplicación de una tensión alterna a los devanados y al aceite dieléctrico mediante esta evaluación permite valorar las perdidas energéticas durante la separación. Si el resultado se mantiene dentro de los parámetros definidos se asume que el aislamiento se encuentra en condiciones óptimas de operación no obstante si la variación es notable señala la necesidad de un mantenimiento o incluso la reposición del aceite de serlo así es fundamental un control contante [23].

### 3.6.5 Pruebas Físico - Químicas

Este tipo de pruebas realizan un papel importante al momento de elaborar el cálculo del índice de salud para conocer su estado operativo ofrece datos de suma importancia sobre la calidad de aceite en los transformadores de potencia mediante el análisis de sus propiedades físico químicas, mecánicas y eléctrica. Estas investigaciones permiten identificar con anticipación posibles daños, o el efecto que la condición del aceite podría causar. Para lograrlo se lleva acabo exámenes estandarizados bajo regulaciones y procedimientos reconocidos a escala global

El propósito principal de este estudio es recopilar información técnica y financiera que facilite establecer cuál es la calidad de aceite optimo y su impacto en el aislamiento son fundamentales para valorar el estado interno del transformador y evitar fallos inesperados asi como para definir un plan de mantenimiento [1].

### 3.6.5.1 Rigidez dieléctrica.

El parámetro de rigidez dieléctrica establece la habilidad del líquido aislante para la resistencia a las pruebas sometidas de resistencia de tensión eléctrica sin sufrir ningún tipo de fallas o daños colaterales, la existencia de contaminantes como partículas, fibras celulósicas, suciedad o humedad en los transformadores pueden disminuir su capacidad o elevar su probabilidad de averías eléctricas. Si el resultado es bajo en esta prueba indica la potencia existencial de estos contaminantes en niveles considerables, o obstante un resultado elevado no asegura la eliminación completa de impurezas este ensayo se lleva a cabo al obtener una muestra de aceite del transformador y comprobar su conformidad con las características dieléctricas y térmicas dictadas en estándares técnicos como la IEEE Std C57.106, que define los límites mínimos aceptables y los procedimientos de prueba.

No solo el aceite del transformador desempeña un papel importante en el aislamiento de los devanados sino que también promueve la disipación del calor garantizando un funcionamiento eficaz ya que este se encuentra expuesto a altas tensiones es necesario que se apropie de una correcta rigidez dieléctrica adecuada para evitar errores costosos [36].



Figura 3.7 Ensayo de rigidez dieléctrica

En el aceite se presenta la rigidez dieléctrica que representa tensión mínima requerida para se produzca una descarga eléctrica entre dos electrodos de metal y ofrece una evaluación de su habilidad para soportar esfuerzos eléctricos sin deteriorarse este indicador es esencial para mediar la eficiencia del aceite como un medio aislante del transformador y así garantiza una de cuando funcionamiento en el rendimiento y resguardo ante errores eléctricos [37].

En la norma ASTM D1816 exige la utilización de electrodos de forma de hongo con un diámetro de 36 mm hechos de bronce, tal como se ilustra en la Figura 3.7. Estos deben presentar una pulida impecable para la realización de las pruebas pertinente, sin rayas, picaduras, acumulaciones de carbón ni indicios de corrosión. En el ejercicio, el aceite se mueve a través de un impulsor impulsado por un motor de dos paletas. En esta secuencia se rige rigurosas normas establecidas, detallando las dimensiones del impulsor, su flujo y una velocidad de

operación que debe mantenerse entre 200 y 300 revoluciones cada minuto. Esto se especifica que para prevenir que el aceite se mezcle con el aire durante el flujo circulatorio, el vaso de prueba debe tener una tapa o deflector [38].

### 3.6.5.2 Tensión interfacial.

En la prueba del análisis interfacial de tensión es un estudio mecánico que, desde una perspectiva química obtenida, ofrece datos esenciales acerca de la pureza y el potencial envejecimiento de un aceite mineral dieléctrico presente en los transformadores de potencia. A pesar de que su fundamento se fundamenta en características mecánicas, esta evaluación evalúa la fuerza requerida para eliminar un anillo de platino-iridio de la interfase entre el agua y el aceite. El resultado de este valor puede ser alterado por la existencia de elementos que poseen oxígeno u otros elementos de propiedades polares, que pueden reducir la capacidad dieléctrica del aceite.

Considerando su importante relevancia, la prueba de tensión interfacial es un instrumento esencial para valorar la condición de los aceites dieléctricos presentes en los transformadores de potencia en operación, pues facilita la identificación precoz de procesos de oxidación y la potencial existencia de contaminantes en el aceite dieléctrico. En la Figura 3.8 se muestra un tensiómetro de superficie, herramienta empleada para efectuar esta medición con gran exactitud, ofreciendo información crucial para establecer la calidad y el grado de contaminación del aceite.



Figura 3.8 Tensiómetro para prueba de tensión interfacial.[39]

### 3.6.5.3 Número de acidez.

Para la correcta medición de la acidez en los líquidos aislantes, se basa en establecer la cantidad de compuestos ácidos o contaminantes que contienen el aceite dieléctrico. Esta acidez surge a partir de la creación de productos derivados de la oxidación del aceite.

La mezcla o combinación de sustancias ácidas con agua y otras partículas contaminantes puede poner en riesgo las características dieléctricas del líquido en los transformadores de potencia, además de otros elementos esenciales de su funcionamiento óptimo. La existencia de estos compuestos dentro del aceite dieléctrico intensifica la degradación de los materiales celulósicos y promueve la corrosión de los componentes metálicos dentro del transformador.

El incremento a velocidades increíbles en la acidez del líquido aislante es un indicador preciso del proceso de envejecimiento del aceite dieléctrico. Se presentan cuando la cantidad de neutralizaciones llega a niveles altos, ineludible es la creación de lodos, lo que puede obstaculizar el correcto funcionamiento del transformador, perjudicando su eficiencia y durabilidad del transformador de potencia [40].

Las pruebas de acidez también conocidas como el número de neutralización, también conocido como número ácido, determina la existencia de compuestos ácidos en el aceite, ofreciendo una medida directa del declive de sus características aislantes. Un aumento en la acidez generalmente se asocia con la creación de lodos, que pueden bloquear los canales de refrigeración y poner en riesgo la pérdida de calor del transformador. Por lo tanto, se disminuye su capacidad de funcionamiento y se restringe su rendimiento nominal, lo que podría impactar su eficacia y durabilidad [41].

#### **3.6.5.4 Contenido de humedad.**

La presencia de humedad en los transformadores de potencia presentes en el aceite es uno de los tipos de contaminación más comunes en los transformadores ubicados en las instalaciones industriales. Este inconveniente puede surgir debido a la absorción de aire durante la operación del aparato, además de fallos en las uniones de sellado o fugas en su estructura. La penetración de humedad no solo pone en riesgo las características dieléctricas del aceite, sino que también intensifica el envejecimiento de los materiales aislantes, incrementando la probabilidad de errores en el transformador [42]

El agua puede aparecer en diversas formas en los líquidos aislantes. Una revisión visual facilita la identificación de agua libre, que se evidencia en un tono turbio del aceite o en la creación de gotas que suelen terminar en el fondo de la muestra. Este tipo de polución puede ser eliminado a través de la filtración u otros métodos especializados. No obstante, el agua disuelta en el aceite no se puede apreciar visualmente y necesita procedimientos físicos o químicos para su

determinación. La existencia de humedad disuelta puede poner en riesgo la rigidez dieléctrica del aceite, aunque su influencia fluctúa en función de elementos como el grado de saturación de humedad, la presencia de agua y la clase de contaminantes presentes en la muestra. Estos elementos establecen la gravedad del problema y las acciones correctivas requeridas para preservar el rendimiento correcto del aceite aislante.

### 3.6.5.5 Color de aceites.

La tonalidad oscura del aceite es una de las primeras señales que indican la necesidad de filtrarlo o reemplazarlo en el transformador. Con el paso del tiempo y el envejecimiento, el aceite pasa gradualmente de un tono amarillo claro y transparente a un marrón oscuro opaco. En general, los aceites utilizados en transformadores deben someterse a filtrado o cambio, idealmente cada seis meses, para evitar posibles daños en el equipo. La prueba del color es un método sencillo y efectivo para evaluar la antigüedad del aceite y determinar si puede seguir funcionando correctamente. El aceite más reciente suele presentar tonos como amarillo, naranja o incluso rojizo, los cuales indican que sus propiedades aislantes se mantienen como se puede observar en la Figura 3.9. Sin embargo, a medida que envejece, adopta tonalidades marrones o negras, lo que reduce su efectividad. Cuando esto ocurre, el transformador se vuelve más susceptible a problemas como arcos eléctricos, descargas de corona, sobrecalentamiento o una menor resistencia del aislamiento. Por esta razón, la evaluación del color del aceite es un paso crucial para asegurar el buen funcionamiento del transformador[43].

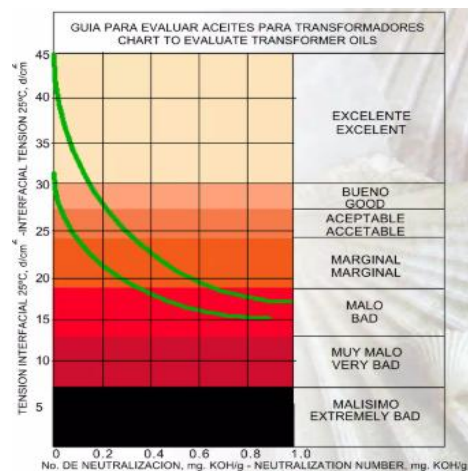


Figura 3.9 Guía de evolución de color de aceite[44].

### **3.6.5.6 Factor de disipación**

Un material dieléctrico es aquel que, aunque no conduce electricidad de manera eficiente, permite la formación de un campo electrostático. Al ser expuesto a este tipo de campo, un material aislante genera dipolos debido a la interacción entre cargas eléctricas opuestas en su estructura interna. Este fenómeno está vinculado al llamado factor de potencia, el cual mide las pérdidas dieléctricas que se producen en un fluido aislante bajo la acción de un campo eléctrico alterno, así como la energía que se disipa en forma de calor. Cuando el factor de disipación es bajo, indica que las pérdidas dieléctricas son reducidas. Este indicativo es fundamental tanto para monitorear la calidad del aceite como para detectar posibles alteraciones ocasionadas por contaminación, envejecimiento o una manipulación inadecuada[45].

### **3.6.6 Gases Furanos**

Este permite determinar el nivel de degradación del papel aislante en un transformador mediante la medición de su grado de polimerización lo que facilita saber la estimación de su vida útil remanente. Se complementa con la cromatografía de gases en la detección de CO<sub>2</sub> y CO, siendo especialmente recomendable para equipos que han superado los 12 años de operación. Los compuestos furánicos son indicativos esenciales del deterioro del aislamiento celulósico, ya que su presencia en el aceite dieléctrico refleja el proceso de envejecimiento del papel aislante. No obstante, su estabilidad a altas temperaturas y su comportamiento en interacción con el aceite o el papel aún no han sido completamente definidos, lo que sugiere la necesidad de estudios adicionales para una mejor interpretación de sus efectos en el sistema de aislamiento[46].

El análisis de furanos es crucial para evaluar el estado del aislamiento en un transformador, ya que estos compuestos evidencian el nivel de deterioro del material celulósico. Su concentración en el aceite dieléctrico depende de diversos factores, como la cantidad inicial presente la degradación progresiva de la celulosa, su distribución entre el aceite y el papel, así como su estabilidad química. Un incremento en sus niveles puede advertir sobre una degradación avanzada, lo que haría necesario tomar medidas correctivas para prolongar la vida útil del equipo y evitar fallas inesperadas[47].

#### **3.6.6.1 Papel aislante**

El papel Kraft en un material esencial en los transformadores, se fabrica a partir de pulpa de madera mediante el proceso Kraft, lo que le otorga características sobresalientes. Su capacidad

para impregnarse con aceite lo hace ideal para aplicaciones eléctricas, asegurando un óptimo desempeño. Además, combina flexibilidad y maleabilidad con una gran resistencia mecánica y una alta rigidez dieléctrica, cualidades que lo convierten en un material de referencia en la industria eléctrica la Figura 3.10.[48]

- 2-Furaldehído (2-FAL): Se genera como resultado del sobrecalentamiento general de la celulosa o como parte del proceso natural de envejecimiento del papel aislante.



Figura 3.10 Papel aislante[48]

## 4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene como objetivo principal la generación de un catastro de los transformadores de potencia ubicados en las subestaciones administradas por la empresa distribuidora, con un enfoque específico en la evaluación de su estado a través del cálculo del Índice de Salud (Health Index - HI). Este análisis permitirá determinar la condición operativa de cada transformador, facilitando la toma de decisiones en cuanto a mantenimiento, rehabilitación o reemplazo. Las subestaciones involucradas en este estudio se dividen en aquellas ubicadas en la ciudad de Latacunga: SUBESTACIÓN 1, SUBESTACIÓN 2, SUBESTACIÓN 3, SUBESTACIÓN 4, SUBESTACIÓN 5, SUBESTACIÓN 6, SUBESTACIÓN 7, SUBESTACIÓN 8, SUBESTACIÓN 9, SUBESTACIÓN 10.

Los transformadores de potencia instalados en estas subestaciones representan activos de alto valor económico y estratégico. Sin embargo, su exposición continua a condiciones operativas adversas y el envejecimiento natural generan riesgos potenciales que podrían comprometer la continuidad del servicio eléctrico. Para mitigar estos riesgos, el estudio se enfocará en el análisis detallado de los transformadores mediante la aplicación de un modelo basado en el Índice de Salud. El Índice de Salud será determinado mediante la recopilación y análisis de datos técnicos clave, organizados en dos principales categorías:

Tabla 4.1 Parámetros de Evaluación del Transformador y Métodos de Medición

Concepto	¿Qué prueba se hace?	¿Con qué instrumento?	¿Qué unidades se obtiene?
Subíndice funcional			

Relación de transformación	Se verifica la proporción entre el número de vueltas del devanado primario y secundario, determinando la correcta transformación del voltaje.	Medidor de relación (ratio meter)	Valor numérico (relación, sin unidad)
Resistencia de devanados	Se mide la resistencia eléctrica de los devanados para identificar posibles defectos, sobrecalentamientos o degradación interna.	Micro ohmímetro o medidor de resistencia Kelvin	Ohmios ( $\Omega$ )
Análisis de Gases Disueltos (DGA)	Se analiza el contenido de gases disueltos en el aceite (Hidrógeno, Metano, Etano, Etileno, Acetileno, Dióxido de Carbono y Monóxido de Carbono) para detectar fallas internas.	Cromatógrafo de gases o analizador DGA	Ppm (partes por millón)
<b>Subíndice Dieléctrico</b>			
Furanos: 2-Furaldehído (2-FAL)	Se mide la concentración de 2-Furaldehído, indicador de degradación en el aceite dieléctrico.	Cromatógrafo o espectrofotómetro	mg/kg o ppm
Rigidez dieléctrica	Se determina la tensión máxima que el aceite dieléctrico puede soportar antes de producir una descarga eléctrica.	Medidor de rigidez dieléctrica	kV o kV/mm
Tensión interfacial	Se evalúa la tensión superficial del aceite, lo que permite identificar el estado de oxidación o la presencia de impurezas.	Tensiómetro	mN/m
Número de acidez	Se cuantifica la cantidad de ácidos presentes en el aceite, reflejando su grado de degradación.	Titulador (automático o manual)	mg KOH/g
Contenido de humedad	Se mide el porcentaje de agua presente en el aceite, factor que afecta sus propiedades dieléctricas.	Medidor de humedad o equipo Karl Fischer	% o ppm
Color	Se evalúa la intensidad y tonalidad del color del aceite, indicador de su estado y presencia de contaminantes.	Espectrofotómetro o comparador de color	Escala de color (según norma ASTM u otra)
Factor de potencia del líquido dieléctrico	Se determina el factor de potencia ( $\tan \delta$ ) del aceite, indicador de pérdidas dieléctricas y presencia de contaminantes.	Medidor de factor de potencia o analizador $\tan \delta$	Valor adimensional o porcentaje (%)

Los resultados obtenidos serán ponderados según su importancia relativa dicha información véase ANEXO A, ANEXO B, ANEXO C, ANEXO D, ANEXO E, ANEXO F, ANEXO G, ANEXO H, ANEXO I y ANEXO J adjuntos en la degradación del transformador y normalizados en un índice global expresado en porcentaje. Este índice clasificará el estado de los transformadores en cinco categorías: Muy bueno, Bueno, Regular, Pobre o Muy pobre.

Dado que los transformadores de potencia son activos esenciales en la infraestructura eléctrica, su condición influye directamente en la estabilidad y seguridad del sistema de distribución de energía. Un fallo catastrófico podría generar interrupciones prolongadas del servicio y costos de reparación.

## 4.2 DECLARACIÓN DE VARIABLES.

### 4.2.1 Variable Independiente

- Índice Funcional
- Índice de Dieléctrico

### 4.2.2 Variable Dependiente

- Índice de Salud (HI)

### **4.3 DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS PROCESOS A REALIZAR**

En la figura 4.1 se da a conocer el diagrama de flujo, mismo que resume proceso en el cual se realiza el cálculo para el índice de salud.

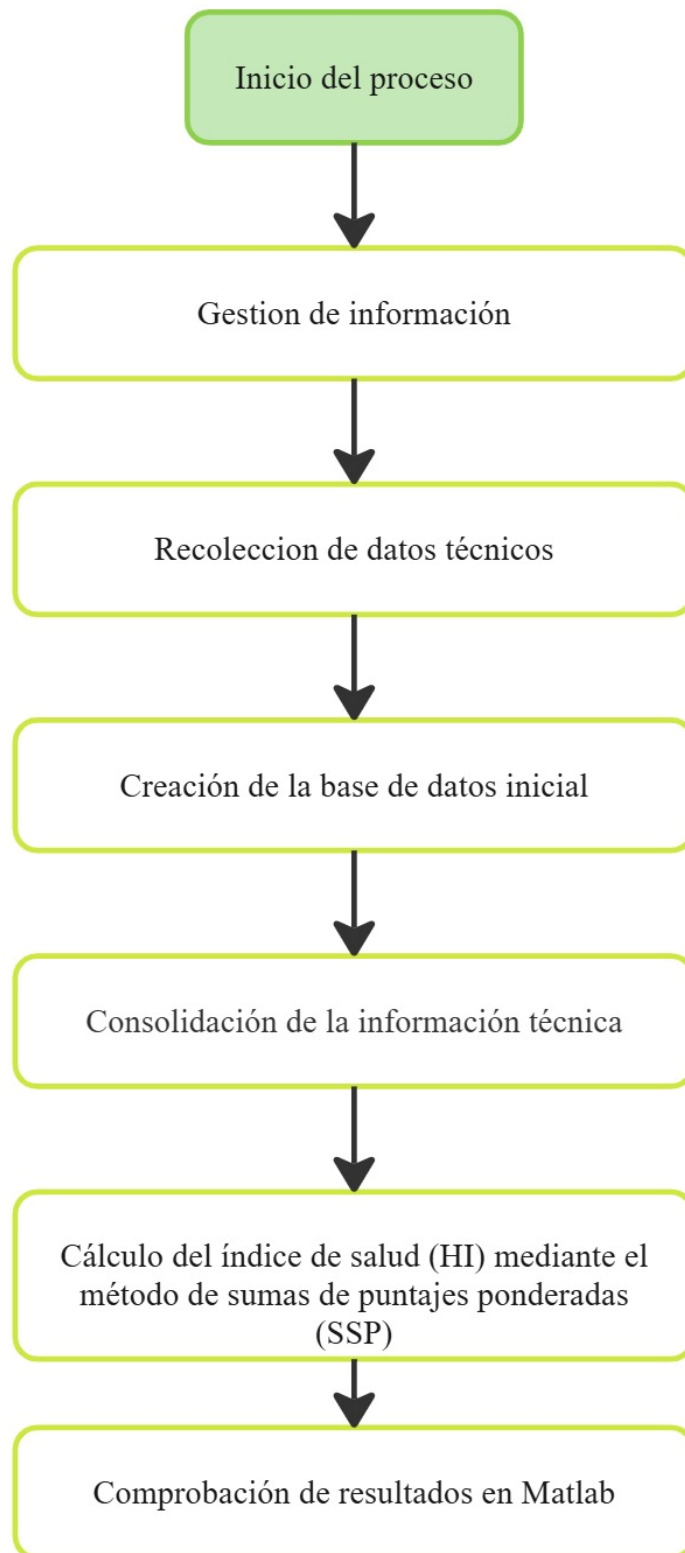


Figura 4.1 Diagrama de flujo del desarrollo del sistema de adquisición de datos.

## 4.4 DATOS DE ENTRADA

### 4.4.1 Datos de placa

La Tabla 4.2 “Datos técnicos de la placa” detalla de forma técnica la relevancia que llegan a tener los diversos transformadores de potencia al momento de ser instalados dentro de las subestaciones. Esto incluye parámetros como la tensión de operación, capacidad, antigüedad, fabricante, configuración de conexión, peso y sistema de enfriamiento. Con respecto a la tensión de operación los transformadores reflejan un voltaje cuentan con un voltaje primario de 69 kV y un voltaje secundario que fluctúa entre 13.8 kV y 13.17 kV. Cabe mencionar que la capacidad de los equipos oscila entre 2 MVA y 20 MVA, reflejando diferencias en la demanda energética de cada subestación.

Los transformadores cuentan con una antigüedad de 18 años, reflejando así que en la actualidad indica una combinación de tecnologías tanto recientes como más antiguas dentro del sistema eléctrico. Con respecto a la configuración, todos los equipos cuentan con una conexión Delta-Estrella y el sistema de enfriamiento, en su mayoría opera bajo el esquema ONAN/ONAF, mientras que algunos transformadores funcionan exclusivamente con refrigeración ONAN. Los datos en mención permiten evaluar la condición operativa de los transformadores y optimizar su mantenimiento.

Tabla 4.2 Datos técnicos de la placa

SUBESTACIÓN	V <sub>PRI</sub> (KV)	V <sub>SEC</sub> (KV)	MVA	AÑO	MARCA	NÚMERO DE SERIE	CONEXIÓN PRIMARIA	SECUNDARIA CONEXIÓN	PESO(KG)	ENFRIAMIENTO
SUBESTACIÓN 1	69	13.8	5	1974	FEDERAL PIONEER	65.988	DELTA	ESTRELLA	12644	ONAN/ONAF
SUBESTACIÓN 2	69	13.9	20	2015	SHENDA ELECTRIC	SF11-200069	DELTA	ESTRELLA	32500	ONAN/ONAF
SUBESTACIÓN 3	69	13.1	12.5	1988	MITSUBISHI	8.817.600.103	DELTA	ESTRELLA	20700	ONAN
SUBESTACIÓN 4	69	13.11	20	1998	PAWELS TRAF0	9.724.217	DELTA	ESTRELLA	26200	ONAN/ONAF
SUBESTACIÓN 5	69	13.12	12.5	1987	MITSUBISHI	8.771.710.101	DELTA	ESTRELLA	20700	ONAN
SUBESTACIÓN 6	69	13.13	12.5	1995	MITSUBISHI	8.771.740.101	DELTA	ESTRELLA	20800	ONAN
SUBESTACIÓN 7	69	13.14	2	2018	TAKAI		DELTA	ESTRELLA	40500	ONAN
SUBESTACIÓN 8	69	13.15	20	2015	SHENDA ELECTRIC	CK141205-1	DELTA	ESTRELLA	32500	ONAN/ONAF

SUBESTACIÓN 9	69	13.16	6.25	1999	PAWELS TRAFO	9.924.085	DELTA	ESTRELLA	14700	ONAN/ONAF
SUBESTACIÓN 10	69	13.17	2.5	1987	SHILIN ELCTRIC	877.150.108	DELTA	ESTRELLA	10100	ONAN

#### 4.4.2 Datos de pruebas de relación de transformación y resistencia de devanados

La Relación de Transformación se verifica para garantizar que el devanado mantiene la proporción correcta entre los voltajes de entrada y salida, mientras que la Resistencia de Devanados se mide para detectar posibles variaciones debidas a conexiones defectuosas, cortocircuitos o envejecimiento del material conductor[28].

En la Tabla 4.2 muestra los resultados de las pruebas de Relación de Transformación y Resistencia de Devanados, esenciales para verificar el estado de los devanados y detectar posibles anomalías.

Tabla 4.3 Datos Relación de transformación y resistencia de devanados.

NOMBRE SUBESTACIÓN	RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN	RESISTENCIA DE DEVANADOS
	PRUEBA	PRUEBA
SUBESTACIÓN 1	0.01	1
SUBESTACIÓN 2	0.02	0.5
SUBESTACIÓN 3	0.1	1
SUBESTACIÓN 4	0.02	1
SUBESTACIÓN 5	0.02	1
SUBESTACIÓN 6	0.01	0.01
SUBESTACIÓN 7	0.02	1
SUBESTACIÓN 8	0.1	0.5
SUBESTACIÓN 9	0.02	1
SUBESTACIÓN 10	0.02	1

#### 4.4.3 Datos de pruebas de Análisis de Gases Disueltos (DGA).

La Tabla 4.3 muestra los resultados del análisis de gases disueltos (DGA) de la empresa distribuidora. La metodología permite identificar posibles fallas internas, como descargas parciales, sobrecalentamientos y arcos eléctricos, mediante la evaluación de la concentración y la relación entre gases como hidrógeno, metano, etano, etileno, acetileno, dióxido de carbono y monóxido de carbono. Estos parámetros son clave para diagnosticar el estado operativo del transformador y prevenir fallas catastróficas [49].

Tabla 4.4 Resultados Prueba de Análisis de Gases de la empresa distribuidora.

SUBESTACIÓN	H2 ppm	CH4 ppm	C2H6 ppm	C2H4 ppm	C2H2 ppm	CO ppm	CO2 ppm
SUBESTACIÓN 1	5	5	1	16	0	115	1120
SUBESTACIÓN 2	9	8	0	0	0	352	712
SUBESTACIÓN 3	61	14	9	5	0	38	1480
SUBESTACIÓN 4	3	5	0	4	0	601	3080
SUBESTACIÓN 5	32	16	5	6	0	23	1370
SUBESTACIÓN 6	4	0	0	0	0	74	850
SUBESTACIÓN 7	6	1	0	0	0	93	207
SUBESTACIÓN 8	6	1	0	0	0	93	207
SUBESTACIÓN 9	3	0	0	0	0	38	730
SUBESTACIÓN 10	16	2	0	10	0	153	1310

#### 4.4.4 Resultados de Factor de potencia.

La siguiente Tabla 4.4 se refleja los valores del factor de potencia obtenidos por la empresa distribuidora.

Tabla 4.5 factor de potencia

	FACTOR DE POTENCIA
SUBESTACIÓN 1	PRUEBA
SUBESTACIÓN 2	0,4
SUBESTACIÓN 3	0.4
SUBESTACIÓN 4	0.01
SUBESTACIÓN 5	0.5
SUBESTACIÓN 6	0.5
SUBESTACIÓN 7	0.5
SUBESTACIÓN 8	0.4
SUBESTACIÓN 9	0.4
SUBESTACIÓN 10	0.5

#### 4.4.5 Datos de pruebas de Calidad de Aceite (OQ).

Las pruebas de calidad de aceite se reflejan en la Tabla 4.6 las mismas que detallan la rigidez dieléctrica; contenido de humedad; número de acidez; tensión interfacial; factor de disipación del líquido dieléctrico. Los parámetros esenciales para determinar la capacidad del aceite deben proporcionar un adecuado aislamiento y disipación térmica. El deterioro en estos valores puede indicar contaminación por agua, oxidación, presencia de compuestos ácidos o degradación del aislamiento. Estos detallan pueden comprometer la confiabilidad operativa del transformador [50].

Tabla 4.6 Resultados OQ de la empresa distribuidora

	RIGIDEZ DIELECTRICA (Kv/mm)	TENSION INTERFACIAL (mN/m)	Numero de ACIDEZ (mg KOH/g)	CONTENIDO DE HUMEDAD (ppm)	COLOR	FACTOR DE DISCAPACIÓN
NOMBRE SUBESTACIÓN	PRUEBA	PRUEBA	PRUEBA	PRUEBA	PRUEBA	PRUEBA
SUBESTACIÓN 1	46	40	0.02	10	2	0.1
SUBESTACIÓN 2	49	47	0.01	9	0.5	0.1
SUBESTACIÓN 3	57	41	0.02	40.1	1	0.1
SUBESTACIÓN 4	56	44	0.02	12	1	0.1
SUBESTACIÓN 5	56	43	0.02	12	1	0.1
SUBESTACIÓN 6	52	43	0.04	11	1.5	0.1
SUBESTACIÓN 7	59	47	0.01	5	0.5	0.1
SUBESTACIÓN 8	50	47	0.02	4	0.5	0.1
SUBESTACIÓN 9	58	45	0.02	6	0.5	0.1
SUBESTACIÓN 10	55	44	0.02	10	1	0.1

#### 4.4.6 Datos de pruebas de Grado de Polimerización (DP).

Los resultados del grado de polimerización se reflejan en la Tabla 4.7 los mismos que son resultados del grado de polimerización (DP) en los transformadores de potencia, evaluados a partir de la concentración de 2-furaldehído (2-FAL) en el aceite dieléctrico.

Uno de los parámetros fundamentales para determinar el estado del grado de polimerización (DP) es el estado del papel aislante, ya que permite medir la degradación progresiva de la celulosa con el paso del tiempo. La existencia de 2-furaldehído (2-FAL) en el aceite actúa como un indicador directo del deterioro térmico del aislamiento sólido. Una de las señales de deterioro avanzado del aislamiento son los niveles elevados de 2-FAL lo que puede ocasionar una reducción significativa en la vida útil del transformador. Por este motivo, es esencial el monitoreo de este parámetro para la planificación del mantenimiento y la gestión del riesgo operativo, lo mismo que permite implementar acciones preventivas para optimizar el desempeño y la confiabilidad del equipo eléctrico [51].

Tabla 4.7 Resultados Grado de Polimerización (DP) de la empresa distribuidora.

NOMBRE SUBESTACIÓN	2-FAL (ppb)
SUBESTACIÓN 1	710
SUBESTACIÓN 2	740
SUBESTACIÓN 3	701
SUBESTACIÓN 4	707
SUBESTACIÓN 5	701
SUBESTACIÓN 6	745
SUBESTACIÓN 7	728

SUBESTACIÓN 8	704
SUBESTACIÓN 9	740
SUBESTACIÓN 10	742

#### 4.5 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SALUD.

La combinación de datos de monitoreo, asignando puntajes ponderados a diversas pruebas diagnósticas nos permite conocer el índice de salud del transformador de potencia. Para el presente estudio, se recopilarán datos técnicos de los transformadores. Esto nos permitirá aplicar la metodología basada en la suma de puntajes ponderados.

El diagrama de bloques de esta metodología se la puede observar en la Figura 4.2, la misma que refleja que los parámetros de evaluación se convierten en factores de salud (HIF), que luego son ponderados para calcular un índice total. Este índice nos facilita la toma de decisiones al poder conocer cuando se deberá gestionar mantenimiento en cuanto a mantenimiento y gestionar posibles riesgos, a fin de optimizar la confiabilidad y eficiencia de los transformadores operativos.

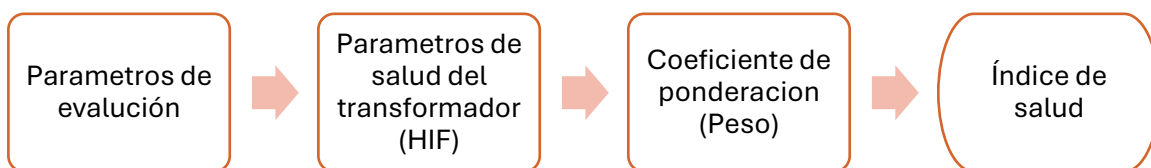


Figura 4.2 Diagrama de bloques de la metodología de cálculo del HI

- **Parámetros de evaluación:** Son las pruebas y análisis al transformador para valorar su estado técnico y operativo.
- **Parámetros de salud del transformador (HIF):** Para cada prueba realizada se tomará como referencia los pesos y ponderaciones según la metodología de suma de puntajes ponderados, si el resultado de una prueba es altamente desfavorable, se asignará el valor más bajo. Por el contrario, si el resultado es óptimo, se asignará el valor más alto del rango.
- **Coeficiente de ponderación (Peso):** Depende de la relevancia de cada prueba en el diagnóstico del estado del transformador.
- **Cálculo del índice de salud (HI):** Consiste en la combinación ponderada de los valores asignados a todas las pruebas realizadas, lo que permite determinar el estado general del transformador.

Los valores correspondientes de los parámetros de salud del transformador (HIF) y al Coeficiente de Ponderación (Peso), utilizados en la metodología presentada en la Figura 4.2, se determinan con base en las directrices establecidas por las normativas internacionales.

El cálculo del Índice de Salud (HI) de los transformadores se lleva a cabo utilizando la ecuación (4. 1) en la cual se consideran todos los parámetros y factores recopilados para determinar de manera integral el estado operativo de los equipos.

$$HI_{total} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i * HIF_i}{\sum_{i=1}^n K_i} \quad (4. 1)$$

Donde:

$HIF_i$ = Es el indicador de salud asociado a la prueba de los transformadores se asigna en función de los resultados obtenidos durante la evaluación, de acuerdo con lo especificado en la Tabla 4.7 El rango posible para el valor del HI de cada parámetro varía entre 0 y 4.

$k_i$ = Factor de peso asignado en base a la normativa, con un rango de 1 a 10, que refleja la relevancia de los resultados obtenidos en la evaluación de la condición del transformador.

n= Numero de pruebas realizadas

Tabla 4.8 Condiciones y vales del HI[24].

HIF	CONDICIÓN
4	MUY BUENO
3	BUENO
2	REGULAR
1	POBRE
0	MUY POBRE

De acuerdo con la ecuación (1), el cálculo del Índice de Salud (HI) se obtiene sumando los productos entre el peso asignado a cada parámetro y su respectivo factor de salud, dividiendo este valor por la suma total de los pesos y multiplicándolo por la puntuación máxima establecida. El resultado del HI varía en un rango de 0 a 100 %, donde 0 % representa la peor condición posible y 100 % indica el mejor estado operativo.

El análisis del transformador de potencia (TP) se desglosa en dos subíndices, como se establece en la ecuación (4.2), utilizada para calcular un índice de salud global del equipo. El primer subíndice, conocido como funcional, se determina mediante pruebas eléctricas como resistencia de devanados, relación de transformación, corriente de excitación y análisis de gases disueltos (DGA). Por otro lado, el subíndice dieléctrico se deriva del estudio del aceite aislante y la medición del factor de potencia del TP. Este enfoque permite evaluar el estado del transformador en dos aspectos clave, facilitando la detección de posibles fallos en ubicaciones específicas del equipo.

$$HI_{total} = (0,5 * HI_{funcional}) + (0.5 * HI_{dielectrico}) \quad (4.2)$$

Donde:

$HI_{Funcional}$  = Son los índices de salud de las pruebas realizada; relación de transformación, Resistencia de devanados y análisis de gases disueltos.

$HI_{dielectrico}$  = Son los índices de salud de las pruebas realizada; factor de potencia, pruebas físico químicas, y gases furanos.

La Tabla 4.8 presenta la propuesta para la evaluación final, incorporando un sistema de codificación por colores que permite visualizar y analizar de manera más clara y rápida el estado del transformador de potencia (TP). Este enfoque gráfico facilita la interpretación de los resultados, agilizando la toma de decisiones sobre su condición operativa[24].

Tabla 4.9 Evaluación de condición [24]

% Condición	Clasificación	Recomendación	COLOR
86 - 100	Muy bueno	Programar mantenimiento normal	Azul
71 - 85	Bueno	Programar mantenimiento normal	Verde
51 - 70	Regular	Incrementar las pruebas de diagnóstico	Amarillo
31 - 50	Pobre	Comenzar a planificar el reemplazo o reparación considerando el alto riesgo	Naranja
0 - 30	Muy pobre	Evaluar el riesgo de inmediato	Rojo

#### 4.5.1 Subíndice de salud funcional

Para realizar el cálculo del subíndice de salud funcional se analizan las pruebas detalladas en la Tabla 4.10 donde se especifican las pruebas que se necesita para dicho subíndice en la que se asigna pesos para cada prueba. Los factores varían según la relevancia de cada prueba y su impacto en la estimación de la vida útil remanente del transformador, lo que permite una

evaluación más precisa de su estado operativo. En este subíndice se analizan las evaluaciones presentadas en la Tabla 4.10, donde se detallan los pesos asignados a cada prueba.

Estos coeficientes han sido definidos en función de la criticidad de cada evaluación y su relación con la vida útil del equipo. A continuación, se describen las pruebas utilizadas para determinar el Índice de Salud Funcional (HI funcional). Este subíndice permite diagnosticar el estado operativo del transformador mediante un análisis detallado de sus parámetros clave.

Tabla 4.10 Pesos de índice funcional[52].

Pruebas	PESOS (K)
Relación de transformación	8
Resistencia de devanados	6
Análisis de gases disueltos	10

#### 4.5.2 Criticidad para el cálculo de Relación de Transformación

Los criterios de evaluación de la Relación de Transformación (RT) en función de su nivel de criticidad se pueden observar en la Tabla 4.11, La cual establece una clasificación en distintas categorías de condición. La identificación del impacto que puede generar un error en la relación de transformación sobre el desempeño del transformador de potencia se puede identificar en esta clasificación. Al asignar categorías específicas, se proporciona una referencia cuantitativa que permite analizar con mayor precisión el estado operativo del equipo. Este enfoque es esencial para la detección temprana de desviaciones logrando así optimizar las estrategias de mantenimiento, garantizando así el correcto funcionamiento del transformador dentro del sistema eléctrico.

Tabla 4.11 Criticidad de Relación de transformación (RT)[52].

HI		
CONDICIÓN	DESCRIPCION	HI-RT
MUY BUENO	$RT \leq 0,1$	4
BUENO	$0,1 < RT \leq 0,5$	3
REGULAR	$0,5 < RT \leq 1,0$	2
POBRE	$1,0 < RT \leq 2,0$	1
MUY POBRE	$RT \geq 2,0$	0

### 4.5.3 Criticidad para el cálculo de Resistencia de devanados

La resistencia de devanados y su comparación consiste en la medición de cada devanado y su comparación respectiva. Se obtiene el porcentaje de error en la resistencia (%resistencia) corresponde a la diferencia máxima detectada entre las mediciones realizadas y se lo expresa en porcentaje. La Tabla 4.11 se presentan los valores del factor del índice de salud asociados a esta prueba.

Tabla 4.12 Criticidad Resistencia de devanados[8].

HI		
CONDICIÓN	DESCRIPCION	HI-RD
MUY BUENO	$RD \leq 1,0$	4
BUENO	$1,0 < RD \leq 2,0$	3
REGULAR	$2,0 < RD \leq 3,0$	2
POBRE	$3,0 < RD \leq 5,0$	1
MUY POBRE	$RD \geq 5,0$	0

### 4.5.4 Condiciones para el cálculo de Análisis De Gases Disueltos

La prueba DGA se evalúa conforme a los criterios establecidos en la Tabla 4.12 para determinar el Índice de Salud Funcional (HIF). Cada gas medido cuenta con un puntaje asignado ( $S_j$ ) y un peso correspondiente ( $W_j$ ). A través de la aplicación de la ecuación (4.3), se calcula el factor DGAF, cuyos valores de referencia se encuentran detallados en la Tabla 4.12

$$(\%)DGAF = \frac{\sum_{i=1}^7 S_i * W_i}{\sum_{i=1}^7 S_{\max i} * W_i} * 100 \quad (4.3)$$

Donde:

$S_i$  = Puntaje asignado dependiendo las tablas de criticidad.

$W_i$  = Pesos asignados dependiendo las variables de criticidad.

$S_{\max i}$  = Número máximo que puede tener el puntaje asignado.

Tabla 4.13 HI para la prueba DGAF [53]

HI		
CONDICIÓN	DESCRIPCION	HI-DGAF
MUY BUENO	$DGAF \leq 20\%$	4

BUENO	20%<DGAF≤30%	3
REGULAR	30%<DGAF≤40%	2
POBRE	40%<DGAF≤50%	1
MUY POBRE	DGAF≥50%	0

Tabla 4.14 Puntajes y Pesos para Pruebas DGAF [35]

GAS (ppm)		PUNTAJE						PESO
		1	2	3	4	5	6	
<b>Hidrogeno</b>	H2	≤100	(100-200)	(200-300)	(300-500)	(500-700)	(<700)	2
<b>Metano</b>	CH 4	≤75	(75-125)	(125-200)	(200-400)	(400-600)	(<600)	3
<b>Etano</b>	C2 H6	≤ 65	(65-80)	(80-100)	(100-120)	(120-150)	(<150)	1
<b>Etileno</b>	C2 H4	≤50	(50-80)	(80-100)	(100-150)	(150-200)	(<200)	3
<b>Acetileno</b>	C2 H2	≤3	(3-7)	(7-35)	(35-50)	(50-80)	(<80)	5
<b>Dióxido de carbono</b>	CO	≤350	(350-700)	(700-900)	(900-1100)	(1100-1400)	(<1400)	1
<b>Monóxido de carbono</b>	CO 2	2500	(2500-3000)	(3000-4000)	(4000-5000)	(5000-7000)	(<7000)	1

Finalmente, el Índice de Salud Funcional (HI funcional) se obtiene mediante el procesamiento de los valores de HIF y el factor de ponderación K, los cuales son derivados de todas las pruebas realizadas. Estos datos permiten evaluar el estado operativo del transformador considerando múltiples parámetros clave. Para su cálculo, se aplica la ecuación (4.1), que integra los resultados individuales de cada prueba en un valor.

#### 4.5.5 Procedimiento para el Cálculo del Subíndice de salud dieléctrico

Siguiendo una metodología similar a la utilizada para el cálculo del Índice de Salud Funcional (HI funcional), las pruebas destinadas a la evaluación del Índice de Salud Dieléctrico (HI dieléctrico) reciben una puntuación dentro de un rango de 1 a 10, en función de la importancia y el impacto de cada prueba en la evaluación del estado del transformador.

Para el análisis integral los valores permiten ponderar la importancia en el análisis integral del aislamiento del equipo, con ello asegurando una valoración precisa de su estado dieléctrico y su operación óptima. El factor de peso asignado en la la Tabla 4.15 correspondiente a cada prueba, proporcionando un criterio cuantitativo que facilita la interpretación de los resultados obtenidos y para así optimizar la planificación de acciones correctivas o preventivas en la gestión del transformador.

Tabla 4.15 Pesos de pruebas dieléctricas[52]

PRUEBAS	PESOS (K)
Factor de potencia	10
Calidad del aceite, contenido de humedad y factor de potencia del líquido	6
Contenido de compuestos furánicos	8

Las pruebas empleadas en la determinación del Índice de Salud Dieléctrico (HI dieléctrico) se detallan a continuación.

#### 4.5.6 Ponderaciones de Criticidad para el cálculo de Factor de potencia.

Mediante esta prueba se puede determinar signos de degradación esta prueba es esencial para determinar la calidad del aislamiento en el transformador, ya que permite detectar posibles signos de envejecimiento en los materiales dieléctricos. De acuerdo a los resultados obtenidos a de estas pruebas se utilizan en el cálculo del factor del índice de salud, proporcionando una medida cuantificable del estado del aislamiento.

Los datos de referencia empleados en este cálculo se los presenta en la Tabla 4.15 son utilizados en este cálculo permitiendo la facilidad de interpretación objetiva y estandarizada de los resultados. Dicha información es clave para establecer o estructurar planes de mantenimiento o evitar fallas imprevistas optimizando funcionamiento del transformador dentro del sistema eléctrico.

Tabla 4.16 Criticidad de Factor de potencia[8].

FP		
CONDICIÓN	DESCRIPCION	HI-FP
MUY BUENO	$FP \leq 0,5$	4
BUENO	$0,5 < FP \leq 0,7$	3
REGULAR	$0,7 < FP \leq 1,0$	2
POBRE	$1,0 < FP \leq 2,0$	1
MUY POBRE	$FP \geq 2,0$	0

#### 4.5.7 Criticidad para el cálculo de Pruebas físico-químicas

La criticidad de las pruebas físico químicas permite analizar las propiedades dieléctricas y químicas del aceite aislante, para alcanzar el objetivo de determinar su grado de deterioro y su impacto en el rendimiento del transformador. Los resultados que se obtienen en esta evaluación son considerados para asignar una puntuación (Si) y un puntaje (Wi) a cada parámetro evaluado Tomando la Tabla 4.16 como referencia para los criterios evaluados.

Se aplica la ecuación (4.4) para el cálculo de la del factor de calidad de aceite y posteriormente se obtiene una medida cuantitativa del estado del aceite y su influencia en la vida útil remanente del transformador.

$$(\%)OQF = \frac{\sum_{i=1}^6 S_i * w_i}{\sum_{i=1}^6 W_i} * 100 \quad (4.4)$$

Tabla 4.17 Pruebas Físico-químicas[3]

Prueba	Rango	Puntaje Si	Peso Wi
Rigidez dieléctrica (kV)	≥ 45	1	3
	35-45	2	
	30-35	3	
	≤ 30	4	
Tensión Interfacial (N/m)	≥ 25	1	2
	20-25	2	
	15-20	3	
	≤ 15	4	
Numero de acidez	≤ 0,05	1	1
	0,05-0,1	2	
	0,1-0,2	3	
	≥ 0,2	4	
Contenido de humedad	≤ 15	1	4
	15-20	2	
	20-25	3	
	≥ 25	4	
Color	≤ 1,5	1	2
	1,5-2,0	2	
	2,0-2,5	3	
	≥ 2,5	4	
Factor de disipación	≤ 0,1	1	3
	0,1-0,5	2	
	0,5-1,0	3	
	≥ 1,0	4	

La Tabla 4.17 establece valores que permiten dicho análisis. Siendo el OQF uno de esos valores, el Factor de Calidad del Aceite es importante para analizar las condiciones del aislamiento. Este

análisis es necesario para estimar el impacto que el envejecimiento del aceite puede tener en la salud dieléctrica del transformador y poder diagnosticar riesgos y definir estrategias de mantenimiento preventivo. En el sistema eléctrico, su OQF categorizado permite la toma de decisiones en el orden del aprovechamiento del equipo y su longevidad en el sistema.

Tabla 4.18 HIF para en OQF[54]

OQ		
CONDICIÓN	DESCRIPCION	HI-DGAF
MUY BUENO	$OQF \leq 20\%$	4
BUENO	$20\% < OQF \leq 30\%$	3
REGULAR	$30\% < OQF \leq 40\%$	2
POBRE	$40\% < OQF \leq 50\%$	1
MUY POBRE	$OQF \geq 50\%$	0

#### 4.5.8 Condiciones para el cálculo de Contenido de furanos

El grado de polimerización (DP, Degree of Polymerization) calculado se emplea como indicador del estado global del transformador. Los valores correspondientes al factor del índice de salud se encuentran detallados en la Tabla 4.19 y se calcula el valor DP.

Tabla 4.19 HIF para DP.[49]

DP		
CONDICIÓN	DESCRIPCION	HI-DGAF
MUY BUENO	$DP > 700$	4
BUENO	$700 \geq DP > 560$	3
REGULAR	$560 \geq DP > 425$	2
POBRE	$425 \geq DP > 250$	1
MUY POBRE	$DP \leq 250$	0

Finalmente, el Índice de Salud Dieléctrico (HI dieléctrico) se calcula utilizando los valores de HIF y el factor de ponderación K, obtenidos a partir de las pruebas dieléctricas realizadas. Aplicando la Ecuación (1), se integra esta información en un índice consolidado que permite evaluar el estado del aislamiento del transformador y su impacto en la fiabilidad operativa del equipo.

## 5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los transformadores de potencia analizados son trifásicos con refrigeración por aceite, y su catastro proporciona datos clave para el cálculo del Índice de Salud sus datos se presentan en Tabla 4.2 .

### 5.1 CÁLCULO DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

La muestra los resultados de las pruebas de Relación de Transformación y Resistencia de Devanados, fundamentales para evaluar el estado de los devanados y detectar anomalías, que define los procedimientos y criterios de aceptación. La Relación de Transformación garantiza la proporción correcta entre los voltajes de entrada y salida, mientras que la Resistencia de Devanados permite identificar variaciones por fallas en conexiones, cortocircuitos o envejecimiento del conductor [29]. La Tabla 4.2 presenta los resultados obtenidos, y según los límites de criticidad de la Tabla 4.10, se asignan los pesos correspondientes en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Criticidad de Relación de transformación

NOMBRE SUBESTACIÓN	PRUEBA	CONDICION	PUNTAJE
SUBESTACIÓN 1	0.01	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 2	0.02	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 3	0.1	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 4	0.02	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 5	0.02	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 6	0.01	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 7	0.02	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 8	0.1	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 9	0.02	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 10	0.02	4	MUY BUENO

### 5.2 CÁLCULO DE RESISTENCIA DE DEVANADOS.

La muestra los resultados de las pruebas de Relación de Transformación y Resistencia de Devanados, esenciales para verificar el estado de los devanados y detectar posibles anomalías.

Tabla 4.3 contiene la información de los resultados obtenidos de las pruebas de relación de transformación y mediante la Tabla 4.11 se ingresa los pesos establecidos según sus límites de criticidad y se los presenta en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Criticidad de resistencia de devanados

SUBESTACIÓN	PRUEBA	CONDICIÓN	Puntaje
SUBESTACIÓN 1	1	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 2	0,5	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 3	1	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 4	1	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 5	1	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 6	0,01	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 7	1	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 8	0,5	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 9	1	4	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 10	1	4	MUY BUENO

### 5.3 CÁLCULO DE ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS

La empresa distribuidora llevó a cabo la recopilación de información sobre los gases disueltos en el aceite de los transformadores de potencia, cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.3. Para evaluar el estado de los transformadores, se asignó un puntaje a cada gas detectado con base en los niveles registrados en la Tabla 4.13, siguiendo el método de evaluación del Diagnóstico de Gases en Aceite de Falla (DGAF). En esta ponderación, se incluyen gases como el hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), los cuales permiten inferir posibles fallas térmicas o eléctricas en los equipos analizados. Como se observa en la Tabla 5.3, los puntajes asignados a cada subestación varían en función de la concentración de los gases medidos, permitiendo establecer un criterio de comparación entre los diferentes transformadores y detectar condiciones anómalas que puedan comprometer su funcionamiento.

Tabla 5.3 Ponderación de pesos y puntajes DGAF.

SUBESTACIÓN	H <sub>2</sub> ppm	Puntaje	CH <sub>4</sub> ppm	Puntaje	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ppm	Puntaje	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ppm	Puntaje	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ppm	Puntaje	CO ppm	Puntaje	CO <sub>2</sub> ppm	Puntaje
SUBESTACIÓN 1	5	1	5	1	1	1	16	1	0	1	115	1	1120	1
SUBESTACIÓN 2	9	1	8	1	0	1	0	1	0	1	352	2	712	1
SUBESTACIÓN 3	61	1	14	1	9	1	5	1	0	1	38	1	1480	1
SUBESTACIÓN 4	3	1	5	1	0	1	4	1	0	1	601	2	3080	3
SUBESTACIÓN 5	32	1	16	1	5	1	6	1	0	1	23	1	1370	1
SUBESTACIÓN 6	4	1	0	1	0	1	0	1	0	1	74	1	850	1
SUBESTACIÓN 7	6	1	1	1	0	1	0	1	0	1	93	1	207	1
SUBESTACIÓN 8	6	1	1	1	0	1	0	1	0	1	93	1	207	1
SUBESTACIÓN 9	3	1	0	1	0	1	0	1	0	1	38	1	730	1
SUBESTACIÓN 10	16	1	2	1	0	1	10	1	0	1	153	1	1310	1

Para determinar la incidencia de cada gas en el diagnóstico de fallas en los transformadores de potencia, se establecen pesos específicos basados en la Tabla 4.12, los cuales se aplican a los valores medidos en cada subestación. En la Tabla 5.4, se reflejan estos pesos. La asignación de pesos facilita la identificación de tendencias en la degradación del aceite dieléctrico y la detección de condiciones operativas anómalas. Con esta información, se puede priorizar el mantenimiento de los equipos que presentan mayores niveles de riesgo, optimizando la gestión de activos eléctricos.

Tabla 5.4 Pesos DGA

SUBESTACIÓN	H2 ppm	Puntaje	CH4 ppm	Puntaje	C2H6 ppm	Puntaje	C2H4 ppm	Puntaje	C2H2 ppm	Puntaje	CO ppm	Puntaje	CO2 ppm	Puntaje
SUBESTACIÓN 1	5	1	5	1	1	1	16	1	0	1	115	1	1120	1
SUBESTACIÓN 2	9	1	8	1	0	1	0	1	0	1	352	2	712	1
SUBESTACIÓN 3	61	1	14	1	9	1	5	1	0	1	38	1	1480	1
SUBESTACIÓN 4	3	1	5	1	0	1	4	1	0	1	601	2	3080	3
SUBESTACIÓN 5	32	1	16	1	5	1	6	1	0	1	23	1	1370	1
SUBESTACIÓN 6	4	1	0	1	0	1	0	1	0	1	74	1	850	1
SUBESTACIÓN 7	6	1	1	1	0	1	0	1	0	1	93	1	207	1
SUBESTACIÓN 8	6	1	1	1	0	1	0	1	0	1	93	1	207	1
SUBESTACIÓN 9	3	1	0	1	0	1	0	1	0	1	38	1	730	1
SUBESTACIÓN 10	16	1	2	1	0	1	10	1	0	1	153	1	1310	1

Seleccionar el puntaje máximo según la Tabla 4.13 en el que nos indica los valores que puede tener cada prueba y varía de 1 a 6 siendo 6 el peso máximo que puede tener cada gas como se puede observar en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Si Max DGAF

SUBESTACIÓN	Peso máximo
SUBESTACIÓN 1	6
SUBESTACIÓN 2	6
SUBESTACIÓN 3	6
SUBESTACIÓN 4	6
SUBESTACIÓN 5	6
SUBESTACIÓN 6	6
SUBESTACIÓN 7	6
SUBESTACIÓN 8	6
SUBESTACIÓN 9	6
SUBESTACIÓN 10	6

A partir de los valores obtenidos, se procede a calcular la sumatoria del producto entre los pesos asignados y los puntajes obtenidos, según los criterios establecidos en la Tabla 4.13. La Tabla 5.6 presenta los resultados de esta operación para cada subestación, reflejando el impacto global de los gases disueltos en la condición del transformador. Estos valores son fundamentales para su posterior inserción en la ecuación (4.4), lo que permitirá determinar el estado de los equipos evaluados.

Tabla 5.6 Sumatoria de la multiplicación de pesos y puntajes DGAF.

<b>SUBESTACIÓN</b>	<b>Si*Wi</b>
SUBESTACIÓN 1	16
SUBESTACIÓN 2	17
SUBESTACIÓN 3	16
SUBESTACIÓN 4	19
SUBESTACIÓN 5	16
SUBESTACIÓN 6	16
SUBESTACIÓN 7	16
SUBESTACIÓN 8	16
SUBESTACIÓN 9	16
SUBESTACIÓN 10	16

Para la suma máxima de los pesos se realiza mediante la sumatoria de la multiplicación de los pesos de cada prueba por el peso máximo referenciado en la Tabla 5.5 que puede tener cada uno de ellos.

Tabla 5.7 Peso máximo Total DGAF

<b>SUBESTACIÓN</b>	<b>Smax*Wi</b>
SUBESTACIÓN 1	96
SUBESTACIÓN 2	96
SUBESTACIÓN 3	96
SUBESTACIÓN 4	96
SUBESTACIÓN 5	96
SUBESTACIÓN 6	96
SUBESTACIÓN 7	96
SUBESTACIÓN 8	96
SUBESTACIÓN 9	96
SUBESTACIÓN 10	96

Se obtuvo el cálculo del Diagnóstico de Gases en Aceite de Falla (DGAF) mediante la ecuación (4.4) de análisis de gases disueltos para la cual se ingresa los valores obtenidos, se procede a

calcular la sumatoria del producto entre los pesos asignados y los puntajes obtenidos, según los criterios establecidos en la Tabla 4.13. La comparación de los resultados entre subestaciones facilita la identificación de posibles anomalías y la priorización de acciones correctivas en el mantenimiento de los transformadores. Tabla 5.6 y Tabla 5.7.

Tabla 5.8 Calculo DGAF

SUBESTACIÓN	DGAF
SUBESTACIÓN 1	16.666667
SUBESTACIÓN 2	17.708333
SUBESTACIÓN 3	16.666667
SUBESTACIÓN 4	19.791667
SUBESTACIÓN 5	16.666667
SUBESTACIÓN 6	16.666667
SUBESTACIÓN 7	16.666667
SUBESTACIÓN 8	16.666667
SUBESTACIÓN 9	16.666667
SUBESTACIÓN 10	16.666667

Mediante el DGAF calculado, se procede a determinar la condición o criticidad de los transformadores de potencia presentes en la Tabla 5.9, utilizando la información presentada en la Se califica con valores entre 0 y 4 según la condición del transformador.

Tabla 5.9 HI del DGA de la empresa distribuidora

NOMBRE SUBESTACIÓN	$S_i * W_i$	$S_{max} * W_i$	DGAF	CONDICION	HIF DGA
SUBESTACIÓN 1	16	96	16.67	MUY BUENA	4
SUBESTACIÓN 2	17	96	17.71	MUY BUENA	4
SUBESTACIÓN 3	16	96	16.67	MUY BUENA	4
SUBESTACIÓN 4	19	96	19.79	MUY BUENA	4
SUBESTACIÓN 5	16	96	16.67	MUY BUENA	4
SUBESTACIÓN 6	16	96	16.67	MUY BUENA	4
SUBESTACIÓN 7	16	96	16.67	MUY BUENA	4
SUBESTACIÓN 8	16	96	16.67	MUY BUENA	4
SUBESTACIÓN 9	16	96	16.67	MUY BUENA	4
SUBESTACIÓN 10	16	96	16.67	MUY BUENA	4

#### 5.4 CÁLCULO DE ÍNDICE DE SALUD FUNCIONAL

Mediante la criticidad obtenida de relación de transformación en la muestra los resultados de las pruebas de Relación de Transformación y Resistencia de Devanados, fundamentales para evaluar el estado de los devanados y detectar anomalías, que define los procedimientos y criterios de aceptación. La Relación de Transformación garantiza la proporción correcta entre

los voltajes de entrada y salida, mientras que la Resistencia de Devanados permite identificar variaciones por fallas en conexiones, cortocircuitos o envejecimiento del conductor la Tabla 4.2 presenta los resultados obtenidos, y según los límites de criticidad de la Tabla 4.10, se asignan los pesos correspondientes en la Tabla 5.1, los resultados de criticidad de resistencia de devanados en la Tabla 5.2 y la criticidad del análisis de gases en la Tabla 5.9 se calcula el índice funcional dando un nuevo peso (k) como lo detalla la Tabla 4.9 y se presenta en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10 pesos para índice funcional

NOMBRE SUBESTACIÓN	RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN		RESISTENCIA DE DEVANADOS		DGA	
	CONDICION	K	CONDICION	K	HIF DGA	K
SUBESTACIÓN 1	4	8	4	6	4	10
SUBESTACIÓN 2	4	8	4	6	4	10
SUBESTACIÓN 3	4	8	4	6	4	10
SUBESTACIÓN 4	4	8	4	6	4	10
SUBESTACIÓN 5	4	8	4	6	4	10
SUBESTACIÓN 6	4	8	4	6	4	10
SUBESTACIÓN 7	4	8	4	6	4	10
SUBESTACIÓN 8	4	8	4	6	4	10
SUBESTACIÓN 9	4	8	4	6	4	10
SUBESTACIÓN 10	4	8	4	6	4	10

Se procede a calcular el índice de salud funcional utilizando la ecuación (4.1) y los datos de criticidad expuestos en la Tabla 4.8 cómo se observa en la Tabla 5.11

Tabla 5.11 índice de salud funcional

HI FUNCIONAL					
SUBESTACIÓN	HIF*K	K TOTAL	HI FUNCIONAL	HI FUNCIONAL %	CONDICION
SUBESTACIÓN 1	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 2	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 3	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 4	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 5	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 6	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 7	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 8	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 9	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 10	96	24	4	100	MUY BUENO

## 5.5 CÁLCULO DE FACTOR DE POTENCIA

La empresa distribuidora en la Tabla 4.4 contiene la información de los resultados obtenidos de las pruebas de relación de transformación y mediante la Tabla 4.16 se ingresa los pesos establecidos según sus límites de criticidad y se los presenta en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12 Criticidad de factor de potencia

SUBESTACIÓN	FACTOR DE POTENCIA		
	PRUEBA	CONDICION	HI-DP
SUBESTACIÓN 1	0.4	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 2	0.4	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 3	0.01	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 4	0.5	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 5	0.5	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 6	0.5	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 7	0.4	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 8	0.4	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 9	0.5	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 10	0.5	MUY BUENO	4

## 5.6 CÁLCULO DE PRUEBAS FÍSICO-QUÍMICAS

En las evaluaciones de calidad de aceite se toman en cuenta factores esenciales como el ingreso de puntajes en las distintas pruebas como la rigidez dieléctrica, contenido de humedad, número de acidez, tensión interfacial y factor de disipación del líquido dieléctrico.

Los parámetros obtenidos son cruciales para valorar el aceite dieléctrico en cuanto a su aislamiento y disipación de calor, lo cual impacta de manera directa el rendimiento y durabilidad del transformador de potencia

La asignación de calificación a cada uno de estos elementos posibilita una valoración numérica y su criticidad, simplificando el estudio y su estado operativo. Una disminución en estas cifras puede señalar una de las causas como contaminación por humedad que causa oxidación, también puede presentar existencia de sustancias acidas o degradación de aislamiento lo que puede poner en riesgo la fiabilidad operativa del transformador [50].

Los datos existentes en la Tabla 4.5 se encuentran los resultados para el cálculo con la ecuación (4.4) y referenciado con la Tabla 4.16 de referencia.

Tabla 5.13 Puntajes OQF de la empresa distribuidora

	RIGIDEZ DIELECTRICA (kV/mm)	TENSION INTERFACIAL (mN/m)	Numero de ACIDEZ (mg KOH/g)	CONTENIDO DE HUMEDAD (ppm)	COLOR	FACTOR DE POTENCIA

	PRUEBA	Puntaje	PRUEBA	PUNTAJE	PRUEBA	PUNTAJE	PRUEBA	PUNTAJE	PRUEBA	PUNTAJE	PRUEBA	PUNTAJE
SUBESTACIÓN 1	46	1	40	1	0.02	1	10	1	2	2	0.1	1
SUBESTACIÓN 2	49	1	47	1	0.01	1	9	1	0.5	1	0.1	1
SUBESTACIÓN 3	57	1	41	1	0.02	1	40.1	4	1	1	0.1	1
SUBESTACIÓN 4	56	1	44	1	0.02	1	12	1	1	1	0.1	1
SUBESTACIÓN 5	56	1	43	1	0.02	1	12	1	1	1	0.1	1
SUBESTACIÓN 6	52	1	43	1	0.04	1	11	1	1.5	1	0.1	1
SUBESTACIÓN 7	59	1	47	1	0.01	1	5	1	0.5	1	0.1	1
SUBESTACIÓN 8	50	1	47	1	0.02	1	4	1	0.5	1	0.1	1
SUBESTACIÓN 9	58	1	45	1	0.02	1	6	1	0.5	1	0.1	1
SUBESTACIÓN 10	55	1	44	1	0.02	1	10	1	1	1	0.1	1

Los parámetros obtenidos según la Tabla 4.16, se asignan los pesos a los parámetros de calidad del aceite y son expuestos en la Tabla 5.14. Los parámetros incluyen rigidez dieléctrica; tensión interfacial; número de acidez; contenido de humedad; color y factor de potencia. Dichas pruebas realizadas dentro del cálculo físico químico son de suma importancia para definir el estado del aceite dieléctrico los cuales son fundamentales para evaluar el estado del aceite aislante.

La evolución de estos indicadores facilita la terminación de estrategias para considerar el mejor estado de funcionamiento del transformador de potencia y poder determinar de forma oportuna la degradación del aceite y su habilidad de asegurar un aislamiento eficaz de igual forma una disipación térmica apropiada en el transformador.

Tabla 5.14 Pesos OQF de la empresa distribuidora.

SUBESTACIÓN N	RIGIDEZ DIELECTRICA (kV/mm)			TENSION INTERFACIAL (mN/m)			Numero de ACIDEZ (mg KOH/g)			CONTENIDO DE HUMEDAD (ppm)			COLOR			FACTOR DE POTENCIA		
	PRUEBA	PUNTAJE	PESO	PRUEBA	PUNTAJE	PESO	PRUEBA	PUNTAJE	PESO	PRUEBA	PUNTAJE	PESO	PRUEBA	PUNTAJE	PESO	PRUEBA	PUNTAJE	PESO
SUBESTACIÓN 1	46	1	3	40	1	2	0,02	1	1	10	1	4	2	2	2	0,1	1	3
SUBESTACIÓN 2	49	1	3	47	1	2	0,01	1	1	9	1	4	0,5	1	2	0,1	1	3
SUBESTACIÓN 3	57	1	3	41	1	2	0,02	1	1	40,1	4	4	1	1	2	0,1	1	3
SUBESTACIÓN 4	56	1	3	44	1	2	0,02	1	1	12	1	4	1	1	2	0,1	1	3
SUBESTACIÓN 5	56	1	3	43	1	2	0,02	1	1	12	1	4	1	1	2	0,1	1	3
SUBESTACIÓN 6	52	1	3	43	1	2	0,04	1	1	11	1	4	1,5	1	2	0,1	1	3

SUBESTACIÓN 7	59	1	3	47	1	2	0,01	1	1	5	1	4	0,5	1	2	0,1	1	3
SUBESTACIÓN 8	50	1	3	47	1	2	0,02	1	1	4	1	4	0,5	1	2	0,1	1	3
SUBESTACIÓN 9	58	1	3	45	1	2	0,02	1	1	6	1	4	0,5	1	2	0,1	1	3
SUBESTACIÓN 10	55	1	3	44	1	2	0,02	1	1	10	1	4	1	1	2	0,1	1	3

Se calcula la sumatoria del producto entre los pesos asignados y los puntajes obtenidos, aplicando la ecuación (4.4). Este valor permite cuantificar el estado de los transformadores en función de los parámetros evaluados, proporcionando un indicador clave para el análisis de su condición operativa.

Tabla 5.15 Sumatoria de la multiplicación de pesos y puntajes OQF

SUBESTACIÓN	$S_i * W_i$
SUBESTACIÓN 1	17
SUBESTACIÓN 2	15
SUBESTACIÓN 3	27
SUBESTACIÓN 4	15
SUBESTACIÓN 5	15
SUBESTACIÓN 6	15
SUBESTACIÓN 7	15
SUBESTACIÓN 8	15
SUBESTACIÓN 9	15
SUBESTACIÓN 10	15

Para la suma máxima de los pesos se realiza mediante la sumatoria de los pesos de cada prueba por, el peso máximo es referenciado en la Tabla 5.16

Tabla 5.16 Peso Total OQF

	HI OQF
SUBESTACIÓN	$W_i$ total
SUBESTACIÓN 1	15
SUBESTACIÓN 2	15
SUBESTACIÓN 3	15
SUBESTACIÓN 4	15
SUBESTACIÓN 5	15
SUBESTACIÓN 6	15

SUBESTACIÓN 7	15
SUBESTACIÓN 8	15
SUBESTACIÓN 9	15
SUBESTACIÓN 10	15

Se obtuvo el cálculo del OQF mediante la ecuación (4.4) de análisis de gases disueltos para la cual se ingresa los valores obtenidos en la Tabla 5.15.

Tabla 5.17 Calculo OQF de la empresa distribuidora

SUBESTACIÓN	HI OQF		
	Si*Wi	Wi total	OQF
SUBESTACIÓN 1	17	15	1.1333333
SUBESTACIÓN 2	15	15	1
SUBESTACIÓN 3	27	15	1.8
SUBESTACIÓN 4	15	15	1
SUBESTACIÓN 5	15	15	1
SUBESTACIÓN 6	15	15	1
SUBESTACIÓN 7	15	15	1
SUBESTACIÓN 8	15	15	1
SUBESTACIÓN 9	15	15	1
SUBESTACIÓN 10	15	15	1

Mediante el OQF calculado, se procede a determinar la condición o criticidad de los transformadores de potencia, utilizando la información presentada en la Tabla 4.17.

Tabla 5.18 HI del OQ de la empresa distribuidora

SUBESTACIÓN	HI OQF			OQF	HIF DGA
	Si*Wi	Wi total	OQF		
SUBESTACIÓN 1	17	15	11.333.333	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 2	15	15	1	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 3	27	15	1.8	REGULAR	3
SUBESTACIÓN 4	15	15	1	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 5	15	15	1	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 6	15	15	1	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 7	15	15	1	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 8	15	15	1	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 9	15	15	1	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 10	15	15	1	MUY BUENO	4

## 5.7 CÁLCULO DE GASES FURANOS

Se realizaron los cálculos analizando el compuesto 2-furfural como se muestra en la Tabla 4.6. Mediante las pruebas de furanos, se calculó el DP utilizando la Tabla 4.19 correspondiente, se condiciona y se evalúa el grado de criticidad.

Tabla 5.19 Criticidad DPF de la empresa distribuidora

SUBESTACIÓN	2-FAL (ppb)	CONDICIÓN
SUBESTACIÓN 1	710	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 2	740	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 3	701	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 4	707	MUY BUENO

SUBESTACIÓN 5	701	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 6	745	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 7	728	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 8	704	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 9	740	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 10	742	MUY BUENO

Se califica con valores entre 0 y 4 según la Tabla 4.19 a la condición del transformador y por ende también el código de color dependiendo su estado.

Tabla 5.20HI del DP de la empresa distribuidora

SUBESTACIÓN	2-FAL(ppb)	CONDICIÓN	HI-DP
SUBESTACIÓN 1	710	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 2	740	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 3	701	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 4	707	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 5	701	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 6	745	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 7	728	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 8	704	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 9	740	MUY BUENO	4
SUBESTACIÓN 10	742	MUY BUENO	4

## 5.8 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SALUD DIELECTRICO.

Mediante la criticidad obtenida de factor de potencia en la Tabla 5.12, los resultados de criticidad de pruebas físico químicas en la Tabla 5.18 y la criticidad del gas furanos en la Tabla 5.20 se calcula el índice funcional dando un nuevo peso (k) como lo detalla la Tabla 4.15 y se presenta en la Tabla 5.21.

Tabla 5.21 pesos para el índice de salud dieléctrico

SUBESTACIÓN	FACTOR DE POTENCIA		CALIDAD DEL ACEITE		HI-DP	
	HI-FP	K	HIF OQ	K	HI-DP	K
SUBESTACIÓN 1	4	10	4	6	4	8
SUBESTACIÓN 2	4	10	4	6	4	8
SUBESTACIÓN 3	4	10	2	6	4	8

SUBESTACIÓN 4	4	10	4	6	4	8
SUBESTACIÓN 5	4	10	4	6	4	8
SUBESTACIÓN 6	4	10	4	6	4	8
SUBESTACIÓN 7	4	10	4	6	4	8
SUBESTACIÓN 8	4	10	4	6	4	8
SUBESTACIÓN 9	4	10	4	6	4	8
SUBESTACIÓN 10	4	10	4	6	4	8

Mediante la ecuación (4.1), se calcula el índice de salud dieléctrico utilizando los parámetros de criticidad definidos en la Tabla 4.8. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.22, donde se reflejan los valores de HI total, HI dieléctrico y su porcentaje, permitiendo clasificar la condición de cada subestación. Esta evaluación facilita la identificación del estado del aislamiento en los transformadores y contribuye a la planificación del mantenimiento preventivo.

Tabla 5.22 Índice de salud dieléctrico

SUBESTACIÓN	HI TOTAL DIELECTRICO				CONDICION
	HIF*K	K TOTAL	HI DIELECTRICO	HI DIELECTRICO %	
SUBESTACIÓN 1	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 2	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 3	84	24	3,5	83	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 4	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 5	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 6	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 7	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 8	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 9	96	24	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 10	96	24	4	100	MUY BUENO

Los análisis del factor de potencia del aislamiento, la rigidez dieléctrica y la tensión interfacial indican que los sistemas de aislamiento líquido y sólido de los transformadores se encuentran en óptimo estado. Las pruebas físico-químicas del aceite dieléctrico (número de acidez, contenido de humedad y color) reflejan que el fluido aislante conserva sus propiedades, asegurando una adecuada disipación térmica y protección de los devanados. Además, la evaluación de contenido de furanos (2-FAL) confirma que no hay un deterioro significativo en la celulosa del aislamiento, todos los transformadores alcanzan un HI Dieléctrico del 100%, lo que reafirma su clasificación en "Muy Bueno".

## 5.9 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SALUD TOTAL.

El cálculo del índice de salud total se realiza utilizando la ecuación (4.2) en la que utilizaremos la Tabla 5.11 que es el resultado del índice funcional y la Tabla 5.22 los resultados del índice de salud dieléctrico como se muestra en la Tabla 5.23.

Tabla 5.23 HI función y HI dieléctrico

SUBESTACIÓN	HI FUNCIONAL			HI DIELECTRICO		
	HI FUNCIONAL	HI FUNCIONAL %	CONDICION	HI DIELECTRICO	HI DIELECTRICO %	CONDICION
SUBESTACIÓN 1	4	100	MUY BUENO	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 2	4	100	MUY BUENO	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 3	4	100	MUY BUENO	3.5	83	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 4	4	100	MUY BUENO	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 5	4	100	MUY BUENO	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 6	4	100	MUY BUENO	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 7	4	100	MUY BUENO	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 8	4	100	MUY BUENO	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 9	4	100	MUY BUENO	4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 10	4	100	MUY BUENO	4	100	MUY BUENO

Aplicamos la ecuación (4.2) y lo escalamos cuando sea 4 el número máximo sería 100% y cuando sea 1 estará por debajo de 25% como se muestra en la Tabla 5.24

Tabla 5.24 índice total en porcentaje

NOMBRE SUBESTACIÓN	HI TOTAL %
SUBESTACIÓN 1	100
SUBESTACIÓN 2	100
SUBESTACIÓN 3	91.6666667
SUBESTACIÓN 4	100
SUBESTACIÓN 5	100
SUBESTACIÓN 6	100
SUBESTACIÓN 7	100
SUBESTACIÓN 8	100
SUBESTACIÓN 9	100
SUBESTACIÓN 10	100

Los resultados de la Tabla 5.24 se califica con la evaluación de condición del índice de salud total de la Tabla 4.5 y se muestra en la Tabla 5.25 los cálculos del índice total y la comprobación en la figura (5.1) en el software de simulación MATLAB y su condigo de programación en el ANEXO K.

Tabla 5.25 índice de salud total

NOMBRE SUBESTACIÓN	HI TOTAL	
	HI TOTAL %	CONDICION
SUBESTACIÓN 1	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 2	100	MUY BUENO

SUBESTACIÓN 3	91.6666667	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 4	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 5	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 6	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 7	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 8	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 9	100	MUY BUENO
SUBESTACIÓN 10	100	MUY BUENO

```

resultado_final4 =

10x5 cell array

{ [ 1] }    { [96] }    { [96] }    { [ 100] }    {'MUY BUENO'}
{ [ 2] }    { [96] }    { [96] }    { [ 100] }    {'MUY BUENO'}
{ [ 3] }    { [90] }    { [96] }    { [93.75] }   {'MUY BUENO'}
{ [ 4] }    { [96] }    { [96] }    { [ 100] }    {'MUY BUENO'}
{ [ 5] }    { [96] }    { [96] }    { [ 100] }    {'MUY BUENO'}
{ [ 6] }    { [96] }    { [96] }    { [ 100] }    {'MUY BUENO'}
{ [ 7] }    { [96] }    { [96] }    { [ 100] }    {'MUY BUENO'}
{ [ 8] }    { [96] }    { [96] }    { [ 100] }    {'MUY BUENO'}
{ [ 9] }    { [96] }    { [96] }    { [ 100] }    {'MUY BUENO'}
{ [10] }    { [96] }    { [96] }    { [ 100] }    {'MUY BUENO'}

```

Figura 5.1 Comprobación de resultados HI en MATLAB.

### 5.9.1 Análisis de índice de salud total

Los resultados obtenidos indican que los 10 transformadores evaluados mantienen una condición operativa excelente, sin presencia de anomalías o signos de envejecimiento prematuro. La gestión efectiva y a tiempo del transformador de potencia contribuye a que estos equipos conserven sus propiedades eléctricas, dieléctricas y funcionalidades óptimas dentro de parámetros establecidos.

Los resultados fueron favorables en su mayoría lo cual es recomendable mantener un monitoreo periódico haciendo énfasis y prestando más atención en las pruebas dieléctricas y la calidad de aceite con ello lograra identificar cualquier variación que pudiera comprometer el correcto funcionamiento del transformador de potencia asegurando su vida útil a largo plazo.

## 5.10 ANÁLISIS ECONÓMICO

El estudio realizado tiene una relevación considerable desde la perspectiva económica dado que se examina un elemento crucial como es el transformador de potencia siendo un activo de suma importancia en una subestación de transformaciones de energía eléctrica a continuación se

expresa una perspectiva completa sobre su repercusión económica en la cual se aborda temas como la mejora en uso de recursos económicos la reducción de gastos y fallas imprevistas el impacto en la fiabilidad del sistema eléctrico y su importancia estratégica en la toma de decisiones.

### **5.10.1 Relevancia Económica del Estudio**

En las subestaciones de Latacunga los transformadores de potencia representan activos de gran valor económico dentro del sistema eléctrico por lo que es esencial mantener un control adecuado sobre su mantenimiento de manera correcta, ya que es esencial para asegurar la continuidad del abastecimiento de energía.

La inexistencia de un diagnóstico exacto de su condición puede generar gastos de superfluos debido a daños inesperados, lo que genera pausas no programadas o incluso reemplazos anticipados. Este estudio ofrece un instrumento parcial y estandarizados que ayuda a una organización eficaz del mantenimiento fortaleciendo una administración más ordenada y lucrativa de los recursos

El índice de salud implementado como una estrategia que realiza evaluación de los transformadores ofrece múltiples ventajas, entre ellos;

- Disminución de costos operativos y mejor planeación de mantenimientos, reducción de costos operativos y mejor distinción de equipos que requieren intervención inmediata y aquellos que aún pueden operar sin riesgos significativos.
- Vida útil más extensa en los transformadores de potencia evitando reemplazos anticipados y optimizando la inversión en estos activos.
- Mejor confiabilidad del sistema eléctrico en Latacunga al disminuir la posibilidad de fallas inesperadas y minimizar las pérdidas económicas derivadas de interrupciones en el servicio.
- Mejor planificación financiera de las empresas distribuidoras de electricidad, permitiendo una asignación más eficiente y fundamentada de los recursos disponibles.

### **5.10.2 Relevancia Económica en los Costos de Mantenimiento y Reparación**

En este estudio se utilizó la metodología de suma de puntajes ponderados la cual da como resultado una base sólida de criterios de clasificación del estado de los transformadores a partir de parámetros eléctricos, físicos y químicos, lo que permite tomar decisiones estratégicas respecto a su mantenimiento. Tradicionalmente, las empresas eléctricas emplean esquemas de

mantenimiento programado o correctivo, los cuales pueden resultar más costosos y menos eficientes.

El presente estudio recomienda la implementación de un enfoque de mantenimiento basado en condición de criticidad y ponderaciones del estado del transformador, lo que conlleva los siguientes beneficios:

- Eliminación de mantenimientos innecesarios: Se reducen los gastos en inspecciones o reemplazo de componentes cuando el equipo aún se encuentra en óptimas condiciones de operación.
- Mejor aprovechamiento de recursos: Se planifica de mejor manera la asignación de presupuestos y personal técnico únicamente a aquellos transformadores que realmente requieren intervención garantizando un uso más eficiente de los recursos disponibles.
- Menos fallas catastróficas: La identificación temprana de transformadores en mal estado evita reparaciones de emergencia, que suelen ser significativamente más costosas.

### **5.10.3 Reducción del Riesgo de Interrupciones del Servicio**

Las averías en los transformadores de potencia provocan interrupciones en el suministro eléctrico lo que no solo repercute en los usuarios si no también implica penalizaciones financieras para la empresa distribuidora de Latacunga. En áreas industriales o comerciales las interrupciones en la energía eléctrica pueden implicar pérdidas en la producción y una disminución considerable en la competitividad de las compañías afectadas la aplicación del cálculo del índice de salud para conocer el estado de los transformadores para la gestión de activos eléctricos ayuda a la disminución de estos riesgos a través de;

- Predicción de fallas con anticipación, evitando interrupciones del servicio.
- Disminución de costos asociados a indemnizaciones por cortes eléctricos a industrias y comercios.
- Priorización de la continuidad del suministro eléctrico, beneficiando tanto a la empresa distribuidora como a los consumidores finales.

### **5.10.4 Valor Estratégico y Replicabilidad del Estudio**

Este estudio no solo repercute de manera económica también sirve como un modelo replicable en regiones aledañas a Latacunga y otros sectores industrializados que utilizan transformadores de potencia. A escala nacional la puesta en marcha de esta metodología facilitaría una

administración más eficaz en los departamentos asignados a mantenimientos de dispositivos eléctricos mejorando la planificación y presupuestos asignados a este propósito

Desde un punto de vista de inversión los resultados obtenidos pueden respaldar la solicitud de financiamiento ante entidades reguladoras para la modernización de los equipos y la mejora de la infraestructura eléctrica, basándose en información técnica sobre el estado de los transformadores

Por lo tanto, este estudio establece un referente económico y académico como técnico ya que proporciona una base sólida para futuras investigaciones fundamentándose en datos técnicos acerca de la condición de transformadores de potencia. Además, se podría fomentar el desarrollo de nuevas estrategias enfocadas en la reducción de costos y el incremento de la eficiencia energética en el sector eléctrico.

## **6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 CONCLUSIONES**

Se recopiló y organizó la información técnica relevante de los transformadores de potencia en las subestaciones eléctricas de Latacunga, en la que se obtuvo datos como resultados de pruebas fundamentales como la Relación de Transformación, Resistencia de Devanados, Análisis de Gases Disueltos, Factor de Potencia, evaluación del contenido de furanos (2-FAL) y pruebas físico-químicas.

Se unificó los resultados proporcionados por la empresa distribuidora y se organizó en una base de datos en Excel de manera organizada con la cual permitió el acceso y la renovación de los mismos de manera efectiva y eficaz obteniendo el catastro de los transformadores de potencia de Latacunga.

Con el cálculo del índice de salud funcional se obtuvo un diagnóstico exacto sobre el estado operativo de los transformadores de potencia obtenido mediante la metodología de suma de puntajes ponderados. Los resultados obtenidos indican que todos los equipos evaluados obtuvieron el HI que supera el 91.6 % lo que los sitúa en la categoría de muy bueno siendo esta criticidad la condición ideal para su funcionalidad.

El subíndice dieléctrico se obtuvo que 90 % de los transformadores exhibieron una rigidez dieléctrica que supera los 45Kv asegurando una capacidad de aislamiento apropiada para su funcionamiento, Si embargo el transformador situado en la subestación número 4 mostro un

83 % en la prueba de humedad indicando un ligero declive en la calidad de aceite en esta situación se mostro un 40,1 ppm de humedad la cual excede los limites sugeridos y supone un potencial peligroso para la durabilidad del equipo

La aplicación del Índice de salud evidencio ser una metodología eficaz para la categorización y valoración del estado de funcionamiento de los transformadores de potencia aportando de manera eficaz y significativa la fiabilidad del sistema eléctrico de Latacunga.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

Se recomienda mantener en contante monitoreo y control la SUBESTACION 4 controlando el grado de humedad que se encuentra en el aceite dieléctrico ya índice un elevado contenido de humedad y provoca un deterioro anticipado del transformador de potencia.

Aunque los transformadores de potencia evaluados muestran una rigidez dieléctrica superior a los 45 Kv es aconsejable llevar a cabo pruebas de aceite cada 12 meces. Esto permitirá identificar cualquier patrón de degradación en una etapa inicial para poner en marcha medidas de prevención y conservación del equipo.

Es de vital importancia mantener la unificación y actualización contante de la base de datos que almacena los resultados de las pruebas obtenidas y cálculos realizados para corroborar el estado operativo de los transformadores, además la implementación de herramientas digitales podría mejorar la accesibilidad y la eficiencia en la supervisión de estos activos eléctricos.

Considerando el éxito de la implementación del índice de salud en los transformadores de potencia de las subestaciones del ecuador se recomienda extender este procedimiento a otras subestaciones eléctricas del área, mediante este catastro permitirá obtener un registros mas amplio y preciso de la situación de los activos eléctricos a nivel provincial.

## 7 REFERENCIAS

- [1] Bogdan GORGAN1 and Laurentiu V. BADICU1, “CALCULATION OF POWER TRANSFORMERS HEALTH INDEXES,” 2010.
- [2] “IEEE SA - IEEE C57.104-2019.” Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/C57.104/7476/>
- [3] “IEEE SA - IEEE C57.106-2006.” Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/C57.106/3410/>
- [4] “IEEE SA - IEEE C57.109-2018.” Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/C57.109/6120/>
- [5] M. K. Ngwenyama and M. N. Gitau, “Application of back propagation neural network in complex diagnostics and forecasting loss of life of cellulose paper insulation in oil-immersed transformers,” *Scientific Reports* 2024 14:1, vol. 14, no. 1, pp. 1–28, Mar. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-56598-x.
- [6] “Gestión de activos-Aspectos generales, principios y terminología ISO55000,” 2014. [Online]. Available: [www.iso.org](http://www.iso.org)
- [7] N. del Pilar Bohórquez Forero, “Implementación de norma internacional de inventarios en Colombia,” *Innovar*, vol. 25, no. 57, pp. 79–92, Jul. 2015, doi: 10.15446/innovar.v25n57.50352.
- [8] J. M. Castro-Meneses, G. A. Gómez-Ramírez, and O. Núñez-Mata, “Índice de estimación de la vida residual en transformadores eléctricos de potencia basado en condición,” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 35, no. 4, p. Pág. 71-83, Sep. 2022, doi: 10.18845/tm.v35i4.5776.
- [9] I. Rondón, V. Calanche, and F. Rojas, “Metodología para estimar la vida útil del autotransformador at-4, 700 mva de la subestación guayana “B” debido a sobrecargas,” *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 17, no. 67, pp. 57–67, 2013, Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-48212013000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212013000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- [10] CELEC EP, “Diseno de Subestaciones,” pp. 0–36, Mar. 2016, Accessed: Jan. 18, 2025. [Online]. Available: [chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.celec.gob.ec/transelctric/images/stories/baners\\_home/LOTAIP\\_NEW/2016/04-2016/a3\\_Regulaciones%20y%20procedimientos/Resources/Disenio%20de%20Subestaciones.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.celec.gob.ec/transelctric/images/stories/baners_home/LOTAIP_NEW/2016/04-2016/a3_Regulaciones%20y%20procedimientos/Resources/Disenio%20de%20Subestaciones.pdf)
- [11] TD ELECTRIC, “Importancia de las subestaciones de energía eléctrica.” Accessed: Jan. 18, 2025. [Online]. Available: <https://tydelectric.com/importancia-subestaciones-energia-electrica/>

- [12] “Estructura del Sistema Electrico en el Ecuador. | PPT.” Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/slideshow/estructura-del-sistema-electrico-en-el-ecuador/55556667>
- [13] A. A. Romero, E. E. Mombello, and G. Ratta, “An overview on power transformer management: Individual Assets and Fleets,” *Proceedings of the 2012 6th IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition, T and D-LA 2012*, 2012, doi: 10.1109/TDC-LA.2012.6319081.
- [14] RVR Transformadores, “Transformadores de potencia | RVR Transformadores.” Accessed: Jan. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.rvrtransformadores.com/transformadores-de-potencia/>
- [15] Martin J. Heathcote, “El libro de J&P Transformers - Martin Heathcote - Google Libros.” Accessed: Jan. 18, 2025. [Online]. Available: [https://books.google.com.ec/books?hl=en&lr=&id=paPKsOXn5FMC&oi=fnd&pg=PP1&dq=\(power+transformer\)+AND+\(definition\)&ots=LqEoOpuS2k&sig=P6NbEglGXLIeOJjQ0uEK35U05yc&redir\\_esc=y#v=onepage&q=\(power%20transformer\)%20AND%20\(definition\)&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=en&lr=&id=paPKsOXn5FMC&oi=fnd&pg=PP1&dq=(power+transformer)+AND+(definition)&ots=LqEoOpuS2k&sig=P6NbEglGXLIeOJjQ0uEK35U05yc&redir_esc=y#v=onepage&q=(power%20transformer)%20AND%20(definition)&f=false)
- [16] TAMESON, “Tipos y configuraciones de transformadores trifásicos | Tameson.es.” Accessed: Jan. 19, 2025. [Online]. Available: <https://tameson.es/pages/transformadores-trifasicos-una-guia-completa>
- [17] Martínez Alarcón Alejandro, “TIPOS DE TRANSFORMADORES.” Accessed: Jan. 19, 2025. [Online]. Available: <https://independent.academia.edu/AlejandroMartinezAlarcon>
- [18] P. Elizabeth and T. Portilla, “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA ‘ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y SELECCIÓN DEL EQUIPO ELECTRICO PARA UN TRANSFORMADOR ELEVADOR DE POTENCIA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA’ PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO,” Guayaquil, Jun. 2020. Accessed: Jan. 19, 2025. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6669/1/CD-5063.pdf>
- [19] Alvaro Acosta Agón - Mag en Educación, “TRANSFORMADORES.” Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.tecnologiaypedagogia.net/2020/07/transformadores.html>
- [20] Anchundia Loor Airton Antonio, “Partes de un transformador de potencia. by Airton Anchundia on Prezi.” Accessed: Jan. 18, 2025. [Online]. Available: <https://prezi.com/p/s8yfffyey6e-/partes-de-un-transformador-de-potencia/>
- [21] Luis Fernando Carvajal Galeano, “Vida útil en transformadores de Distribución y su relación con el modelo térmico bajo normas IEEE/IEC/ANSI,” Pereira, Apr.

2008. Accessed: Jan. 31, 2025. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/333d9ca7-2856-4ec3-89a3-282fdb2825aa/content>
- [22] H. Malik, A. Azeem, and R. K. Jarial, "Application research based on modern-technology for transformer Health Index estimation," *International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2012 - Summary Proceedings*, 2012, doi: 10.1109/SSD.2012.6198012.
- [23] Óscar Núñez Mata, Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez, Fauricio Acuña Rojas, and César González Solís, "Vista de Metodología para Evaluar la Condición de Transformadores Eléctricos de Potencia Basada en un Índice de Salud Compuesto | Ingeniería," no. 2022, Nov. 2022, Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/50613/53632>
- [24] "Evaluación del estado de los transformadores de potencia | eCIGRE." Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/761-condition-assessment-of-power-transformers.html>
- [25] "Vista de Metodología para Evaluar la Condición de Transformadores Eléctricos de Potencia Basada en un Índice de Salud Compuesto | Ingeniería." Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/50613/53632>
- [26] "IEEE SA - IEEE 62-1995." Accessed: Jan. 26, 2025. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/62/210/>
- [27] "IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus - Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors," Mar. 1995, doi: 10.1109/IEEESTD.1995.122640.
- [28] "IEEE SA - IEEE C57.12.90-2021." Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/C57.12.90/7211/>
- [29] "UNE-EN IEC 60599:2023 Equipos eléctricos impregnados en aceite..." Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0071166>
- [30] D. De Posgrado, I. F. Freire, A. Salvador, M. Astudillo Muñoz, and J. Carlos, "Interpretación de gases disueltos en aceite dieléctrico mediante redes neuronales para la detección de anomalías en transformadores de potencia de la subestación Novacero", 2023, *Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)*. Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10299>

- [31] “Pruebas al aceite – Proindulek / Laboratorio de Aceites Aislantes.” Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.proindulek.com.mx/pruebas-al-aceite/>
- [32] Richard Ladroga and Susan McNelly, “IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers,” Sep. 2008, doi: 10.1109/IEEESTD.2009.4776518.
- [33] N. Lelekakis, D. Martin, W. Guo, and J. Wijaya, “Comparison of dissolved gas-in-oil analysis methods using a dissolved gas-in-oil standard,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 27, no. 5, pp. 29–35, Sep. 2011, doi: 10.1109/MEI.2011.6025366.
- [34] N. Lelekakis, D. Martin, W. Guo, and J. Wijaya, “Comparison of dissolved gas-in-oil analysis methods using a dissolved gas-in-oil standard,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 27, no. 5, pp. 29–35, Sep. 2011, doi: 10.1109/MEI.2011.6025366.
- [35] “IEC 60567:2023 | IEC.” Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/70013>
- [36] Alexandre Machado, “Ensayos físico-químicos y DGA en Transformadores de potencia,” Oct. 2016. [Online]. Available: [www.cargill.com](http://www.cargill.com)
- [37] LUIS DANIEL CAIZA BETANCOURT and JORGE PAÚL MUÑOZ PILCO, “ANÁLISIS DINÁMICO PARA EL DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA BASADA EN SU CONDICIÓN,” 2024, Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/26770/1/TTS1617.pdf>
- [38] Megger, “Guia Megger es marca comercial registrad.” Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.artec-ingenieria.com/pdf/Guias\\_Tecnicas\\_Megger/Castellano/Guidetoinsulatingoil--2007-839\\_TG\\_esla\\_V04.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.artec-ingenieria.com/pdf/Guias_Tecnicas_Megger/Castellano/Guidetoinsulatingoil--2007-839_TG_esla_V04.pdf)
- [39] “La tensión interfacial y su importancia dentro del análisis fisicoquímico – Transequipos S.A.” Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: <https://transequipos.com/la-tension-interfacial-y-su-importancia-dentro-del-analisis-fisicoquimico/>
- [40] JUAN CARLOS ASTUDILLO MUÑOZ, “ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA LA REPARACIÓN O REEMPLAZO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA,” Jan. 2008. Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/787/1/CD-1225.pdf>

- [41] “Normas ASTM 974 - 97 Castellano | PDF | Revestimiento | Construcción.” Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/705838806/Normas-ASTM-974-97-Castellano>
- [42] DELTA S.A DE C.V., “Pruebas Fisico Quimicas Transformador.” Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/71475882/PRUEBAS-FISICO-QUIMICAS>
- [43] “Norma de Codigo de Colores Aprobada | PDF | Pintar | Pinturas.” Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/doc/61551692/Norma-de-Codigo-de-Colores-Aprobada>
- [44] “aceite aislamiento en transformadores | PPT.” Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/slideshow/aceite-aislamiento-en-transformadores/251319372#44>
- [45] MEGA POWER, “BOLETÍN DE GESTIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL TRANSFORMADOR (TLM): Factor de potencia/Factor de disipación y capacitancia.” [Online]. Available: [www.megger.com/tlm](http://www.megger.com/tlm)
- [46] V. Tibanlombo, J. Ramírez, N. Granda, and F. Quilumba, “Evaluación del Estado del Aislamiento en Transformadores a partir de Mediciones IFRA de Alto Voltaje,” *Revista Politécnica*, vol. 45, no. 1, pp. 39–48, Apr. 2020, doi: 10.33333/RP.VOL45N1.04.
- [47] Juan Pablo Lata Cando, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA,” 2022. Accessed: Jan. 20, 2025. [Online]. Available: <file:///C:/Users/Synthia/Desktop/tesis/MARCO%20TEORIORICO/UPS-CT009750.pdf>
- [48] Electro Service, “Análisis de Furanos.” Accessed: Jan. 20, 2025. [Online]. Available: <https://rqfelectroservice.com/2023/11/08/que-es-el-analisis-de-furanos/>
- [49] “IEEE SA - IEEE C57.104-2019.” Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/C57.104/7476/>
- [50] “IEEE SA - IEEE C57.106-2015.” Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/C57.106/5361/>
- [51] “IEEE SA - IEEE C57.147-2018.” Accessed: Feb. 18, 2025. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/C57.147/6717/>
- [52] M. M. Islam, G. Lee, and S. N. Hettiwatte, “A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers,” *Electrical Engineering*, vol. 100, no. 2, pp. 581–605, Jun. 2018, doi: 10.1007/S00202-017-0532-4.

- [53] “UNE-EN IEC 60599:2023 Equipos eléctricos impregnados en aceite...”  
Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0071166>
- [54] “IEC 60567:2023 | IEC.” Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/70013>