

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y DE ENERGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



“ÍNDICE DE SALUD DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA A PARTIR DEL ANÁLISIS DE ACEITE USANDO LÓGICA DIFUSA EN LA UNIDAD DE NEGOCIOS HUANCAYO DE LA EMPRESA ELECTROCENTRO, 2021”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN ENERGÍA

AUTOR

Anthony Saúl Arcos Reyes

ASESOR

Mg. Juan Francisco Ochoa Arrasco

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Ingeniería y Tecnología

Callao, 2024

PERÚ



INFORME FINAL DE TEIS - Arcos Reyes

7%
Textos
sospechosos



6% Similitudes
< 1% similitudes entre comillas
< 1% entre las fuentes mencionadas
2% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: INFORME FINAL DE TEIS - Arcos Reyes.pdf
ID del documento: 81150eb61eb9a771c4e1ae8b291a5907707974fd
Tamaño del documento original: 1,07 MB

Depositante: FIME PREGRADO UNIDAD DE INVESTIGACION
Fecha de depósito: 13/8/2024
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 13/8/2024

Número de palabras: 22.773
Número de caracteres: 152.235

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	journal.poligran.edu.co 2 fuentes similares	2%		Palabras idénticas: 2% (439 palabras)
2	www.scielo.cl Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos en Ac... 3 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (140 palabras)
3	revista.aem.es Revista digital - Determinación de un Índice de Salud de Activos, ... 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (129 palabras)
4	repositorio.uncp.edu.pe 3 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (76 palabras)
5	dialnet.unirioja.es Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Ind... 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (44 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.unac.edu.pe	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (35 palabras)
2	virtual.cuautitlan.unam.mx Lógica difusa – acervo para el mejoramiento del apr... 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (38 palabras)
3	dialnet.unirioja.es Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos e... 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (30 palabras)
4	repositorio.uncp.edu.pe	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (30 palabras)
5	repositorio.pucesa.edu.ec	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (32 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)

Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1	https://schutzls.com/chemicoilrd/aceites-dielectricos/contenido-de-agua-astm
2	https://curiosoando.com/que-diferencia-investigacion-basica-e-investigacion
3	https://revista.aem.es/noticia/determinacion-de-un-indice-de-salud-de-activos
4	https://www.enelx.com/co/es/empresas/business-solutions/mantenimiento
5	https://www.lifeder.com/metodo

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD:

Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN:

Unidad de investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía.

TÍTULO:

“Índice de salud de transformadores de potencia a partir del análisis de aceite usando lógica difusa en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021”

AUTOR(ES):

Anthony Saúl Arcos Reyes / **DNI:** 71586580 / **ORCID:** 0009-0006-7569-5830

ASESOR:

Mg. Juan Francisco Ochoa Arrasco / **DNI:** 09828966 / **ORCID:** 0009-0003-1983-5550

LUGAR DE EJECUCIÓN:	Huancayo – Junín - Perú
UNIDAD DE ANÁLISIS:	Transformador de Potencia
TIPO:	Aplicada
ENFOQUE:	Cuantitativo
DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:	No Experimental
TEMA OCDE:	2.03.01 Ingeniería Mecánica

**ACTA N°183 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO EN ENERGÍA**

**LIBRO 001, FOLIO N°209, ACTA N°183 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO TALLER DE
TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN ENERGÍA.**


A los 16 días del mes de agosto del año 2024, siendo las 19:20 horas, se reunieron en el Auditorio "Ausberto Rojas Saldaña" sito Av. Juan Pablo II N° 306 Bellavista – Callao, los miembros del **Jurado Evaluador de Sustentación del I Ciclo Taller de Tesis 2024**, designado con Resolución de Consejo de Facultad N° 110-2024-CF-FIME – Callao, 23 de abril de 2024, para la obtención de los **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN ENERGIA**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

- | | | |
|-----------------------------------|---|------------|
| ▪ Dr. JUAN MANUEL PALOMINO CORREA | : | Presidente |
| ▪ Mg. ADOLFO ORLANDO BLAS ZARZOSA | : | Secretario |
| ▪ Mg. JOSÉ LUIS YUPANQUI PÉREZ | : | Vocal |

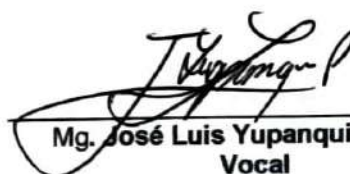
Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis del Bachiller **ANTHONY SAUL ARCOS REYES**, quien habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN ENERGÍA**, sustenta la tesis "**ÍNDICE DE SALUD DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA A PARTIR DEL ANÁLISIS DE ACEITE USANDO LÓGICA DIFUSA EN LA UNIDAD DE NEGOCIOS HUANCAYO DE LA EMPRESA ELECTROCENTRO, 2021**", cumpliendo con la sustentación en acto público de acuerdo al artículo 56° de la Resolución de Consejo Universitario N° 150 -2023-CU.- CALLAO, 15 de junio del 2023.

Con el quórum reglamentario, se dio inicio a la exposición de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición y la absolución de las preguntas formuladas por el jurado, y efectuada la deliberación pertinente, acordó por unanimidad: Dar por **APROBADO** en la escala de calificación cualitativa **MUY BUENO**, y con calificación cuantitativa de **(17) DIECISIETE**, conforme a lo dispuesto en el Artículo 24° del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 150-2023-CU- CALLAO, 15 de junio de 2023.

Se dio por cerrada la Sesión a las 19:50 horas del día 16 de agosto de 2024.


Dr. Juan Manuel Palomino Correa
Presidente


Mg. Adolfo Orlando Blas Zarzosa
Secretario


Mg. José Luis Yupanqui Pérez
Vocal

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y DE ENERGÍA
Jurado Evaluador en las Sustentaciones de Tesis

I N F O R M E

Visto la *Tesis* titulado "ÍNDICE DE SALUD DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA A PARTIR DEL ANÁLISIS DE ACEITE USANDO LÓGICA DIFUSA EN LA UNIDAD DE NEGOCIOS HUANCAYO DE LA EMPRESA ELECTROCENTRO, 2021", presentado por el(la) **Bachiller de Ingeniería en Energía** ARCOS REYES, Anthony Saul.

A QUIEN CORRESPONDA:

El **Presidente del Jurado Evaluador en la Sustentación de Tesis**, manifiesta que la Tesis se realizó el viernes 16 de agosto del 2024 a las 19:20 horas. en el Auditorio "Ausberto Rojas Saldaña", no habiendo observaciones ni correcciones que incluir, el mismo que en su oportunidad fue cuidadosamente evaluado por cada uno de los miembros del Jurado Evaluador, no presentando ninguna observación en su estructura metodológica y contenido temático.

Se emite el presente informe favorable para los fines pertinentes.

Bellavista, 30 de setiembre del 2024



Dr. JUAN MANUEL PALOMINO CORREA
Presidente de Jurado

DEDICATORIA

A mi madre por el gran apoyo
y nunca dejarme caer

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento a mi Madre y hermana
por mantener la fe en mi

ÍNDICE

ÍNDICE	1
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCCIÓN	12
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1 Descripción de la realidad problemática	14
1.2 Formulación del problema	16
1.2.1 Problema general	16
1.2.2 Problemas específicos	16
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 Justificación	17
1.4.1 Justificación Practica	17
1.4.2 Justificación Metodológica	18
1.4.3 Justificación Social	18
1.5 Delimitantes de la investigación	19
1.5.1 Delimitante Teórica	19
1.5.2 Delimitante Temporal	19
1.5.3 Delimitante Espacial	19
II. MARCO TEÓRICO	20
2.1 Antecedentes	20

2.1.1	Antecedentes Internacionales	20
2.1.2	Antecedentes Nacionales	21
2.2	Bases teóricas.....	23
2.2.1	Cadena de valor de la energía eléctrica en el Perú.....	23
2.2.2	Subestaciones Eléctricas de Potencia (SEP).....	24
2.2.3	Transformador de Potencia (TP).....	25
2.2.4	Aceite Dieléctrico	27
2.2.5	Técnica de Monitoreo y evaluación de condición basado en el Análisis de Aceite mineral	28
2.2.6	Análisis Físico-Químico (FQ)	29
2.2.7	Análisis de gases disueltos (DGA)	37
2.2.8	Análisis de contenido de Furanos	39
2.2.9	Lógica Difusa	40
2.2.10	Funcionamiento de un control difuso.....	41
2.2.11	Base de conocimiento.....	43
2.2.12	Mecanismo de inferencia	43
2.2.13	Interfaz de Fuzzificación	43
2.2.14	Interfaz de Defuzzificación	43
2.2.15	Sistema difuso tipo Mandani	44
2.3	Marco conceptual	44
2.3.1	Índice de Salud para transformadores de potencia (IS)	44
2.4	Definición de términos básicos	47
2.4.1	Índice de Salud	47
2.4.2	Análisis de aceite	47
2.4.3	Diagnóstico de gases disueltos.....	47
2.4.4	Análisis Físico Químico.....	48
2.4.5	Rigidez Dieléctrica	48

2.4.6	Tensión Interfacial.....	48
2.4.7	Factor de Potencia.....	48
2.4.8	Lógica Difusa.....	48
III.	HIPOTESIS Y VARIABLES.....	49
3.1	Hipótesis.....	49
3.2	Operacionalización de variable.....	50
IV.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	52
4.1	Diseño metodológico.....	52
4.1.1	Tipo de Investigación.....	52
4.1.2	Enfoque de Investigación.....	52
4.1.3	Nivel de Investigación.....	52
4.1.4	Diseño de Investigación.....	52
4.2	Método de investigación.....	53
4.2.1	Etapas 1 Determinación de parámetros.....	53
4.2.2	Etapas 2 Diseño de Proceso.....	54
4.2.3	Etapas 3 Implementación y programación en Matlab.....	54
4.2.4	Etapas 4 Simulación y validación de la simulación.....	54
4.2.5	Etapas 5 Propuesta de mejora.....	54
4.3	Población y Muestra.....	55
4.4	Lugar de estudio.....	55
4.5	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	55
4.5.1	Técnica para la recolección de datos.....	55
4.5.2	Instrumento para la recolección de datos.....	55
4.6	Análisis y procesamiento de datos.....	56
4.7	Aspectos éticos en Investigación.....	74
V.	RESULTADOS.....	74
5.1	Resultados descriptivos.....	74

5.1.1	Resultado de parámetros a evaluar en el IS	74
5.1.2	Resultado Estimación del IS	75
5.1.3	Resultados de Implementación del IS	76
5.1.4	Resultado de Validación de la simulación	81
5.1.5	Resultado de Propuesta de mejora	83
VI.	DISCUSIONES DE RESULTADOS	85
6.1	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	85
6.2	Responsabilidad Etica	89
VII.	CONCLUSIONES	89
VIII.	RECOMENDACIONES	91
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
X.	ANEXOS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de Ishikawa sobre la realidad problemática	15
Figura 1.2 Distritos de la provincia de Huancayo	20
Figura 2.1 Cadena de valor de la energía eléctrica.....	23
Figura 2.2 Celda de transformación de una SEP	24
Figura 2.3 Transformador de potencia y sus componentes.....	25
Figura 2.4 Análisis recurrentes al aceite dieléctrico.....	29
Figura 2.5 Parámetros analizados en el análisis Físico-Químico	30
Figura 2.6 Tensión de ruptura dieléctrica (Rigidez Dieléctrica)	31
Figura 2.7 Proceso de generación de subproductos ácidos	32
Figura 2.8 Curva de equilibrio humedad en el aceite y T ⁰ de papel.....	34
Figura 2.9 Toma de muestra de aceite de transformador.....	37
Figura 2.10 Correlación de contenido de furanos vs grado de polimerización..	39
Figura 2.11 Diferencias entre conjuntos de lógica clásica y lógica difusa.....	40
Figura 2.12 Estructura básica de un sistema de inferencia difuso.....	41
Figura 2.13 Sistema difuso Mandani procesamiento detallado.	44
Figura 2.14 Parámetros del IS de TP del proyecto de investigación	45
Figura 4.1 Etapas del desarrollo del proyecto de investigación.....	53
Figura 4.2 Ubicación de SEP de la UN Huancayo	55
Figura 4.3 Sistema tipo Mandani.....	58
Figura 4.4 Función de permanencia Trapezoidal.	59
Figura 4.5 Diagrama de proceso previo a la Fuzzificación	62
Figura 4.6 Función de membresía Trapezoidal de referencia	63
Figura 4.7 Importancia de cada parámetro evaluado	65
Figura 4.8 Fuzzy Logic designer Parámetros en estudio.....	69
Figura 4.9 Programación de las funciones de membresía IS FQ	69
Figura 4.10 Programación de los puntos de membresía IS PAPEL	70
Figura 4.11 Editor de reglas en Matlab Fuzzy Logic	71
Figura 4.12 Simulación de transformador SE MACHU.....	72
Figura 4.13 Método de agregación de Mandani	73
Figura 5.1 Flujo de proceso para la determinación de los sub índices	76
Figura 5.2 Resultado de IS de TP N ^o 1	80

Figura 5.3 Histograma de IS Consultora	82
Figura 5.4 Histograma de IS Lógica difusa	83
Figura 6.1 Límites admisibles según Castillo y Robles	85
Figura 6.2 Diferencia entre los datos de entrada entre trabajos de investigación	87
Figura 6.3 Esquema de diagrama de bloques de Simulink	88
Figura 10.1 Edición de límites de membresía de IS_DGA	111
Figura 10.2 Programación de los puntos de membresía IS PAPEL	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Unidades de Negocio de Electrocentro	15
Tabla 2.1 Tipos de aislamientos y sus características.....	27
Tabla 2.2 Límites admisibles de aceite nuevo.	31
Tabla 2.3 Límites admisibles de aceite en operación	32
Tabla 2.4 Límites máximos sugeridos para el NN	33
Tabla 2.5 Límites mínimos de TI	34
Tabla 2.6 Límites máximos admisibles de Contenido de Humedad	35
Tabla 2.7 Límites máximos de FP a 25°C y 100°C.....	36
Tabla 2.8 Diferencia entre FP 25°C y 100°C	36
Tabla 2.9 Energía requerida para romper los hidrocarburos	37
Tabla 2.10 Gases en la cromatografía de gases	38
Tabla 2.11 Conceptos básicos de la lógica difusa.....	42
Tabla 2.12 Clasificación del IS de acuerdo al valor	47
Tabla 4.1 Datos técnicos de TP evaluados	56
Tabla 4.2 Resumen de parámetros y agrupación por tipo de aislante	57
Tabla 4.3 Parámetros y límites admisibles de acuerdo al tipo de aislamiento ..	60
Tabla 4.4 Pesos asignados a los grupos de atributos	61
Tabla 4.5 Rangos de IS de los parámetros evaluados	62
Tabla 4.6 Definición de puntos de las funciones de membresía de entrada	63
Tabla 4.7 Definición de los puntos de membresía de IS de TP	64
Tabla 4.8 Valores de ítems DGA.....	67
Tabla 4.9 Valores de ítems FQ	67
Tabla 4.10 Valores de ítems PAPEL.....	67
Tabla 4.11 Sub índices de salud por parámetro	68
Tabla 4.12 Condición de puntuación de IS.....	73
Tabla 4.13 Clasificación según condición según empresa consultora	74
Tabla 5.1 Resultado de la determinación de Parámetros estudiados.....	75
Tabla 5.2 IS FQ calculado.....	77
Tabla 5.3 IS de DGA.....	78
Tabla 5.4 IS Papel	79
Tabla 5.5 Índice de Salud de transformadores de la UN Huancayo	80

Tabla 5.6 Resultados de IS Difuso vs IS Consultoría.....	81
Tabla 5.7 Cuadro de toma de decisiones.....	83
Tabla 6.1 Limites admisibles DGA basado en la norma IEEE C57.104 2019...	86
Tabla 10.1 Reglas de Experto para programar	104
Tabla 10.2 Valores ítem de DGA	107
Tabla 10.3 Valores de ítem Físico Químico	108
Tabla 10.4 Valores de ítem Físico Químico	109
Tabla 10.5 Resultados de Sub Índices de Salud.....	110
Tabla 10.6 Sectorización de condiciones	112

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

(TP) Transformador de Potencia	7
(SEP) Subestación eléctrica de Potencia.....	8
(DGA) Análisis de gases disueltos.....	7
(IS) Índice de salud del activo.....	7
(FQ) Análisis Físico Químico.....	8
(NN) Número de Neutralización.....	13
(TT) Tensión Interfacial.....	13
(UN) Unidad de Negocio.....	7
(H ₂) Hidrogeno.....	11
(C ₂ H ₂) Acetileno.....	11
(CH ₄) Metano.....	11
(C ₂ H ₄) Etileno.....	11
(C ₂ H ₆) Etano.....	11
(CO) Monóxido de carbono	11
(CO ₂) Dióxido de carbono.....	11
(KOH) Hidróxido de Potasio.....	28
(FP) Factor de Potencia.....	11
(ppm) Partes por millón.....	26
(Si) Índice de condición de sub parámetro.....	35
(Wi) Peso asignado a sub parámetro.....	35

RESUMEN

En la cadena de suministro de energía, la gestión eficiente de activos es crucial para garantizar la confiabilidad y el rendimiento óptimo de los sistemas de energía. Dentro de la transmisión y distribución de energía eléctrica, los transformadores de potencia (TP) son activos críticos que determinan la continuidad del servicio eléctrico. Los TP son los equipos más importantes y costosos en una subestación eléctrica, encargándose de transformar los niveles de tensión en un circuito de corriente alterna, ya sea en subestaciones de transmisión, generación o distribución.

El alto valor económico y el impacto social de los TP generan la necesidad de desarrollar herramientas y técnicas para evaluar su condición y prevenir fallos. La desconexión de un TP puede afectar a ciudades enteras, haciendo vital su continuidad operativa. En este contexto, surge el concepto de Índice de Salud (IS) del activo. Según Antonio De La Fuente y otros, el IS es una clasificación que refleja o caracteriza el estado de la condición del activo, proporcionando una medida cuantitativa del estado operativo del equipo. Estos índices permiten una evaluación rápida y objetiva de la salud del activo, guiando la toma de decisiones de mantenimiento basadas en la condición del activo para maximizar la disponibilidad y prolongar su vida útil.

El presente proyecto de tesis busca determinar el índice de salud de transformadores de potencia a partir del análisis de aceite, lo cual permite obtener un panorama del estado interno del TP sin necesidad de sacarlo de servicio ni intervenirlo. La empresa en estudio opera una concesión de transmisión y distribución de energía eléctrica en cinco regiones del Perú. Para el proyecto de tesis, se consideró una muestra de una sola unidad de negocio de las cinco que tiene la empresa, específicamente la UN Huancayo.

ABSTRACT

In the energy supply chain, efficient asset management is crucial to ensure the reliability and optimal performance of energy systems. Within the transmission and distribution of electrical energy, power transformers (PTs) are critical assets that determine the continuity of electric service. PTs are the most important and expensive equipment in a substation, responsible for transforming voltage levels in an alternating current circuit, whether in transmission, generation, or distribution substations.

The high economic value and social impact of PTs necessitate the development of tools and techniques to assess their condition and prevent failures. The disconnection of a PT can affect entire cities, making their operational continuity vital. In this context, the concept of Health Index (HI) emerges. According to Antonio De La Fuente and others, the HI is a classification that reflects or characterizes the condition of the asset, providing a quantitative measure of the equipment's operational state. These indices allow for a quick and objective evaluation of the asset's health, guiding maintenance decisions based on the asset's condition to maximize availability and extend its lifespan.

This thesis project aims to determine the health index of power transformers through oil analysis, which provides an overview of the PT's internal condition without the need to take it out of service or intervene. The company under study operates a concession for the transmission and distribution of electrical energy in five regions of Peru. For the thesis project, a sample from one business unit out of the five operated by the company was considered, specifically the UN Huancayo.

INTRODUCCIÓN

La gestión de activos es fundamental para el funcionamiento eficiente de las empresas de servicios públicos, ya que determina estrategias de mantenimiento, momentos de reemplazo y contribuye significativamente a la optimización de costos, riesgos y rendimiento. En la cadena de suministro de la energía, gestionar eficientemente los activos en el mantenimiento es fundamental para garantizar la confiabilidad y el rendimiento óptimo de los sistemas de energía.

En transmisión y distribución de la energía eléctrica existen activos de gran importancia, los cuales determinan la continuidad del servicio eléctrico. En este sentido los transformadores eléctricos de potencia (TP) juegan un papel crítico ya que, El transformador de potencia es el equipo eléctrico primario más importante y costoso en una subestación eléctrica. Básicamente, se encarga de transformar los niveles de tensión en un circuito de corriente alterna. Los niveles de tensión son elevados o reducidos, dependiendo si es una subestación de transmisión, generación y/o distribución (Vargas, 2020).

El alto valor del activo mencionado líneas arriba genera la necesidad de desarrollar diversas herramientas y técnicas para evaluar su condición y prevenir posibles fallos, ya que no solo es el aspecto económico lo que lo vuelve importante, si no, el impacto social que genera la desconexión de un TP, ya que usualmente, ciudades enteras se encuentra dependientes a ellos, esto hace que su continuidad operativa sea importante.

En este contexto surge la oportunidad de desarrollar el concepto de Índice de Salud (IS) del activo, que según Antonio De La Fuente y otros el IS es una clasificación del activo, que está diseñada, de alguna manera, para reflejar o caracterizar el estado de la condición (2022 pág. 2), esto quiere decir que proporciona una medida cuantitativa del estado operativo del equipo. Estos índices no solo permiten una evaluación rápida y objetiva de la salud del activo, sino que también sirven como una guía para la toma de decisiones de mantenimiento basadas en la condición del activo, priorizando acciones necesarias para maximizar la disponibilidad y prolongar la vida útil del equipo.

En los esfuerzos de tener una condición del activo, en este caso el transformador de potencia, en la literatura se abarca distintos tipos de análisis para ello. Uno

de los análisis más resaltantes es el análisis de aceite del transformador de potencia, en el cual se desarrollan distintos análisis al medio aislante del TP, entre los que se encuentran el Análisis de gases disueltos (DGA) y Análisis Físico Químico (FQ) que se encuentran bajo normas técnicas tales como la IEEE C57.104-2019 y IEEE C57.106-2015 respectivamente. Análisis en los cuales se abarca las características dieléctricas del aceite y los productos de descomposición propios de la operación del TP.

El presente proyecto de tesis busco determinar el índice de salud de transformadores de potencia partir del análisis de aceite, los cuales brindan un panorama de lo que puede estar sucediendo al interior del TP, sin necesidad de sacarlo fuera de servicio, ni intervenirlo.

La empresa en mención, es operadora de una concesión de transmisión y distribución de energía eléctrica a nivel de 5 regiones en el Perú, por motivo del proyecto de tesis se consideró una muestra de una sola unidad de negocio de las 5 que tiene la empresa, la UN Huancayo.

Para el desarrollo del índice de salud y la categorización basada en el análisis de aceite de los TP`s, se usó Lógica difusa, la cual contribuirá en el procesamiento de los datos. Tal como lo planteado por Andrés Ceron y otros en su artículo “Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos en Aceite Mineral con Voltajes entre 69kV y 230kV usando Lógica Difusa”, en el cual se proporciona una metodología para calcular el índice de salud para el sistema de asilamiento papel-aceite en TP, utilizando lógica difusa para 18 transformadores de una empresa del sector eléctrico colombiano.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

En la cadena de suministro de energía, los transformadores de potencia (TP) muchas veces representan hasta el 60% de la inversión total de una subestación eléctrica de potencia (SEP); de lo anterior se infiere el alto valor económico individual que tiene el TP, ello hace que sea de alta prioridad el monitoreo de la condición de este activo tan importante. En tal sentido una operación segura y económica de los TP`s se perfila como prioridad en el marco de la gestión del mantenimiento para cualquier organización que utiliza o comercializa energía eléctrica, ya que una operación fuera de los parámetros recomendados tiene una alta probabilidad de provocar una indisponibilidad del activo, que se traduciría en el desabastecimiento de servicios públicos principales tales como hospitales, clínicas, hogares con personas dependientes de equipos para vivir, negocios, organizaciones publica, etc. Que se traducen en pérdidas económicas de gran magnitud. Estas indisponibilidades son de gran impacto tanto en el aspecto social, de seguridad y económico.

La empresa Electrocentro S.A. cuenta con un área de mantenimiento de transmisión que se encarga del mantenimiento de las subestaciones de potencia y líneas de transmisión en 5 regiones del país, Junín, Pasco, Huánuco, Ayacucho y Huancavelica. Actualmente dicha área no se cuenta con una metodología o herramienta para saber la condición de su activo más importante.

Dentro de este marco la UN Huancayo de la empresa Electrocentro, actualmente dispone dentro de su alcance de 12 transformadores de potencia que alimentan a las cargas de la Provincia de Huancayo y alrededores.

Tabla 1.1 Unidades de Negocio de Electrocentro

Unidad de Negocio (UN)	Provincias y alrededores asociadas
UN Huancayo	Huayucachi, El Tambo, Huancayo, etc.
UN Huancavelica	Huancavelica, Restitución, Pampas, Tablachaca, Cobriza, etc.
UN Ayacucho	Cangallo, Huanta, Mollepata, San Francisco, Ayacucho, etc.
UN Selva Central	La Merced, San Ramon, Oxapampa, Satipo, etc
UN Tarma-Pasco-Huánuco	Gollarisquizga, Huariaca, Pasco, Ninatambo, Junín, Carhuamayo, etc.

Nota: Las subestaciones de las UN, son de diferentes potencias, de acuerdo a las cargas de las ciudades o anexos correspondientes.

La falta de una herramienta de conocimiento del estado del activo más importante del área de mantenimiento transmisión, ocasiona mantenimientos no efectivos, planeamientos no acertados, falta de capacitación continua al personal, etc. Dichas problemáticas han sido identificadas en el siguiente diagrama de Ishikawa.

Figura 1.1 Diagrama de Ishikawa sobre la realidad problemática



1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo determinar el índice de salud de transformadores de potencia a partir de análisis de aceite usando Lógica Difusa en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021?

1.2.2 Problemas específicos

¿Cuáles son los parámetros para determinar el índice de salud de los transformadores de potencia a partir del análisis de aceite en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021?

¿De qué manera desarrollamos una metodología para la estimación del índice de salud a partir del análisis de aceite usando lógica difusa en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021?

¿Cómo aplicar la metodología para la estimación del índice de salud con lógica difusa a partir del análisis de aceite en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021?

¿Cómo realizar la validación de la simulación de la metodología propuesta para determinar el IS a partir del análisis de aceite en la UN Huancayo?

¿Cómo realizar una propuesta de mejora del mantenimiento basado en el IS de los TP a partir del análisis de aceite en la UN Huancayo?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar el índice de salud de transformadores de potencia a partir del análisis de aceite usando lógica difusa en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar los parámetros del índice de salud de los transformadores de potencia a partir del análisis de aceite en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021

Estimar el Índice de salud con lógica difusa a partir del análisis de aceite en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021

Clasificar el índice de salud con lógica difusa a partir del análisis de aceite en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021.

Realizar la validación de la simulación de la metodología propuesta que determine el IS a partir del análisis de aceite en la UN Huancayo.

Realizar una propuesta de mejora del mantenimiento basado en el IS de los TP a partir del análisis de aceite en la UN Huancayo.

1.4 Justificación

El IS dentro de la gestión de mantenimiento es una herramienta de gran impacto que proporciona información general del estado del activo en estudio, el cual es beneficioso para la toma de decisiones confiables en la planificación del mantenimiento, por ello, la presente investigación pretendió categorizar las justificaciones descritas a continuación:

1.4.1 Justificación Práctica

La presente investigación tuvo como fin, el resolver la problemática ocasionada por la falta de una herramienta que contribuya al conocimiento de la condición de los TP.

Según Bernal considera que la justificación práctica es cuando su desarrollo ayuda a resolver un problema o, por lo menos propone estrategias que al aplicarse contribuirán a resolverlo (2010 pág. 106). El uso de lógica difusa, para la determinación del IS, es una estrategia que combina conceptos técnicos y teóricos, para la obtención de la condición del activo en cuestión.

1.4.2 Justificación Metodológica

En investigación científica, la justificación metodológica se da cuando el proyecto propone un nuevo método o una nueva estrategia para generar conocimiento válido y confiable” (Bernal, 2010b pág. 107). En el contexto de lo planteado por Bernal, la investigación desarrolla una metodología eficiente y confiable para la categorización de la condición de los TP`s de la UN Huancayo de la empresa Electrocentro. Para ello la presente investigación desarrolla un Índice de salud del activo basado en el análisis de aceite del transformador, dicha data obtenida del desarrollo de la metodología fue procesada usando Lógica difusa basada en el conocimiento experto y normativas internacional que recolectan información de la industria en el ámbito del mantenimiento de TP, tales como las normas IEEE.

1.4.3 Justificación Social

La presente investigación desarrolla un IS el cual contribuye en la toma de decisiones a nivel operativo y de mantenimiento de los TP`s, siendo el activo más importante de las SEP`s. Esto implica una reducción en la probabilidad de falla de los TP`s, lo cual está relacionado con la continuidad del servicio eléctrico que brinda la empresa Electrocentro, la cual su mayoría de clientes, son clientes residenciales, hospitales, clínicas, empresas productoras de media y pequeña magnitud, etc.

Tal como describe Ñaupas Paitán, y otros, una justificación social es cuando “la investigación va a resolver problemas sociales que afectan a un grupo social (2018 pág. 221).

La indisponibilidad del servicio eléctrico afecta a grupos sociales dependientes de los servicios públicos tales como Hospitales, clínicas y personas dependientes de equipos eléctricos para vivir, hace que sea de un impacto mayor y considerable.

1.5 Delimitantes de la investigación

1.5.1 Delimitante Teórica

La presente investigación esta soportada teóricamente a nivel de mantenimiento, por el concepto del Índice de salud de un activo, específicamente en los transformadores de potencia que según Núñez y otros, El índice de salud de un transformador es un parámetro integral que reúne una variedad de datos de monitoreo de condición para indicar el estado general (de salud) de un transformador (2023 pág. 52).

De la misma forma a nivel técnico la investigación tiene soporte en teorías como la teoría de la Tensión Interfacial, como característica mecánica eléctrica del componente evaluado, en este caso específico de la investigación, el aceite dieléctrico.

En el aspecto matemático la presente investigación está delimitado por la teoría de Conjuntos Difusos, más conocido como Lógica Difusa, que de acuerdo a la detallado por D`Negri, y De Vito, la lógica difusa en contraposición a la lógica binaria que admite dos posibilidades, sea verdadero o falso, la Lógica Difusa es una forma de lógica multivariada que intenta cuantificar la incertidumbre” (2006 pág. 128).

1.5.2 Delimitante Temporal

La presente investigación se considera los análisis de aceite dieléctrico a transformadores de potencia de la UN Huancayo de la empresa Electrocentro realizados el año 2021.

1.5.3 Delimitante Espacial

El proyecto de investigación se desarrolla en la Unidad de Negocio Huancayo, dichas subestaciones se encuentran en la provincia de Huancayo y alrededores, dentro de la concesión de la empresa Electrocentro.

Figura 1.2 Distritos de la provincia de Huancayo



Fuente: Tomado de la web FamilySearch (2023).

Los distritos en los cuales se ubican las subestaciones de potencia de la UN Huancayo de la empresa Electrocentro son El Tambo, Huayucachi, Huancayo y Chongos Alto.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes Internacionales

El autor Rodríguez (2018) en su Tesis de investigación para la obtención de su maestría en ingeniería énfasis en mantenimiento “Evaluación de la salud de activos de los transformadores de Potencia de las subestaciones del área metropolitana del Valle de Aburrá” formula el índice de salud de activos para TP en el cual describe sus componentes, las consideraciones de vida útil, factores de degradación y los métodos de diagnóstico utilizados.

Teniendo en consideración los resultados de pruebas que tiene como disponibles el DGA y pruebas Físico Químicas del aceite dieléctrico.

Los autores Montane, Hernández y Del Castillo (2021) en su artículo titulado “**Acercamiento al cálculo de índice de salud de transformadores de fuerza en Cuba**”, con objetivo principal de comprobar la metodología de IS de transformadores de fuerza desarrollada por el autor basado en distintos parámetros como pruebas eléctricas, nivel estructural, análisis de aceite y aterramientos. El estudio aplico el análisis de aceite como uno de los parámetros más importantes para la medición de la condición de los TP, dándole el valor más alto al DGA.

Los autores Tariacuri, Aponte y Cadavid (2020) en su artículo “**Índice de salud para transformadores de potencia usando el análisis de gases disueltos y 2-FAL**” que tuvo como objetivo general la implementación de una metodología para la obtención del índice de salud a partir de los resultados de análisis de gases disueltos y contenido de furanos para la clasificación de la condición de los TP. En este artículo se compara los dos resultados de cada uno de los análisis, teniendo como resultado un parecido en la clasificación de los TP, pero la diferencia es en los TP`s con condición aceptable y mala, donde cambia los porcentajes de pertenencia. Teniendo en DGA 19,05% “Aceptables” y 14,29% “Malos”, que mientras el análisis de furanos 23,81% “Aceptables” y 9,52% “Malos”

2.1.2 Antecedentes Nacionales

El autor Párraga (2019) en su tesis para la obtención del grado de Maestro en ciencias, con mención en sistemas eléctricos de distribución “**El índice de salud y su influencia en la gestión del ciclo de vida de los transformadores del sistema eléctrico de la mina Cobreza**” plantea la influencia del índice de salud en la gestión del ciclo de vida de los transformadores del sistema

eléctrico de Cobriza, teniendo en cuenta la influencia de los modos de falla, el proceso de degradación del sistema aislante y la aplicación de lógica difusa, en el ciclo de vida del activo en cuestión. En la tesis se utiliza como uno de los parámetros la degradación del sistema aislante, el cual está representado por el aceite dieléctrico, tanto pruebas como diagnóstico que se realizan al respecto de esta parte importante del TP.

Los autores Castillo y Robles (2022) en su tesis **“Evaluación del índice de salud integral basado en sistemas difusos para la gestión del mantenimiento del transformador de distribución de la subestación eléctrica de la sede central SUNAT”** aplican una metodología de sistemas difusos para calcular el IS integral de un TP, en el cual uno de los parámetros más importantes y de gran impacto son los resultados de los análisis de aceite, apoyándose en las normas técnicas como IEEE C57.104 y IEEE C57.106, para la determinación de límites admisibles del parámetro mencionado.

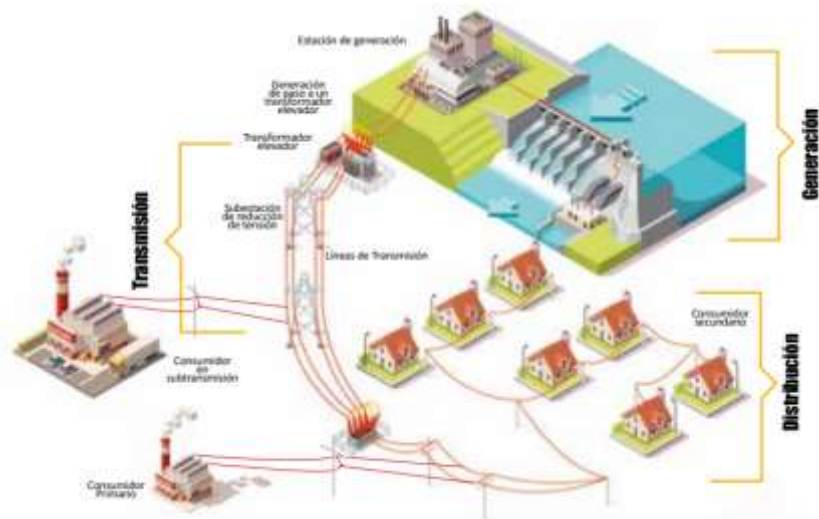
Los autores Mario Bernabe y otros (2019) en su paper **“Lógica difusa y conocimiento experto en la gestión del ciclo de la vida de transformadores de potencia en la mina cobriza”** que tiene como principal objetivo saber la condición de los transformadores que se encuentran tanto en superficie como en el interior de la mina Cobriza, tomado como herramienta de evaluación la herramienta Fuzzy Logic de MathLab, la cual usando sistemas difusos, busca encontrar un índice de salud del activo y vida remanente, considerando parámetros tales como el contenido de agua en el aceite, la acidez, el factor de disipación, el total de gases derivados del petróleo en suspensión y furanos. Estos parámetros son propios del análisis del aceite dieléctrico de los TP.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Cadena de valor de la energía eléctrica en el Perú

La cadena de valor de la energía eléctrica en el Perú comprende una serie de etapas que van desde la generación hasta la distribución y comercialización de la electricidad, tal como especifica la ley de concesiones eléctricas (LCE). “La LCE determino la división de las actividades del sector eléctrico en generación, transmisión, distribución y comercialización” (TAMAYO, y otros, 2016 pág. 105).

Figura 2.1 Cadena de valor de la energía eléctrica.



Fuente: Tomada de GPAE-OSINERGMIN (2016).

- **Generación**

En esta etapa, se produce la electricidad a partir de diversas fuentes de energía, como hidroeléctrica, termoeléctrica, eólica, solar, entre otras. En Perú, la generación eléctrica se realiza mayormente a partir de recursos hidroeléctricos, térmicos y en menor medida, de otras fuentes renovables.

- **Transmisión**

Una vez que la electricidad es generada, debe ser transportada a largas distancias desde las plantas generadoras hasta los centros de consumo. Esto se logra a través de líneas de transmisión de alta

tensión, que pueden abarcar largas distancias y conectarse a través de subestaciones de potencia.

- **Distribución**

En esta etapa, la electricidad se reduce a voltajes seguros para ser distribuida a los consumidores finales, como hogares, comercios e industrias. Las empresas distribuidoras son las encargadas de operar y mantener las redes eléctricas de distribución en las diferentes regiones del país. En Perú, estas empresas operan en diferentes zonas del país, como en Huancayo, Lima, Arequipa, Trujillo, entre otras. Una de las empresas las cuales tiene la concesión de empresa distribuidora es Electrocentro S.A., el cual pertenece a una empresa matriz llamado Grupo Distriluz.

2.2.2 Subestaciones Eléctricas de Potencia (SEP)

Según Linares una SEP, es un nodo de un sistema eléctrico de potencia, dotado de equipos de maniobra los cuales hace posible atender consignas operativas, como atención de fallas y tareas de mantenimiento. (2009 pág. 17). Dependiendo de la finalidad de la subestación tiene diferentes consideraciones, tanto a nivel de tensión eléctrica, cantidad de clientes, tipo de operación, etc.

Figura 2.2 Celda de transformación de una SEP

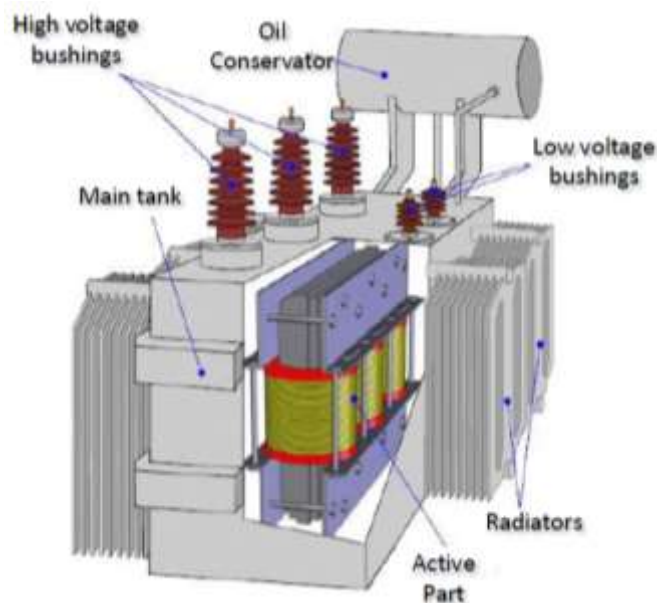


Fuente: Tomado de XISOEM (2022).

2.2.3 Transformador de Potencia (TP)

Los transformadores de potencia son instrumentos eléctricos que se utilizan para transmitir la energía eléctrica de un circuito a otro sin cambiar la frecuencia. Además, sirven para transportar la energía eléctrica entre los generadores y los circuitos primarios de distribución. Su funcionamiento se basa en el principio de la inducción electromagnética. (T&D Electric, 2022).

Figura 2.3 Transformador de potencia y sus componentes



Fuente: Tomado de Univertec (2013).

Se puede observar en la Figura 2.3, la parte activa del TP, es conformada por los bobinados y el núcleo, estos son aislados con papel y aceite dieléctrico, también se observa los radiadores que se encargan de distribuir el aceite por todo el TP.

- Principio de Funcionamiento

El principio fundamental de un TP se basa en la inducción electromagnética. Consiste en bobinas de alambre aisladas eléctricamente, conocidas como bobinas, la mayoría de veces un TP cuenta con dos bobinados, uno de alta tensión y otro de media o de baja tensión, pero hay veces en que los TP cuentan con tres

bobinados, alta, media y baja tensión. Estas bobinas están enrolladas alrededor de un núcleo de hierro laminado.

Cuando la corriente alterna pasa a través de la bobina primaria, crea un campo magnético variable en el núcleo. Este campo magnético variable induce un voltaje en la bobina secundaria.

- Núcleo

Generalmente hecho de láminas de acero al silicio, el núcleo proporciona un camino de baja reluctancia magnética para el flujo de campo magnético generado por las bobinas primaria y secundaria. Las láminas se apilan para reducir las corrientes parásitas, lo que minimiza las pérdidas por corrientes de Foucault y las pérdidas por histéresis.

- Bobinado

Son conductores enrollados alrededor del núcleo. La bobina primaria está conectada a la fuente de energía y la bobina secundaria está conectada a la carga. La relación entre el número de vueltas de la bobina primaria y la bobina secundaria determina la relación de transformación y, por lo tanto, la magnitud de la tensión inducida en la bobina secundaria en relación con la tensión aplicada a la bobina primaria.

- Aislamiento

El aislamiento en un TP es crítico para garantizar un funcionamiento seguro y confiable del equipo. El aislamiento eléctrico se refiere a la separación efectiva de los componentes eléctricos para evitar cortocircuitos y descargas eléctricas, así como para proporcionar resistencia al flujo de corriente no deseada. En un TP, el aislamiento se logra de varias maneras, y uno de los componentes clave es el aceite dieléctrico.

Tabla 2.1 Tipos de aislamientos y sus características

Tipos de Aislamiento	Características
Aislamiento Liquido	Propiedades refrigerantes Aislante eléctrico Proteger papel Extingue arcos Disuelve contaminantes
Aislamiento Solido	Papel, cartón o madera Soporta estrés mecánico, eléctrico Excelente aislante Provee el espacio interno La vida del transformador es la vida del papel

Notas:

1. La vida de un TP es la vida del papel, el papel se sigue usando como medio aislante para transformadores, ya que tiene bajo costo y cuando es impregnado en aceite tiene excelentes propiedades dieléctricas.
2. El aceite además de aislar tiene la propiedad de absorber el calor.

El aislamiento liquido en el transformador de potencia es el aceite dieléctrico, Flores detalla que el papel que es el aislante solido impregnado con aceite se utiliza con gran profusión como aislamiento de los devanados del transformador, por lo cual la industria rige la premisa que, la vida de un transformador es la vida del papel. (2007 pág. 50).

2.2.4 Aceite Dieléctrico

El aceite dieléctrico, tal como lo explica Rincon, el aceite dieléctrico es una mezcla adecuada de hidrocarburos isoparafínicos, nafténicos y aromáticos con moléculas entre 16 y 22 átomos de carbono (2006 pág. 419). Se utiliza principalmente en transformadores de potencia debido a sus excelentes propiedades dieléctricas y su capacidad para disipar el calor generado durante

la operación del equipo. El aceite dieléctrico es un tipo específico de aceite diseñado para cumplir con los rigurosos requisitos de aislamiento y refrigeración en aplicaciones eléctricas.

Las principales características del aceite dieléctrico incluyen:

- Alta resistencia dieléctrica
El aceite dieléctrico debe tener una alta resistencia al paso de corriente eléctrica para evitar cortocircuitos y descargas eléctricas en los equipos eléctricos.
- Bajo factor de disipación dieléctrica
Esto significa que el aceite tiene una baja capacidad para disipar energía en forma de calor cuando se somete a un campo eléctrico, lo que ayuda a mantener una alta eficiencia y estabilidad del sistema eléctrico.
- Buena estabilidad térmica
El aceite dieléctrico debe ser capaz de soportar altas temperaturas sin degradarse, lo que garantiza un funcionamiento seguro y confiable del equipo eléctrico durante largos períodos de operación.

El aceite dieléctrico se somete a rigurosas pruebas y estándares de calidad para garantizar su idoneidad para su uso en aplicaciones eléctricas. Es esencial para el funcionamiento seguro y confiable de los TP, ya que proporciona aislamiento eléctrico, refrigeración y protección contra fallas.

No es objeto de este trabajo el análisis de los otros líquidos aislantes existentes en el mercado, para este caso, solo se hará referencia al aceite dieléctrico de origen mineral.

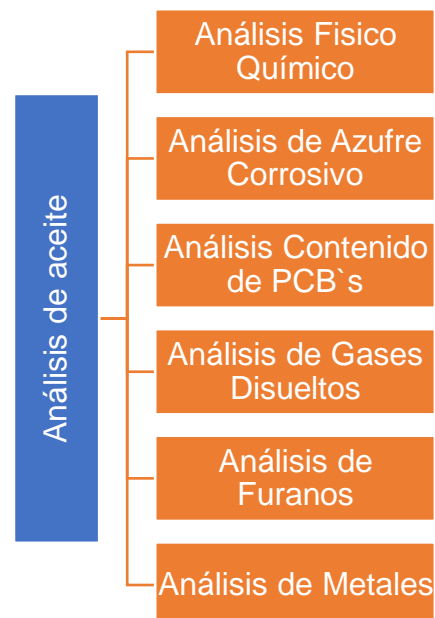
2.2.5 Técnica de Monitoreo y evaluación de condición basado en el Análisis de Aceite mineral

En el marco del mantenimiento predictivo, el monitoreo de la condición basada en el análisis de aceite de los TP está dada por la calidad del aceite dieléctrico y los productos derivados de la propia operación del activo, los cuales nos pueden dar indicios de

acuerdo a su presencia y tendencia de generación, algún tipo de falla emergente que pueda afectar a la futura operatividad confiable del TP, Según Tecsa, El análisis de aceite aislante provee información acerca del líquido, pero también permite la detección de posibles problemas, como arco eléctrico, deterioro del papel aislante y otras fallas latentes. Aunado a ello, esta prueba es parte de un programa de mantenimiento eléctrico que tiene como objetivo reducir costos (2020).

Los análisis más recurrentes al momento de evaluar el aceite dieléctrico son detallados a continuación:

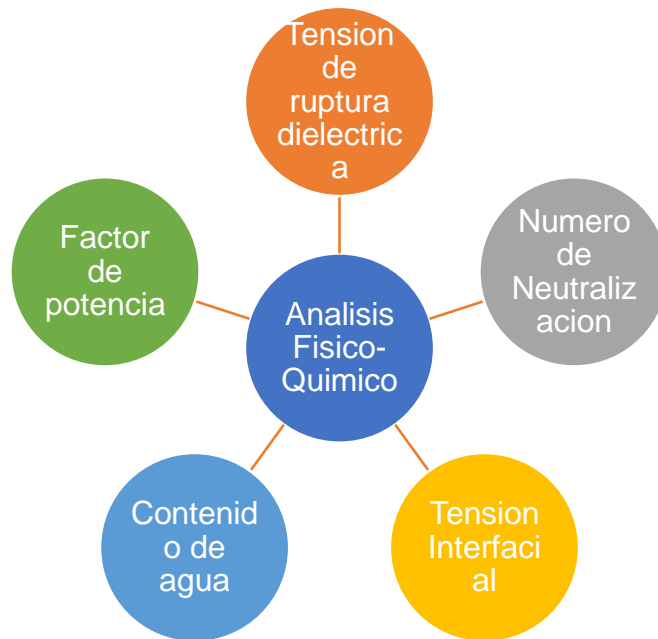
Figura 2.4 Análisis recurrentes al aceite dieléctrico



2.2.6 Análisis Físico-Químico (FQ)

El análisis FQ del aceite es uno de los ensayos más relevantes y resulta determinante a la hora de realizar el diagnóstico de la calidad del aceite. Tiene como finalidad evaluar la condición del papel y aceite mineral, basándose en información de la calidad del aceite y la relación con el papel.

Figura 2.5 Parámetros analizados en el análisis Físico-Químico



Notas

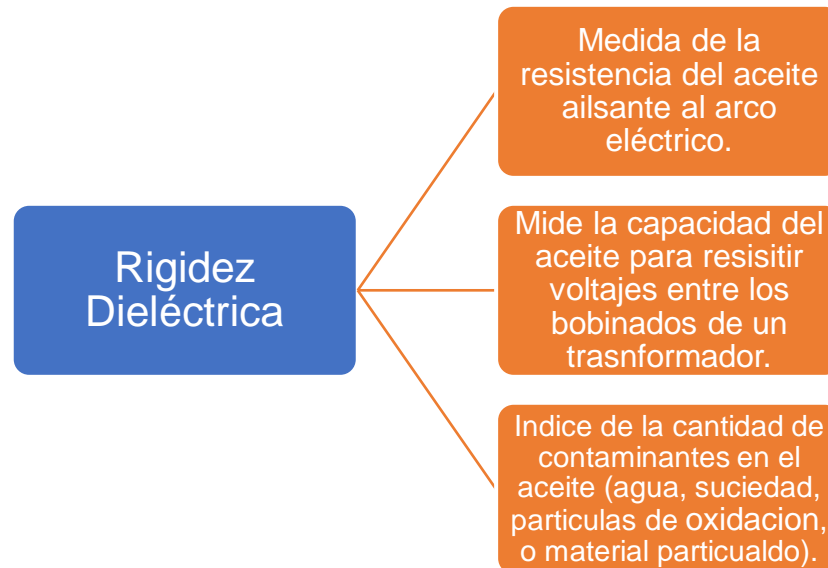
1. En un análisis de aceite, en el apartado de análisis Físico-Químico, se evalúan también características como, examen visual, color, gravedad específica e inhibidor de oxidación.
2. Por motivos de la presente investigación, se ha tomado alguna de las variables en las que consiste el análisis FQ

Por motivos de la investigación, se ha tomado alguna de las variables en las que consiste el análisis FQ.

- **Tensión de Ruptura Dieléctrica**

Según González y otros, las pruebas de rigidez dieléctrica o tensión de ruptura dieléctrica son un método para determinar el valor de tensión disruptiva de aceites aislantes, un dato de suma importancia que indica la presencia de agentes contaminantes que alteran las capacidades dieléctricas de dichos líquidos (2022 pág. 2).

Figura 2.6 Tensión de ruptura dieléctrica (Rigidez Dieléctrica)



La norma que desarrolla la evaluación de esta característica del aceite es la IEEE C57.106 2015, y para el procedimiento de realización de la prueba se realiza bajo las normas de ensayo utilizadas para la rigidez dieléctrica son ASTM D877 y ASTM D1816.

Al momento de hacer la evaluación de acuerdo a la normativa, se recomienda el uso de la norma ASTM D1816, ya que está, es más sensible y se recomienda su uso en aceites que están en operación. Por motivos de la presente investigación se desarrolla los límites admisibles de acuerdo a la norma IEEE C57.106 2015

Tabla 2.2 Límites admisibles de aceite nuevo.

Nivel de Tensión (KV)	Rigidez Dieléctrica 2mm gap (min)
NT ≤ 69	45
69 < NT < 230	55
230 ≤ NT	60

Fuente: (IEEE Power and Energy Society, 2016).

Nota. Estos límites mínimos de aceptación son referidos al aceite nuevo recibido en equipos nuevos o después de ser llenados, antes de la energización.

Dentro de la norma IEEE C57.106 2015 encontramos también los límites admisibles para el aceite mineral que está en operación, el cual será detallada a continuación.

Tabla 2.3 Límites admisibles de aceite en operación

Nivel de Tensión (KV)	Rigidez Dieléctrica 2mm gap (min)
NT ≤ 69	40
69 < NT < 230	47
NT ≥ 230	50

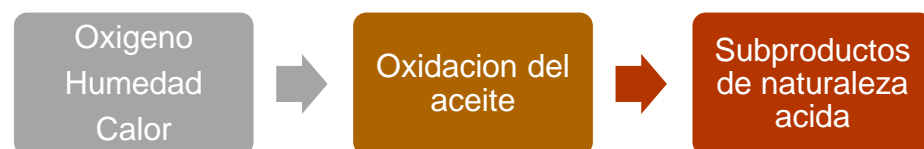
Nota. Los valores de rigidez dieléctrica son referidos al aceite de la cuba, mas no al conmutador bajo carga, para ello existen otros límites admisibles.

- **Numero de Neutralización o Acidez (NN)**

El número, valor o índice de neutralización refiere a la acidez del aceite como una medida de sus componentes ácidos o contaminantes. Según Bonalde La acidez de un aceite usado se debe a la formación de subproductos de oxidación ácidos (2023 pág. 37).

La acidez surge por el deterioro del aislamiento sólido y el aislamiento líquido, es decir por el deterioro del papel y el aceite, este deterioro ataca a las partes metálicas y la celulosa formando lodos. Los ácidos generados aceleran el deterioro del aceite y del papel.

Figura 2.7 Proceso de generación de subproductos ácidos



Nota. Los ácidos de igual manera que daña el aislamiento sólido, formando lodos, también puede ser responsable de la corrosión de piezas metálicas del TP.

Debemos tener la consideración que la presencia de ácidos en aceite nuevo, es probable que sea residuo del proceso de refinado del propio.

Para la medición del NN se utiliza el Hidróxido de Potasio (KOH). El KOH es una sustancia base alcalina que, para objeto de la medición de la acidez, cada miligramo de KOH necesario para neutralizar la acidez de un gramo de aceite (mg KOH/g). Estándares internacionales utilizados son IEC 60422, ASTM D974 y ASTM D664; el estándar ASTM D974 es el método tradicional de indicador de cambio de color que consiste en valorar los ácidos con una solución de KOH.

Tabla 2.4 Límites máximos sugeridos para el NN

Nivel de Tensión (KV)	Numero de Neutralización (mg KOH/g máx.)
NT ≤ 69	0.20
69 < NT < 230	0.15
NT ≥ 230	0.10

Nota. Existen más límites admisibles de acuerdo a la norma IEEE C57.106 para diferentes momentos del aceite en su ciclo de vida:

- Límites de prueba para envíos de aceite mineral nuevo recibidos del proveedor de petróleo
- Límites de prueba para aceite mineral nuevo recibido en equipos nuevos o después del llenado, antes de la energización
- Límites de prueba sugeridos para aceite mineral reacondicionado o recuperado en transformadores y reactores después del llenado, pero antes de energizar.

En algunos líquidos envejecidos, el color puede ser tan oscuro que impida al técnico determinar el cambio de color del indicador en la norma ASTM D-974, por lo que la norma ASTM D-664 es un método de valoración potenciométrica (IEEE Power and Energy Society, 2016).

- **Tensión Interfacial (TT)**

La tensión interfacial es un ensayo mecánico que nos brinda una importante información desde el punto de vista químico, para conocer el estado de pureza o inicio de envejecimiento de un aceite mineral dieléctrico (Transequipos S.A., 2021).

El fenómeno de tensión interfacial surge de las fuerzas de atracción entre moléculas de aceite dieléctrico y agua, indicando la presencia de contaminantes polares solubles y productos de oxidación. Esta tensión disminuye con la contaminación.

La norma recomendada para el muestreo y en lo cual se tiene los resultados de muestreo de aceites la norma ASTM D971.

Tabla 2.5 Limites mínimos de TI

Nivel de Tensión (KV)	Tensión Interfacial (mN/m. min)
$NT \leq 69$	25
$69 < NT < 230$	30
$NT \geq 230$	32

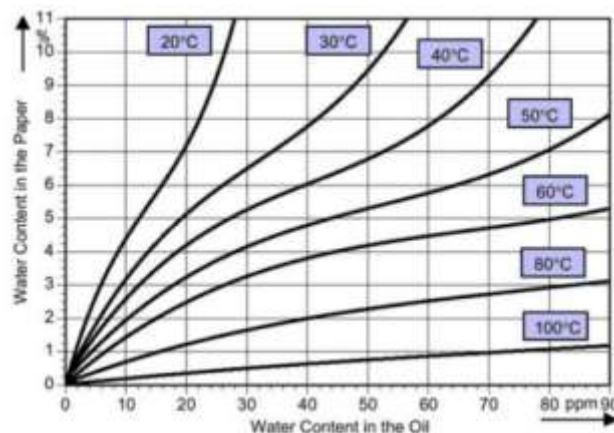
Nota. Los valores de TI son de la tabla N°3 de la norma IEEE C57.106, en la cual estos valores son de aceite en operación.

La tensión interfacial es directamente proporcional al nivel de tensión, en este caso se considera de acuerdo a la norma IEEE C57.106 2015 en tres rangos de nivel de tensión.

- Contenido de Agua

Este método de prueba describe la determinación de agua presente en aceites por titulación coulométrica Karl Fischer (Chemicoil R&D, 2020).

Figura 2.8 Curva de equilibrio humedad en el aceite y T⁰ de papel



Fuente: Tomado del artículo "Determination of Probability of Failure of Power Transformers using Statistical Analysis" (2015).

El agua presente en el aceite mineral tiene un efecto negativo en los transformadores, ya que degrada el aislamiento sólido, corroe el metal, reduce la tensión de ruptura y aumenta las pérdidas dieléctricas. La humedad se acumula en el papel del aislamiento sólido y migra al aceite, especialmente en condiciones de alta temperatura. La cantidad de agua en el aceite, papel y temperatura están interrelacionadas. La humedad puede ingresar al transformador a través de respiraderos o juntas con fugas durante la instalación y reparaciones, y el envejecimiento del sistema de aislamiento aumenta su concentración. El agua puede encontrarse disuelta en el aceite, en forma de emulsión o libre en el tanque, e incluso como hielo en el fondo del tanque.

Tabla 2.6 Límites máximos admisibles de Contenido de Humedad

Nivel de Tensión (KV)	Contenido de Agua (ppm)
NT ≤ 69	35
69 < NT < 230	25
NT ≥ 230	20

Fuente: Tomado de la tabla 3 de la norma IEEE.57.106 (2015)

El contenido de humedad dentro de los transformadores es un indicador relevante, ya que el agua hace que el aceite dieléctrico pierda su condición dieléctrica paulatinamente. Los límites descritos en la Tabla 2.9, son límites máximos admisibles de acuerdo a la norma IEEE C57.106(2015).

- **Factor de Potencia (FP)**

La medición del factor de potencia a 25°C y 100°C proporciona una evaluación integral de la calidad del aceite de transformador. La comparación de los factores de potencia a estas dos temperaturas ayuda a identificar y diferenciar entre contaminantes presentes y productos de degradación, ofreciendo una visión completa del estado dieléctrico del aceite.

Tabla 2.7 Límites máximos de FP a 25°C y 100°C

Nivel de Tensión (KV)	Factor de Potencia (% 25°C)	Factor de Potencia (% 100°C)
NT ≤ 69	0.5	5.0
69 < NT < 230	0.5	5.0
NT ≥ 230	0.5	5.0

Fuente: Tomado de la tabla 3 de la norma IEEE.57.106 (2015).

Diferencia entre el factor de potencia a 100°C y 25°C se da por dos conceptos, la sensibilidad a la temperatura y detección de contaminantes y productos de degradación.

Tabla 2.8 Diferencia entre FP 25°C y 100°C

Conceptos	Factor de Potencia 25°C	Factor de Potencia 100°C
Sensibilidad a la temperatura	medida del estado dieléctrico del aceite en condiciones cercanas a las ambientales.	Mide lo que no es sensible a temperatura ambiente y se acerca a condiciones de operación
Productos detectables	Un factor de potencia bajo (típicamente menos del 0.1%) indica que el aceite está en buen estado. Si el factor de potencia es alto, puede indicar la presencia de contaminantes como agua, ácidos o partículas conductoras.	Detecta los mismos contaminantes, pero, con la diferencia de temperatura son los presentes en operación

Nota. La evaluación del Factor de Potencia a diferentes temperaturas esta normada bajo la misma norma ASTM D924.

2.2.7 Análisis de gases disueltos (DGA)

Según Julio Castillo y Lavoissier Robles, El DGA es una técnica que, mediante el análisis del nivel de concentración de los gases combustibles que se disuelven en el aceite, su tasa de incremento y las relaciones en que estos se generan, permite detectar fallas iniciales en transformadores con aislamiento líquido (2022 pág. 41)

Figura 2.9 Toma de muestra de aceite de transformador



Fuente: Tomado de "Implicaciones de la toma de muestras en el análisis de gases disueltos" de Transequipos S.A (2021).

Es una técnica para el diagnóstico temprano de fallas de transformadores, sin necesidad de desenergizar, esto lo hace una técnica no invasiva. Esta técnica requiere muestreo rutinario de aceite.

- Generación de gases

Los esfuerzos eléctricos o térmicos anormales causan la descomposición del aceite aislante y liberan pequeñas cantidades de gases.

Tabla 2.9 Energía requerida para romper los hidrocarburos

Tipo de temperatura	Gas disuelto generado	Energía necesaria para la generación
Baja	Hidrogeno (H ₂)	338 KJ/mol
Temperatura (±120°C)	Metano (CH ₄)	338 KJ/mol
	Etano (C ₂ H ₆)	607 KJ/mol
	Etileno (C ₂ H ₄)	720 KJ/mol

Alta	Acetileno (C ₂ H ₂)	960 KJ/mol
Temperatura		
(±700°C)		

Fuente: Tomado de la conferencia (Life of transformer, 2008)

Según la conferencia "Life of transformer" hecha por la empresa DILLO, remarco que Las fallas de baja energía como descargas parciales y efecto corona, favorecen la ruptura de enlaces H-H, y C-H, que son los más débiles (338 KJ/mol), por ionización fundamentalmente, en donde el H₂ es el principal gas de recombinación. Para romper los enlaces C-C se requiere más energía (607 KJ/mol), para dobles enlaces C=C (720 KJ/mol), y para triples enlaces CH=CH (960KJ/mol). (2008).

La composición de estos gases depende del tipo de falla. La detección de cierto nivel de gases generados en transformadores en servicio es a menudo la primera indicación disponible de un mal funcionamiento que puede causar una falla del transformador si no se corrige. Los posibles mecanismos de generación de gas incluyen arqueo, descarga de corona, arcos de baja energía, sobrecalentamiento del aislamiento debido a sobrecargas severas y falla de sistemas de enfriamiento forzado. Las fallas en TP pueden identificarse según los gases generados y los gases que son típicos o predominantes a diversas temperaturas.

Tabla 2.10 Gases en la cromatografía de gases

Parámetros	Formula Química	Unidad de medición
Hidrogeno	H ₂	
Metano	CH ₄	
Etano	C ₂ H ₆	Partes por millón
Etileno	C ₂ H ₄	(ppm)
Acetileno	C ₂ H ₂	
Monóxido Carbono	CO	

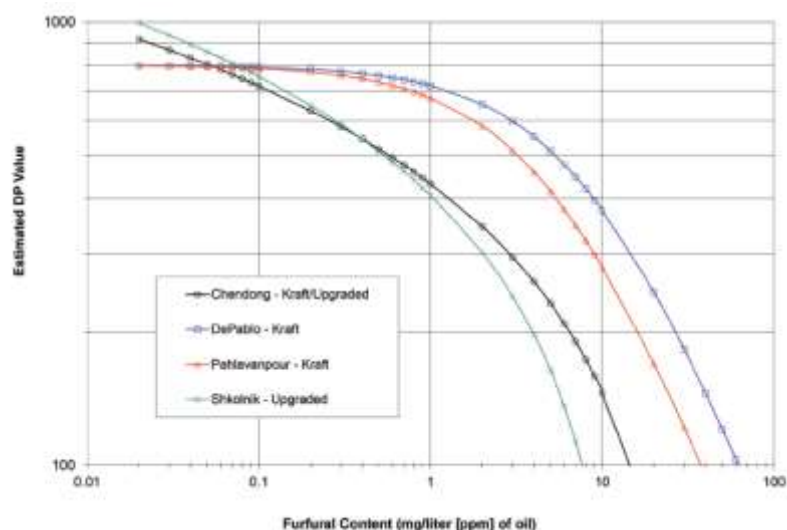
Dióxido Carbono	CO ₂
Nitrógeno	N ₂
Oxígeno	O ₂

2.2.8 Análisis de contenido de Furanos

Según la norma técnica IEEE C57.140 2017, El método de análisis de la condición de los transformadores implica la medición de compuestos furánicos en el líquido aislante de los transformadores y relaciona el contenido furánico con el grado de polimerización del papel aislante y la vida útil restante del aislamiento. (2017).

Existen diferentes estudios del análisis de contenido de furanos y su relación con la vida útil restante del aislamiento, de los cuales la determinación de usar uno u otra, está dado por el tipo de papel de fabricación del transformador.

Figura 2.10 Correlación de contenido de furanos vs grado de polimerización



Fuente: Tomado de la norma (IEEE Standards Association, 2017 pág. 30)

El deterioro de la estructura química del papel como consecuencia de una mayor temperatura de operación del transformador y un alto contenido de humedad, disminuye el grado de polimerización (DP)

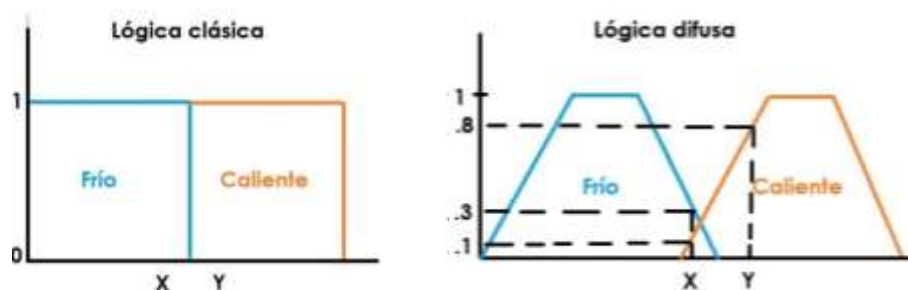
lo cual es proporcional a un mayor contenido de compuestos furánicos disueltos en el aceite, especialmente del compuesto 2-furaldehído cuya proporción es más del 90% comparada con la de los demás furanos. El contenido de 2-furaldehído (2-FAL) se considera el factor más importante en la evaluación de la salud del transformador, ya que evalúa directamente la salud del aislamiento sólido (papel) (US ARMY CORPS OG ENGINEERS, 1998).

2.2.9 Lógica Difusa

Como se ha observado a lo largo del desarrollo de las bases teóricas para el análisis de la condición de un transformador a partir de su análisis de aceite. Los criterios de límites admisibles y la determinación de que es bueno, malo, regular, observado, etc. Difiere mucho de experto a experto, ya que, cada condición es distinta. En este contexto que no se puede encontrar precisión se desarrolla el concepto de lógica difusa.

Según Zadeh La lógica difusa, es una lógica que permite llegar a conclusiones “razonadas” a partir de información ambigua o imprecisa (1971 pág. 656). El gran aporte de la lógica difusa, es que permite modelar situaciones o comportamientos que son ambiguos, es decir, se adapta mejor a la realidad que una lógica clásica, en donde solo existen dos valores a decidir.

Figura 2.11 Diferencias entre conjuntos de lógica clásica y lógica difusa



Fuente: Tomado de UNAM Cuautitlán Virtual (2018).

La mente humana no sigue un patrón estricto de lógica clásica; en cambio, analiza el entorno considerando diversas variables y sus ponderaciones antes de tomar decisiones. Es por eso que la lógica difusa resulta más idónea para replicar este proceso mental, ya que permite manejar la incertidumbre y la imprecisión de manera más efectiva.

2.2.10 Funcionamiento de un control difuso

Un sistema de control difuso a comparación de un sistema de control normal, la Lógica difusa no necesita un modelo matemático que describa el comportamiento, no necesita linealizarlo y tampoco necesita una aproximación del modelo.

Figura 2.12 Estructura básica de un sistema de inferencia difuso




Fuente: Tomado de paper “Integración de la lógica difusa a la dinámica de sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas” de Martínez y Andrade (2016 pág. 154).

Los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos; la teoría clásica de conjuntos solo contempla la pertenencia o no pertenencia de un elemento a un conjunto, sin embargo, la lógica difusa considera que un conjunto no tiene una frontera clara que permita decir si un elemento pertenece o no a él. Mediante una función asigna a cada elemento del conjunto un grado de pertenencia entre 0 y 1. Este

grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso.

La única condición que debe cumplir una función característica es que tome valores entre 0 y 1, con continuidad. Conceptualmente existen dos aproximaciones para determinar la función característica asociada a un conjunto, la primera es una aproximación basada en conocimiento de expertos y la segunda aproximación es utilizar una colección de datos para diseñar la función.

Tabla 2.11 Conceptos básicos de la lógica difusa

Concepto	Descripción	Ejemplo
Variable Lingüística	Es aquella noción o concepto que vamos a calificar de forma difusa	Altura
Universo de discurso	Es el rango de valores que pueden tomar los elementos que poseen la propiedad expresada por la variable lingüística	Conjunto de valores comprendido entre 1,5 y 2,3 m.
Valor Lingüístico	Son las diferentes clasificaciones que efectuamos sobre la variable lingüística	“Bajo”, “Mediano” y “Alto”.
Función de pertenencia	Aplicación que asocia a cada elemento de un conjunto difuso el grado con que pertenece al valor lingüístico asociado	

Fuente: Tomado de paper “Integración de la lógica difusa a la dinámica de sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas” de Martínez y Andrade (2016 pág. 153)

2.2.11 Base de conocimiento

- Base de reglas: Una regla difusa if-then, es una regla del tipo si X es A entonces Y es B. En donde A y B son etiquetas lingüísticas definidas en sus respectivos universos X e Y. La parte si X es A es el antecedente, y es B el consecuente.
- Base de datos: Contiene la definición lingüística de las variables.

2.2.12 Mecanismo de inferencia

Cada regla interpretada como una implementación difusa, relaciona los conjuntos de entrada y salida para representar las reglas que definen el sistema, utilizando la información de la base de conocimiento para generar reglas mediante el uso de condiciones. Consiste en tres componentes conceptuales.

- Reglas difusas
- Diccionario (con funciones de pertenencia)
- Mecanismo de raciocinio

Además, en sistemas con entradas y/o salidas nítidas:

2.2.13 Interfaz de Fuzzificación

Toma valores numéricos provenientes del exterior y los convierte en valores "difusos" que pueden ser procesados por el mecanismo de inferencia. Dentro de este proceso se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos. Estos valores difusos son los niveles de pertenencia de los valores de entrada a los diferentes conjuntos difusos en los cuales se ha dividido el universo de discurso de las diferentes variables de entrada al sistema.

2.2.14 Interfaz de Defuzzificación

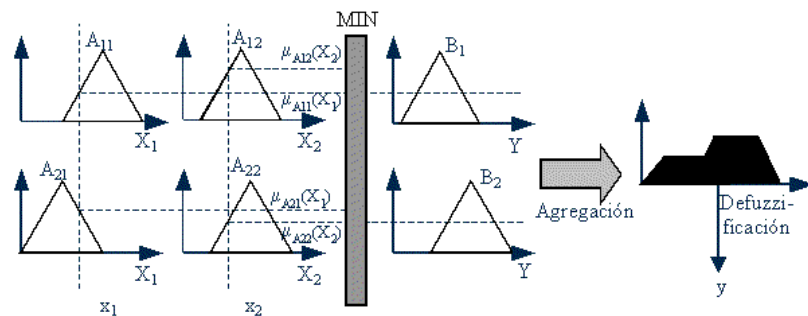
Realiza el proceso de adecuar los valores difusos generados en la inferencia de valores utilizados en el proceso de control.

Realización de métodos matemáticos simples mediante los cuales obtenemos un valor concreto de la variable de salida.

2.2.15 Sistema difuso tipo Mandani

El sistema difuso de Mandani es más adecuado cuando las reglas del sistema experto se expresan de manera lingüística y se basan en la experiencia humana. Funciona bien en sistemas donde se requiere lógica difusa para mapear entradas a salidas mediante reglas if-then.

Figura 2.13 Sistema difuso Mandani procesamiento detallado.



Fuente: Tomado de Fuzzy Intro de Jesus Alfonso (2003).

En el sistema difuso Mandani, la forma de defuzzificación está dada por agregación, donde se intercepta de acuerdo a las reglas establecidas las áreas coincidentes, de aquella área coincidente se tiene resultado una gráfica dada por agregación, de la cual, para determinar el resultado, se calcula el centroide

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Índice de Salud para transformadores de potencia (IS)

El índice de salud de activos es una calificación del activo, que está diseñada, de alguna manera, para reflejar o caracterizar el estado de la condición, por lo tanto, permite conocer la capacidad de seguir cumpliendo con el rol establecido por la organización (Choquet Integral Capacities-Based Data Fusion for System Health Monitoring, 2012).

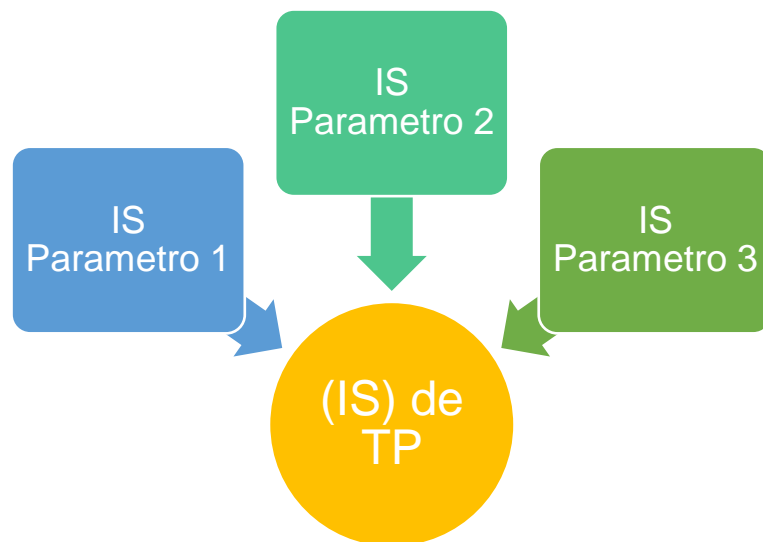
La mayoría de los activos, están compuestos por múltiples subsistemas, y cada subsistema puede caracterizarse por diferentes modos fallo y modos de degradación. En general, se puede considerar que un activo ha llegado al final de su vida útil, cuando varios subsistemas han alcanzado un estado de deterioro que impide la continuidad de ofrecer el servicio requerido por la organización.

- Parámetros del IS

Los parámetros del IS son las variables a evaluar, y las cuales determinan cierta característica de fabricación, desgaste por operación, característica de operación el activo evaluado, etc.

Estos parámetros deben poder ser clasificables o medibles con el fin de tener una clasificación de la importancia de estos. Esta importancia que se le pueda dar a un parámetro debe de estar reforzada de un expertiz o investigación correctamente detallada del porqué de la clasificación.

Figura 2.14 Parámetros del IS de TP del proyecto de investigación



Los parámetros de clasificación son desarrollados por normas internacionales, que reúnen bibliografía y experiencias tanto de empresas como de investigadores especialistas en el tema. En el

caso de la presente investigación se tomará de referencia las normas IEEE C57.104, IEEE C57.106 y IEEE C57.140.

- Estimación del IS

La determinación del Índice de salud tiene consigo la determinación de los pesos y puntuaciones para los índices de los parámetros son extremadamente importantes y generalmente se requiere de sustento emitido por normas pertinentes, expertos en el tema e investigaciones relacionadas a los parámetros evaluados.

La estimación del IS se consideran los parámetros elegidos para el desarrollo del mismo, el cual es un ponderado, en el cual se tiene la siguiente característica.

$$IS = A_1 \times IS(\text{parametro } 1) + A_2 \times IS(\text{parametro } 2) \quad (2.1)$$

A_1 o A_2 : Porcentaje de valor del parámetro

$IS(\text{Parámetro})$: Es el IS de cada parámetro evaluado de manera unitaria.

El porcentaje de importancia o peso de cada parámetro es bajo un criterio basado en la experiencia y en la importancia del parámetro dentro del ciclo de vida del activo.

El índice de cada parámetro evaluado, está dado por el valor o puntuación del índice de condición de cada sub parámetro (S_i) y el peso que se le asigna a cada sub parámetro (W_i), que conforma el parámetro.

$$IS(\text{parametro}) = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2.2)$$

Este índice indica la condición de cada parámetro evaluado, que resulta ser un ponderado de la condición de sub parámetro y el peso asignado a cada sub parámetro.

- Clasificación del IS

El IS tiene como propósito brindar como resultado la información de condición del activo. La clasificación de la condición es a criterio del autor que desarrolla la herramienta, ya que los IS debe de estar dado por rangos, los cuales sean traducidos a una cualidad de condición.

Tabla 2.12 Clasificación del IS de acuerdo al valor

Rangos de valor del IS	Clasificación de acuerdo al valor
$0 < IS \leq 0.2$	Muy Bueno
$0.2 < IS \leq 0.4$	Bueno
$0.4 < IS \leq 0.6$	Observado
$0.6 < IS \leq 0.85$	Malo
$0.85 < IS \leq 10$	Muy malo

2.4 Definición de términos básicos

2.4.1 Índice de Salud

Según Kirylchik el índice de salud es la clasificación cuántica de la condición de un activo a partir de parámetros característicos del activo (2023 pág. 29).

2.4.2 Análisis de aceite

Para Enel X, El análisis de aceite es un conjunto de pruebas para determinar la calidad química del aceite, el porcentaje de agua y el grado de impregnación de productos de oxidación en el papel aislante (2022)

2.4.3 Diagnóstico de gases disueltos

Según Crespo el diagnostico de gases disueltos es el análisis de los gases de descomposición generados por la propia operación del TP, disueltos en el aceite dieléctrico (2015 pág. 180).

2.4.4 Análisis Físico Químico

Tal como lo desarrolla Cholota, el análisis Físico Químico es el conjunto de ensayos que brinda información más detallada respecto de lo que ha sucedido o puede suceder a medida que el transformador está en operación (2017 pág. 19).

2.4.5 Rigidez Dieléctrica

Según Lantos “La rigidez dieléctrica es la tensión a la cual el aceite permite la formación de un arco”. (2010 pág. 7). Permite medir la resistencia del aceite a arcos o descargas eléctricas dentro del transformador.

2.4.6 Tensión Interfacial

Según lo elaborado por Terradillos “La tensión interfacial es un indicador tan temprano de la degradación de un aceite” (2003 pág. 13). En términos simples, es la fuerza con la que el aceite dieléctrico de un transformador eléctrico "se adhiere" a las superficies sólidas o a otros líquidos con los que entra en contacto.

2.4.7 Factor de Potencia

El factor de potencia del aceite dieléctrico en un TP es una medida de la capacidad del aceite para resistir la pérdida de energía en forma de calor cuando se aplica un campo eléctrico. En otras palabras, indica la eficiencia del aceite dieléctrico para transmitir y distribuir la energía eléctrica sin disipar una cantidad excesiva de calor.

2.4.8 Lógica Difusa

Según Ruvalcaba la lógica difusa es un tipo de lógica multivaluada que permite modelar el razonamiento impreciso y la incertidumbre de manera más cercana a cómo lo hace el pensamiento humano (2015 pág. 243). Su flexibilidad para modelar situaciones con información incompleta o inexacta la hace muy útil en contextos donde las variables son difíciles de definir con precisión.

III. HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

De acuerdo a la naturaleza del proyecto de investigación, el cual tiene un enfoque cuantitativo y con nivel de investigación descriptiva, la cual hace que el presente proyecto de investigación no cuente con hipótesis.

3.2 Operacionalización de variable

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Índice	Método	Técnica
Índice de salud de activo (IS)	La Salud de Activos es una estrategia de gestión de activos basada en la condición (Urquijo Pastrana, 2020)	Cuantificación de la degradación a partir de parámetros establecidos del responsable	Parámetros del índice de salud	<p>Análisis de gases disueltos (DGA)</p> <hr/> <p>Análisis Físico Químico (FQ)</p> <hr/> <p>IS FQ</p> <hr/> <p>IS DGA</p> <hr/> <p>IS PAPEL</p>	<p>Hidrogeno; Metano Etano; Etileno; Acetileno; Monóxido de Carbono; Monóxido de Carbono; Nitrógeno; Oxígeno.</p> <hr/> <p>Contenido de Agua; Tensión Interfacial; Índice de Neutralización; Tensión de Ruptura Dieléctrica; Factor de Potencia</p> <hr/> <p>0-15(Bien); 15-30(Aceptable); 30-45(Observado); 45-60(En falla)</p> <hr/> <p>0-12.5(Bien); 12.5-25(Aceptable); 25-37.5(Observado); 37.5-50(En falla)</p> <hr/> <p>0-7.5(Bien); 7.5-15(Aceptable); 15-22.7(Observado); 22.7-30(En falla)</p>	Cuantitativo	Análisis de documentos

Clasificación	Muy Bueno	$0 < IS \leq 0.2$
del índice de	Bueno	$0.2 < IS \leq 0.4$
salud	Observado	$0.4 < IS \leq 0.6$
	Malo	$0.6 < IS \leq 0.85$
	Muy Malo	$0.85 < IS \leq 10$

IV.METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1 Diseño metodológico.

4.1.1 Tipo de Investigación

La presente investigación se desarrolla un tipo de investigación aplicada, ya que se desarrolla una aplicación práctica, en este caso un índice de salud aplicado a un caso en específico.

Según Lozada “La investigación aplicada busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo” (2014 pág. 23) .

4.1.2 Enfoque de Investigación

El IS es un número el cual es resultado de una ponderación a partir del conocimiento, para darle una clasificación de una condición a un activo. Por este motivo, el presente proyecto de investigación tiene un enfoque cuantitativo. “El enfoque cuantitativo fue diseñado para investigar fenómenos que pueden ser medidos o cuantificados con exactitud” (Lifeder, 2022).

4.1.3 Nivel de Investigación

La presente tesis de investigación busca clasificar la condición de los TP basado en el análisis de aceite con el uso de lógica difusa. Según Rus “Una investigación descriptiva se enfoca en describir y clasificar las características de lo que se está estudiando, sin buscar entender las causas subyacentes de estas características” (2021).

En base a la referencia mostrada, la presente investigación tiene un nivel de investigación descriptiva, ya que busca describir y clasificar la condición del activo, mediante un IS.

4.1.4 Diseño de Investigación

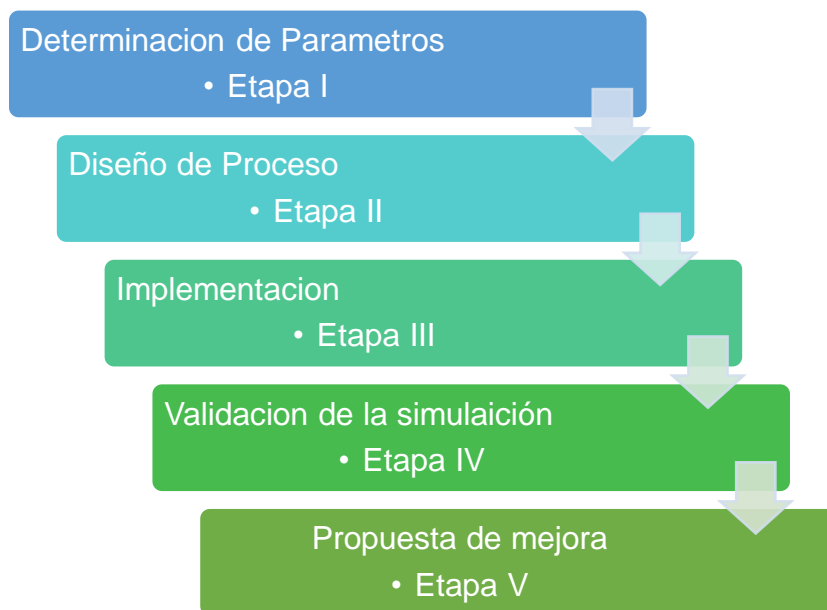
Según Ricardo, la investigación no experimental es la etiqueta que se le da a un estudio cuando un investigador no puede controlar,

manipular o alterar la variable predictora o los sujetos, sino que se basa en la interpretación, la observación o las interacciones para llegar a una conclusión (2020). Es por ello que el presente proyecto de investigación tiene un diseño No experimental. Ya que no existe una manipulación de la variable.

4.2 Método de investigación.

Uno de los modelos de desarrollo de software es el modelo de Cascada, la cual según Stsepanets. El modelo de cascada es un método en el que el proyecto se divide en distintas fases secuenciales, donde el equipo puede pasar a la siguiente fase sólo cuando se haya completado la anterior (2024).

Figura 4.1 Etapas del desarrollo del proyecto de investigación



4.2.1 Etapa 1 Determinación de parámetros

Esta es la etapa inicial del desarrollo de la metodología, ya que, se comenzó con los datos técnicos necesarios de los TP, la determinación de los parámetros a medir para el IS del TP, también se estableció el tipo de sistema difuso y función de pertenencia a emplear de acuerdo a la necesidad y por último la ecuación de pertenencia para la evaluación.

4.2.2 Etapa 2 Diseño de Proceso

Ya teniendo los valores de los parámetros IS(DGA), IS(FQ) y IS(2-FAL), se continuo con la Fuzzificación de dichos valores, teniendo en cuenta los rangos o limites admisibles de cada una de las variables.

También se definió los puntos de la función de membresía de los IS. Ya teniendo los rangos de cada uno de los parámetros, procederemos a definir los puntos de la función de membresía de la función trapezoidal.

4.2.3 Etapa 3 Implementación y programación en Matlab

En esta actividad se calculó cada uno de los sub índices IS(DGA), IS(FQ) y IS(Papel). Recolectamos la información de los valores de cada parámetro a cada sub índice.

Luego se abarco todo lo concerniente al entorno de programación en Matlab, basado en los conceptos y definiciones de parámetros desarrollados en la etapa anterior.

Luego se desarrolló los parámetros en el entorno de programación Matlab, para esta etapa se utilizará el módulo de Fuzzy Logic en Matlab R2024a.

4.2.4 Etapa 4 Simulación y validación de la simulación

En esta etapa se simulo los valores de los parámetros de ingreso, y se comprobó la funcionalidad de la programación y determinar en cada uno de los TP y su IS. También se validó la simulación con el cálculo del IS de manera tradicional, usando los mismos limites admisibles, pero utilizando los pesos por cada uno de los parámetros.

4.2.5 Etapa 5 Propuesta de mejora

Ya teniendo los valores del índice de salud obtenidos por lógica difusa, se desarrolló propuestas para la mejora del mantenimiento y tener conceptos de inferencia de cada condición

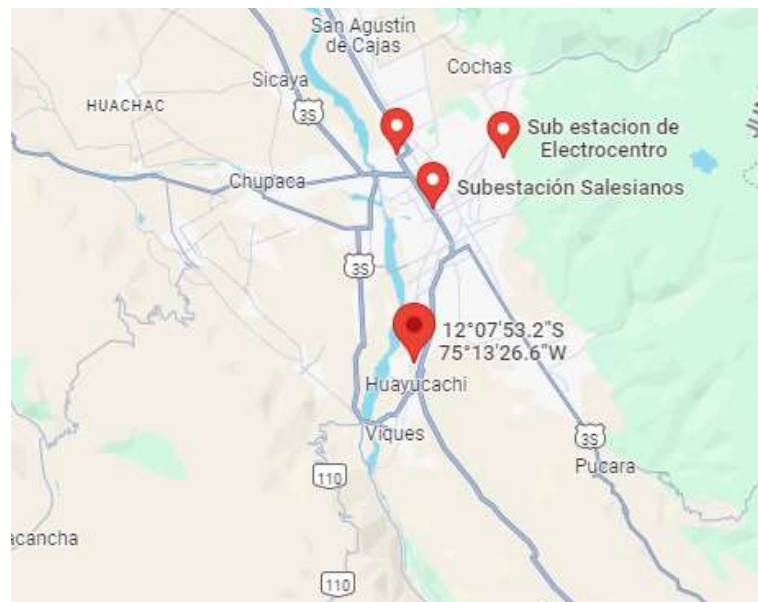
4.3 Población y Muestra

La población y la muestra en la presente investigación son las mismas ya que son los Transformadores de potencia, pertenecientes a la UN. Huancayo de la empresa Electrocentro.

4.4 Lugar de estudio.

La investigación se desarrolla en distintas subestaciones de potencia de la unidad de negocio de Huancayo de la empresa Electrocentro S.A. Dichas ubicaciones se detallan a continuación:

Figura 4.2 Ubicación de SEP de la UN Huancayo



Fuente: Tomado de Google Maps.

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.

4.5.1 Técnica para la recolección de datos

La técnica a utilizada es el análisis de documentos, ya que estos fueron proporcionados por la empresa Electrocentro, la cual, realiza un muestreo de aceite de los TP cada año.

4.5.2 Instrumento para la recolección de datos

El presente proyecto de investigación utiliza informes técnicos del muestreo de aceite dieléctrico de los transformadores de potencia del año 2021.

4.6 Análisis y procesamiento de datos.

4.6.1 Determinación de Parámetros (Etapa 1)

En primera instancia se toma como datos necesarios, los datos técnicos de los TP a evaluar, lo cuales son los siguiente:

Tabla 4.1 Datos técnicos de TP evaluados

N.º	SUBESTACION	AÑO DE FAB.	MARCA	POTENCIA (MVA)
1	MACHU	2007	EPLI	0.65
2	HUAYUCACHI	1987	DELCROSA	3
3	HUANCAYO ESTE	2016	DELCROSA	15/18.75
4	HUANCAYO ESTE	2008	DELCROSA	13.3
5	SALESIANOS	2005	ABB	9/11
6	SALESIANOS	1992	DELCROSA	15/17.5
7	CHALA NUEVA	1983	BROWN BOVERI	1
8	INGENIO	2008	DELCROSA	5/6.25
9	MACHU	2009	DELCROSA	3/2/1
10	CONCEPCION	1995	TUBOS TRANS ELECTRIC	10
11	CHUPACA	2002	ABB	5/6.25
12	COMAS	1995	ABB	0.65
13	HUAYUCACHI	1997	CEA	5/6.25
14	PARQUE INDUSTRIAL	1996	DELCROSA	15/10
15	PARQUE INDUSTRIAL	2015	DELCROSA	25-31/8-10
16	PARQUE INDUSTRIAL	2009	EPLI	5-6.25
17	PARQUE INDUSTRIAL	1982	BBICT	7
18	CHUMPE	2015	EPLI	0.5

Fuente: Tomado de la base de datos de Electrocentro (2021).

Los datos requeridos para la presente investigación se han categorizado de manera que puedan representar la condición del aislamiento sólido y aislamiento líquido del TP, ya que se utiliza el DGA, el análisis FQ y el análisis de furanos, los cuales están separados en 3 grupos de la siguiente manera.

Tabla 4.2 Resumen de parámetros y agrupación por tipo de aislante

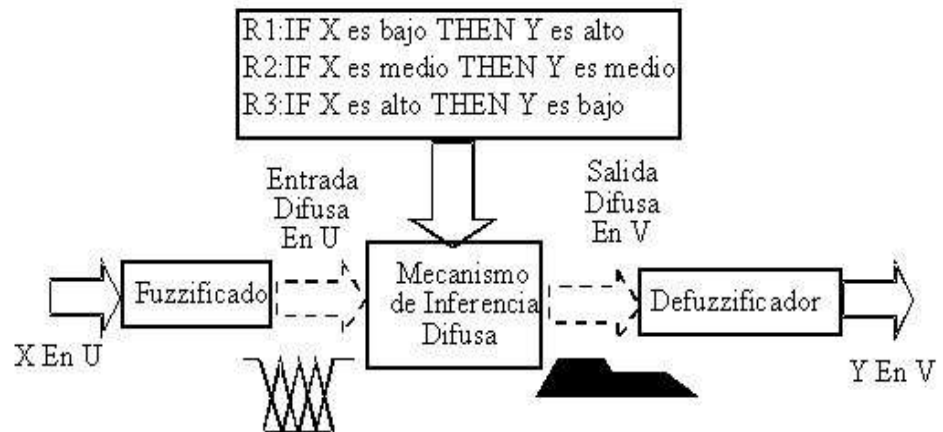
Categoría	Ítem	Variable	Descripción
IS(DGA)	1	H2 (ppm)	Aislamiento Líquido (Análisis de gases disueltos) "DGA"
	2	CH4 (ppm)	
	3	C2H6 (ppm)	
	4	C2H4 (ppm)	
	5	C2H2 (ppm)	
	6	Contenido de agua (ppm)	
IS(FQ)	7	Índice de neutralización (mgKOH/g)	Aislamiento Líquido (Análisis Físico-Químico) "FQ"
	8	Tensión de ruptura dieléctrica (KV)(2mm)	
	9	Tensión Interfacial (dynes/cm)	
	10	Factor de Potencia (25°) (%)	
	11	Factor de potencia (100°) (%)	
IS(2-FAL)	12	2-FAL (ppm)	Aislamiento Sólido (Análisis de Furanos, CO y CO2) "2-FAL"
	13	CO (ppm)	
	14	CO2 (ppm)	

Nota: Las variables y sus unidades de medición están dadas por normas técnicas como la IEEE C57.104 2019, IEEE C57.106 2015 y IEEE C57.140 2017

Definición del tipo de sistema difuso

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada para la presente investigación, se llegó a la decisión de usar el tipo de sistema difuso Mandani, ya que se puede fuzzificar los valores de ingreso, ya que, los valores numéricos de entrada tales como de FQ, DGA y 2-FAL, se conviertan en variables lingüísticas, las cuales, mediante mecanismos de inferencia difusa (reglas expertas) se defuzzifique y se obtenga el IS del TP.

Figura 4.3 Sistema tipo Mandani

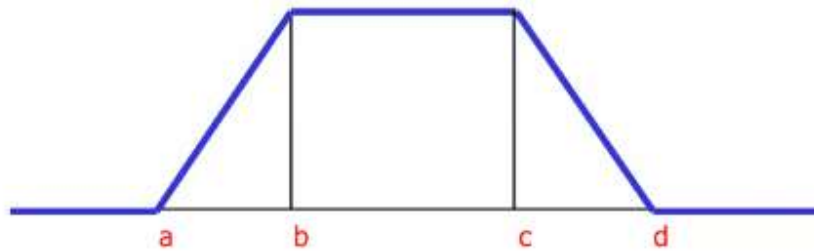


Fuente: Tomada de "Implementación de un control difuso tipo Mamdani en un microcontrolador PIC18F2550 (2014).

Definición de la función de pertenencia

La función de pertenencia que se utilizará en la presente investigación será la función trapezoidal, por su afinidad con las características con la realidad evaluada en esta investigación. Ya que dicha función de pertenencia consta de tres zonas, la primera es el soporte de la gráfica, como se puede observar en la figura 4.3, que los valores dentro del rango "b" y "c" son igual a 1, esto quiere decir que son totalmente pertenecientes, mientras que las otras dos zonas entre los rangos "a-b" y "c-d" que su grado de pertenencia está dada por la pendiente de la recta descrita entre estos dos puntos. Estas son zonas fronterizas con los conceptos aledaños, sirven para desarrollar la incertidumbre de los valores que se pueden presentar en las lecturas de los parámetros evaluados en los análisis de aceites y su determinación de permanecía.

Figura 4.4 Función de permanencia Trapezoidal.



$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases}$$

Fuente: Tomada de "Introducción a la lógica difusa" (2009).

Ecuación de pertenencia para el cálculo de los IS de los parámetros. Para entender el cálculo del IS de cada parámetro se entiende que se fuzzificara los valores de los ítems (variables), se convertirán los números en condiciones gramaticales. Para el desarrollo de esta parte de la metodología se toma de referencia a lo desarrollado por Chilaka Ranga, Rajeevan Chandel y Ashwani Kumar, los cuales desarrollan un método de cálculo de los IS de los subproductos, seccionándolos en tres grupos, que para efecto de la presente investigación se han actualizado los límites admisibles basados en las actualizaciones de las normas IEEE C57.104 2019 para los límites admisibles de las variables de (ISDGA), IEEE C 57.106 2015 para los límites admisibles del análisis físico-químico "IS(FQ)" y para los límites admisibles de contenido de furanos se tomó en cuenta la norma técnica IEEE C57.140 2017.

Tabla 4.3 Parámetros y límites admisibles de acuerdo al tipo de aislamiento

Categoría	Ítem	Variable	Número de Grupo			
			1	2	3	4
Subproductos característicos del aislamiento líquido (Aceite) en DGA						
"O ₂ /N ₂ ≤0.2" / "O ₂ /N ₂ >0.2"						
IS(DGA)	1	H ₂ (ppm)	0-75 / 0-20	76-100 / 21-40	101-200 / 41-90	>200 / >90
	2	CH ₄ (ppm)	0-45 / 0-10	46-90 / 11-20	91-150 / 21-50	>150 / >51
	3	C ₂ H ₆ (ppm)	0-30 / 0-7	31-90 / 8- 15	91-175 / 16- 40	>175 / >40
	4	C ₂ H ₄ (ppm)	0-25	26-50	51-100	>100
	5	C ₂ H ₂ (ppm)	0-1	1.1-2	2-4 / 2-7	>4 / >7
Propiedades características de la calidad del aceite						
IS(FQ)	6	Contenido de agua (ppm)	0-20	21-35	36-40	>40
	7	Índice de neutralización (mgKOH/g)	0-0.03	0.04-0.2	0.2-0.3	>0.3
	8	Tensión de ruptura dieléctrica (KV)(2mm)	>60	60-41	40-35	<35
	9	Tensión Interfacial (dynes/cm)	>38	37-25	24-18	<17
	10	Factor de Potencia (25°) (%)	0-0.2	0.2-0.5	0.5-0.6	>0.6
11	Factor de potencia (100°) (%)	0-3	3-5	5-6	>6	
Subproductos y características del aislamiento sólido (papel)						
IS(2-FAL)	12	2-FAL (ppm)	0-0.12	0.12-1.29	1.29-3.13	>3.13
	13	CO (ppm)	0-500 / 0-350	500-900 / 350-500	900-1100 / 500-600	>1100 / >600
	14	CO ₂ (ppm)	0-5000 / 0- 3500	5000- 10000 / 3500-5500	10000- 12500 / 5500-8000	>12500 / 0 / >8000

Nota: Los límites admisibles en el caso del análisis DGA tiene una condición previa que es la relación de O₂ y N₂, la cual según la norma IEEE C57.104 2019 hace que se separe en dos tipos de límites admisibles.

Según Chilaka a los cuatro grupos de cada atributo se les asignan pesos apropiados (w) en un rango entre 0 y 10, como se especifica en la Tabla 4.4. Los límites inferiores del grupo 1 de todos los atributos dados en la Tabla 4.3 se asignan con un peso de '0', mientras que un peso de '2.5' se asigna a los límites superiores del grupo 1. Los valores entre los límites inferior y superior del grupo 1 se asignan con pesos entre 0 y 2.5. Estos pesos se calculan utilizando la fórmula (4.1). De manera similar, se asignan los pesos a los otros grupos de atributos. (2017)

Tabla 4.4 Pesos asignados a los grupos de atributos

Numero de Grupo	Significado Gramatical	Peso asignado
Grupo 1	Excelente	0 – 2.5
Grupo 2	Aceptable	2.5 – 5
Grupo 3	Observado	5 – 7.5
Grupo 4	Malo	7.5 - 10

Fuente: Tomado de "Condition assessment of power Transformers based on multi-attributes using fuzzy logic" (2017).

Para la determinación del valor de los atributos de los parámetros de la presente investigación se utiliza la siguiente formula:

$$PP(i) = Yi + \left[\left(\frac{x-Gi}{Hi-Gi} \right) * 2.5 \right] \quad (4.1)$$

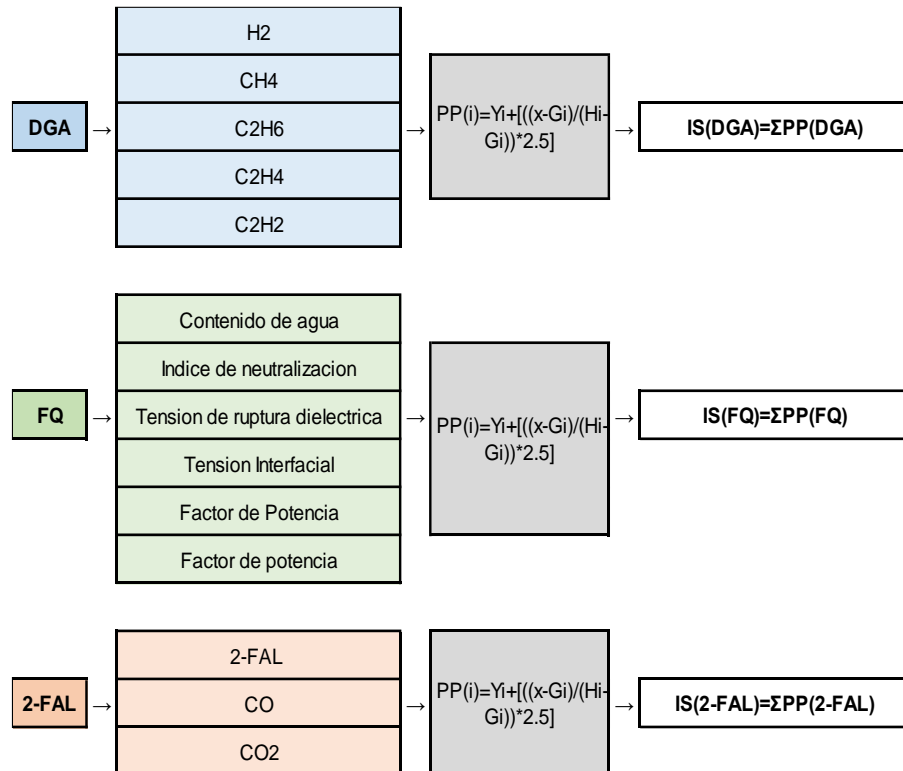
Donde:

- "X" es el valor del parámetro, ejemplo el valor de hidrogeno en ppm.
- "Yi" es el peso mínimo dependiendo en que grupo se encuentre el valor del parámetro medido, los valores que puede tomar son 0, 2.5, 5 y 7.5. Correspondientes a grupo 1, grupo 2, grupo 3 y grupo 4 respectivamente.
- "Gi" es el valor inferior en los rangos de cada uno de los parámetros, por ejemplo, para un valor de hidrogeno que se encuentre en el grupo 2 su valor de Gi será 76.
- "Hi" de igual la misma manera que el Gi, pero el Hi es el valor máximo dentro del rango del parámetro.

4.6.2 Diseño de proceso (Etapa 2)

Para entender de manera concisa y ordenada el proceso de la determinación del IS del TP se desarrolló el siguiente diagrama.

Figura 4.5 Diagrama de proceso previo a la Fuzzificación



Ya teniendo los valores de los parámetros IS(DGA), IS(FQ) y IS(2-FAL), se continua con la Fuzzificación de dichos valores, teniendo en cuenta los rangos descritos a continuación:

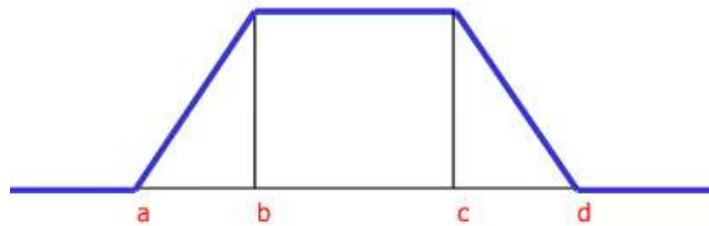
Tabla 4.5 Rangos de IS de los parámetros evaluados

Parámetros	Rango de Índice de Salud de acuerdo al rango			
	Bien	Aceptable	Observado	Malo
IS (DGA)	0 - 12.5	12.5 - 25	25.5 - 37.5	37.5 - 50
IS (FQ)	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60
IS (2-FAL)	0 - 7.5	7.5 - 15	15 - 22.5	22.5 - 30

Nota: Los límites rangos están determinados por el número de sus parámetros evaluados multiplicado por 10, ya que este sería el puntaje más alto en el peor de los casos.

Definición de los puntos de la función de membresía de los IS
 Ya teniendo los rangos, en los cuales se Fuzzificara cada uno de los parámetros, procedemos a definir los puntos de la función de membresía de la función trapezoidal.

Figura 4.6 Función de membresía Trapezoidal de referencia



Fuente: Tomada de "Introducción a la lógica difusa" (2009).

Según Timothy, Se recomienda tener una superposición de cinco unidades entre membresías aledañas, debido a que al 50% de superposición se obtienen valores más precisos (2004). Por esa razón los valores para "a", "b", "c" y "d" se describen a continuación:

Tabla 4.6 Definición de puntos de las funciones de membresía de entrada

Etiqueta	Punto	IS DGA	IS FQ	IS 2-FAL
BIEN	a	-5	-5	-5
	b	0	0	0
	c	10	12.5	5
	d	15	17.5	10
ACEPTABLE	a	10	12.5	5
	b	15	17.5	10
	c	22.5	27.5	12.5
	d	27.5	32.5	17.5
OBSERVADO	a	22.5	27.5	12.5
	b	27.5	32.5	17.5
	c	35	42.5	20
	d	40	47.5	25
MALO	a	35	42.5	20
	b	40	47.5	25

c	50	60	30
d	55	65	35

De igual manera se definirá los puntos para la función de membresía de salida es decir para el IS del TP. En este caso, el rango va de 0 al 1, y es descrito a continuación:

Tabla 4.7 Definición de los puntos de membresía de IS de TP

Etiqueta	Punto	Salida
MUY BUENO	A	-0.1
	B	0
	C	0.15
	D	0.2
BUENO	A	0.15
	B	0.2
	C	0.35
	D	0.4
OBSERVADO	A	0.35
	B	0.4
	C	0.65
	D	0.7
MALO	A	0.65
	B	0.7
	C	0.85
	D	0.9
MUY MALO	A	0.85
	B	0.9
	C	1
	D	1.05

Definición de las reglas para el sistema difuso

Las reglas expertas en el sistema difuso Mandani, tiene la forma de un condicional y te da como resultado un entonces.

Por ejemplo:

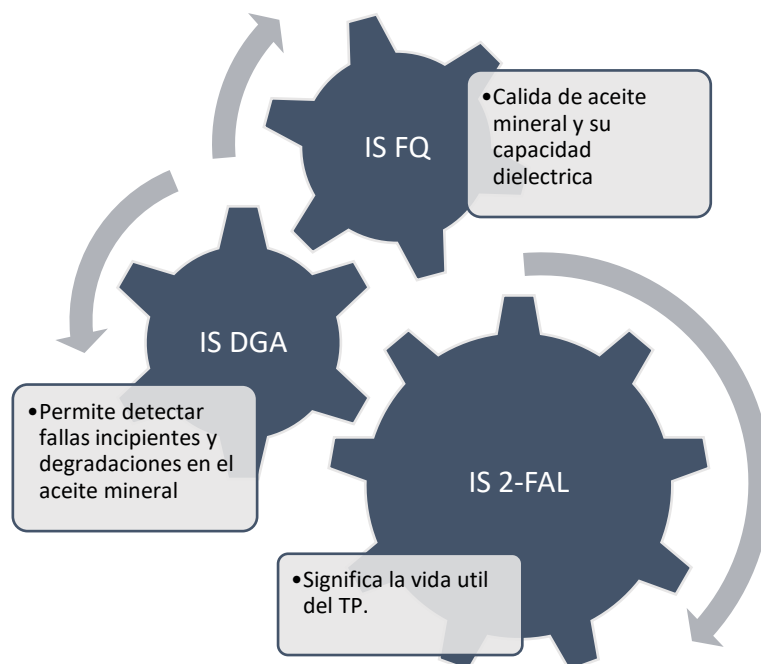
SI “IS(DGA)” es “BUENO” **y** “IS(FQ)” es “OBSERVADO”
ENTONCES “IS” es” OBSERVADO”.

Del ejemplo se puede inferir la forma de definir las reglas de acuerdo a la bibliografía desarrollada en la presente investigación, y el juicio experto consultado a lo largo del desarrollo de la investigación.

Se debe de tomar en consideración dentro de la definición de las reglas de inferencia, la importancia que tiene el aislante sólido, que viene a ser el “papel”, que, en un TP, es directamente proporcional al ciclo de vida del activo. Ya que la degradación del papel está relacionado a condiciones severas de falla en el TP.

Bajo esta idea se podría transferir este conocimiento a una gráfica de engranajes, detallando la importancia de cada parámetro evaluado en la presente investigación.

Figura 4.7 Importancia de cada parámetro evaluado



Teniendo claro los conceptos e importancias de los parámetros evaluados, se define las reglas de inferencia del sistema difuso, dichas reglas son mostradas a continuación:

- 1 If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is BUENO then IS is MUY_BUENO
- 2 If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is BUENO
- 3 If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is OBSERVADO
- 4 If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
- 5 If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is BUENO then IS is BUENO
- 6 If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is BUENO
- 7 If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MALO
- 8 If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
- 9 If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is BUENO then IS is OBSERVADO
- 10 If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is OBSERVADO.

El resto de reglas se adjunta en los anexos.

4.6.3 Implementación y programación en MatLab (Etapa 3)

Cálculo de Sub Índices

En esta actividad se calculará cada uno de los sub índices IS(DGA), IS(FQ) y IS(Papel). Primero recolectamos la información de los valores de cara parámetro concerniente a cada sub índice. Los valores completos están expuestos en el Anexo 3.

Tabla 4.8 Valores de ítems DGA

Nº	SUBESTACION	O2/N2	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2
1	MACHU	0.15	23	9	11	43	0
2	HUAYUCACHI	0.32	880	33	12	19	0
3	HUANCAYO ESTE	0.16	76	11	0	0	0
4	HUANCAYO ESTE	0.38	0	0	0	0	0
5	SALESIANOS	0.10	12	30	48	8	0
6	SALESIANOS	0.36	7	0	0	38	0

Nota. Los valores completos de la Tabla 4.8, se muestran completos en el Anexo 3.

Tabla 4.9 Valores de ítems FQ

Nº	SUBESTACION	H2O	NN	RD	TT	FP (25°) (%)	FP (100°) (%)
1	MACHU	34	0.17	40.5	20.6	0.123	7.23
2	HUAYUCACHI	20	0.02	47.2	37.5	0.049	1.81
3	HUANCAYO ESTE	10	0.02	69.1	36.1	0.043	1.31
4	HUANCAYO ESTE	7	0.01	68.8	42.6	0.004	0.21
5	SALESIANOS	8	0.01	71.1	38.2	0.117	1.62
6	SALESIANOS	12	0.04	64.7	35.5	0.079	2.76

Nota. Los valores completos de la Tabla 4.9, se muestran completos en el Anexo 4.

Tabla 4.10 Valores de ítems PAPEL

Nº	SUBESTACION	O2/N2	2-FAL	CO	CO2
1	MACHU	0.15	0.598	153	1706
2	HUAYUCACHI	0.32	0.258	155	1028
3	HUANCAYO ESTE	0.16	0.05	117	711
4	HUANCAYO ESTE	0.38	0.05	152	1158
5	SALESIANOS	0.10	0.05	252	1393
6	SALESIANOS	0.36	0.225	183	1256

Nota. Los valores completos de la Tabla 4.10, se muestran completos en el Anexo 5.

De acuerdo a la Figura 4.7, cada uno de estos parámetros se calcula con la fórmula (4.1). En el caso de los parámetros “PAPEL” y “DGA”, se tiene el indicador de relación O2/N2, el cual es un parámetro necesario para la aplicación de la norma IEEE C57.104 2019. Habiendo calculado todos los parámetros se obtiene lo siguiente:

Tabla 4.11 Sub índices de salud por parámetro

Nº	SUBESTACION	Nº DE SERIE	IS FQ	IS DGA	IS PAPEL
1	MACHU	TR-2006-1271-02	31.48	6.48	5.14
2	HUAYUCACHI	128924T	12.98	21.98	4.64
3	HUANCAYO ESTE	147146	8.39	3.21	1.98
4	HUANCAYO ESTE	143913	4.51	0.00	2.95
5	SALESIANOS	740036-01	7.75	6.12	3.00
6	SALESIANOS	160901T	12.13	4.68	4.93

Nota. Los valores completos de la Tabla 4.11, se muestran completos en el Anexo 6.

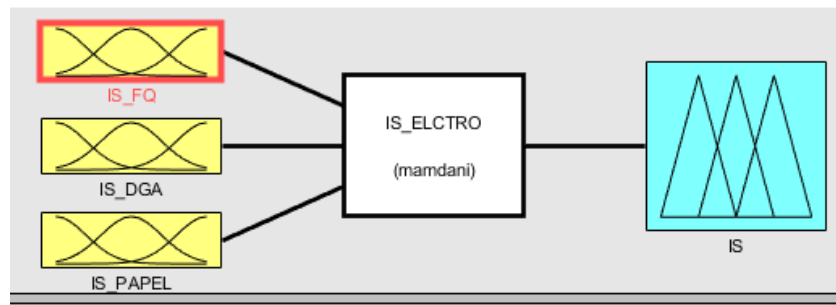
Programación

En esta etapa se abarca todo lo concerniente al entorno de programación en Matlab, basado en los conceptos y definiciones de parámetros desarrollados en la etapa anterior.

Creación de parámetros en el entorno de programación Matlab

Para esta etapa se utiliza el módulo de Fuzzy Logic en Matlab R2024a, en el cual se apertura un cuadro de dialogo en el cual ingresamos nuestros sub índices:

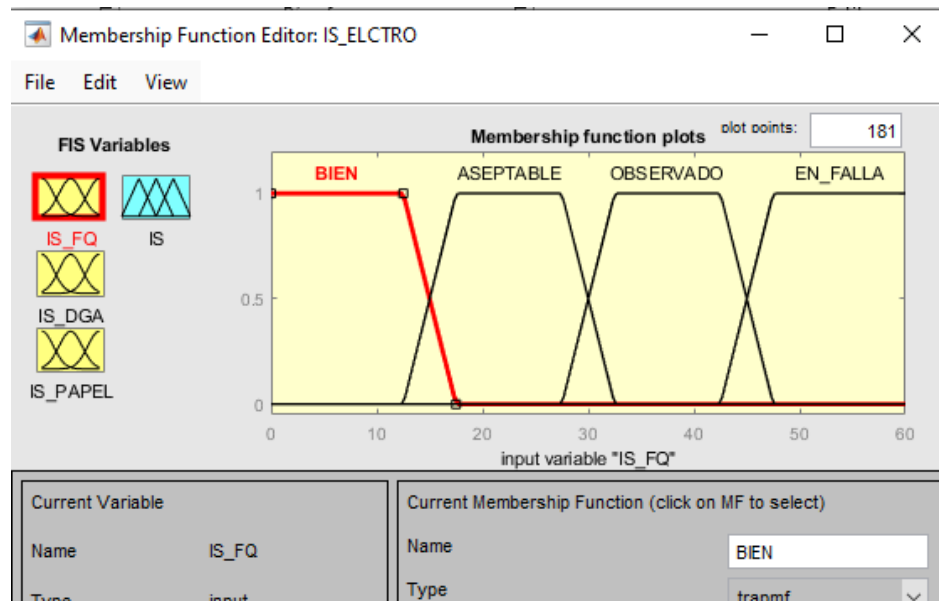
Figura 4.8 Fuzzy Logic designer Parámetros en estudio



Nota. Se muestra la ventana de Matlab, en la cual se puede observar los subíndices y el cuadro mandani de procesamiento y el IS como elemento defuzzificador.

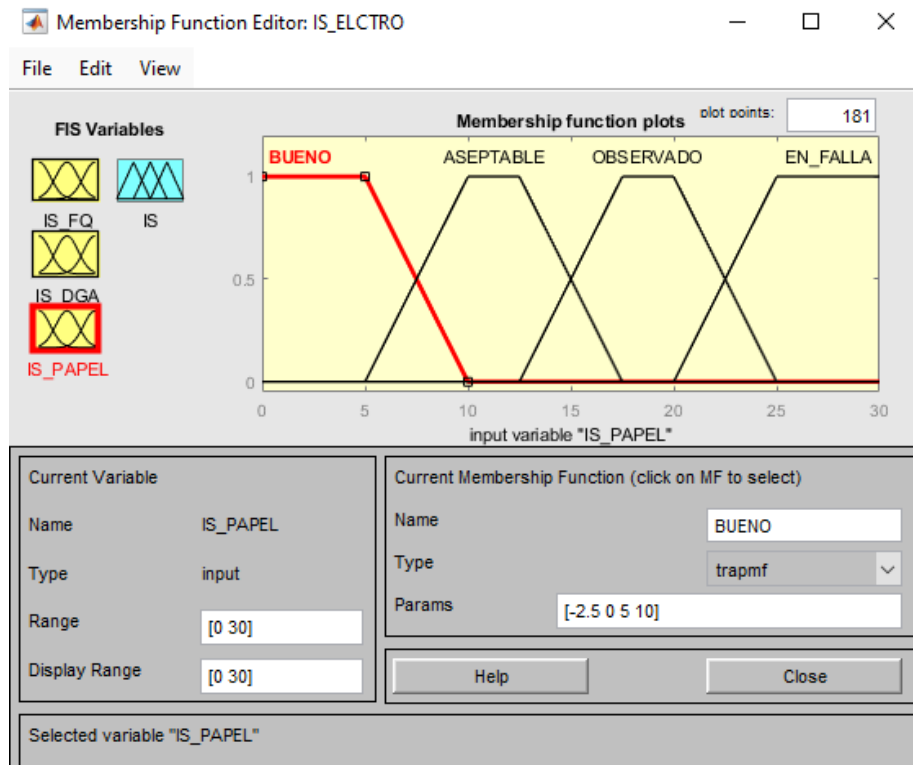
Luego crear los nombres de cada uno de los parámetros a evaluar, se ingresa a cada uno de ellos para ingresar los puntos de las funciones de membresía trapezoidal de cada uno de los parámetros "IS_FQ", "IS_DGA", "IS_PAPEL" Y "IS" según la Tabla 4.6, determinados en la etapa anterior.

Figura 4.9 Programación de las funciones de membresía IS FQ



Nota. En estos cuadros de Matlab, se ingresan los puntos trapezoidales de los extremos de cada concepto.

Figura 4.10 Programación de los puntos de membresía IS PAPEL



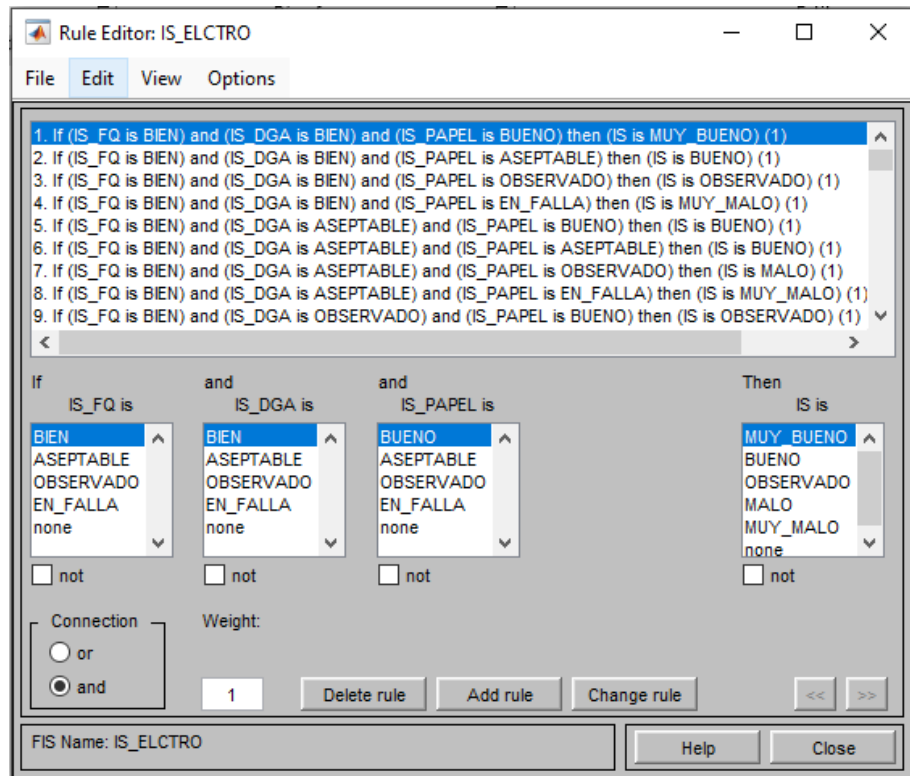
Luego de ingresar los puntos de las funciones de membresía de cada uno de los parámetros de ingreso, el siguiente paso es hacerlo mismo con el parámetro de salida que sería el IS, basado en la Tabla 4.7.

Programación de las reglas de inferencia

Una vez programados los parámetros de ingreso y salida de sistema difuso, el siguiente paso es la programación de las reglas expertas basadas en los conceptos desarrollados en la presente investigación y también tomando en cuenta la idea clave de la Figura 4.7.

Para empezar a programar las reglas se debe de hacer clic en "Edit", para luego hacer clic en "rules", en el cual se abrirá un cuadro de dialogo en el cual tendremos las definiciones de las variables de entrada programadas anteriormente.

Figura 4.11 Editor de reglas en Matlab Fuzzy Logic



Nota. Para agregar la regla seleccionada se debe de hacer clic a “Add rule”, así con las 64 reglas desarrolladas en la etapa anterior.

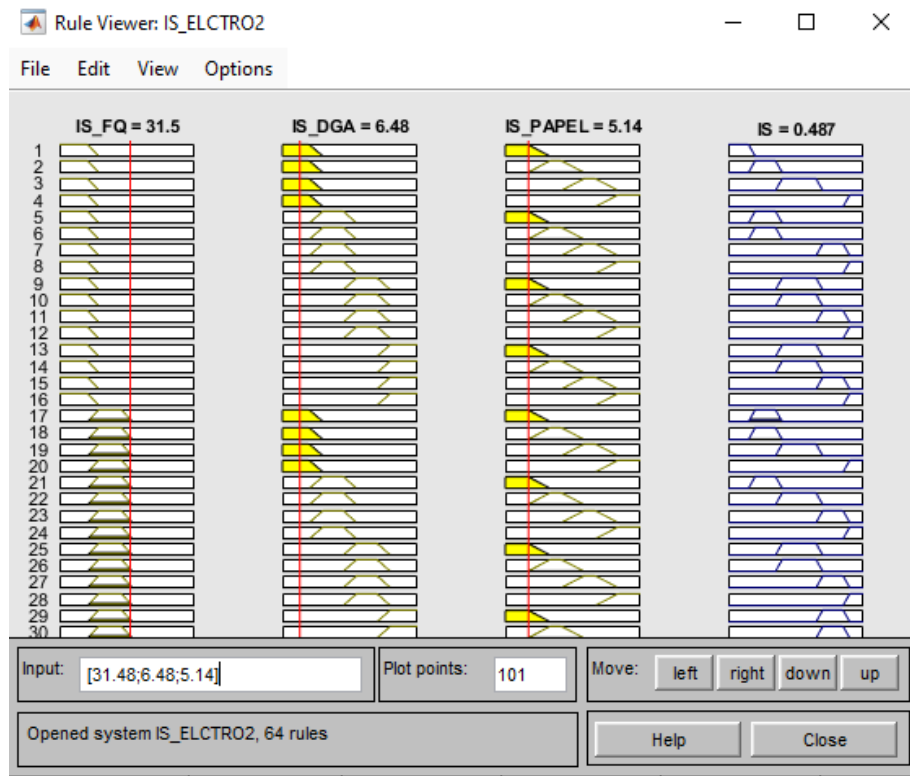
4.6.4 Simulación y Validación de la simulación

En esta etapa se simulará con valores de los parámetros de ingreso, y ver la funcionalidad de la programación y determinar en cada uno de los TP su IS. También se validará la Simulación con el cálculo del IS de manera tradicional, usando los mismos limites admisibles, pero utilizando los pesos por cada uno de los parámetros.

Simulación con valores de los parámetros estudiados

Para esta actividad estando en el cuadro de dialogo donde se programaron las variables de entrada, se hace clic en “View” y luego en “Rules”. Aparecerá la venta de reglas, en la cual en la parte inferior habrá una casilla editable que lleva con nombre “Input”, en el cual se debe de ingresar los datos calculados de sub índices IS DGA, IS FQ y IS 2-FAL.

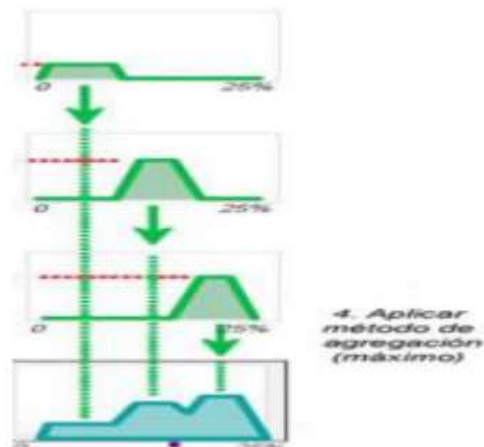
Figura 4.12 Simulación de transformador SE MACHU



Nota. Como se observa en la Figura 4.13 se ha evaluado las 64 reglas de inferencia a partir de ingresar los valores de los IS previamente calculados en la etapa anterior.

Para que el sistema Mamdani pueda mostrar un resultado debe ejecutar el proceso de defuzzificación que consigue relacionar a un conjunto difuso un valor numérico correspondiente de acuerdo a las reglas inferenciales difusas estructuradas. Sin embargo, este valor obtenido debe representar a todo el conjunto y por ello el sistema usa el método del centroide para calcularlo. Luego de formarse las funciones sombreadas para todas las 64 reglas, el sistema combina las salidas de cada regla para obtener un único conjunto difuso utilizando un operador de unión (agregación); es decir, el máximo.

Figura 4.13 Método de agregación de Mandani



Fuente: Tomado de “Sistemas de Control con Lógica Difusa: métodos de Mandani y de Tagaki-Sugeno-Kang (TSK)” (2017)

Una vez obtenida el conjunto representativo, el sistema determina el valor numérico de la variable de salida calculando el centroide del área sombreada, obteniéndose un valor en el resultado de la simulación del HI de 0.487 como se aprecia en la Figura 4.13 en la última columna.

Las variables lingüísticas y sus dominios numéricos definidas para la variable de la salida, definida a continuación:

Tabla 4.12 Condición de puntuación de IS

Índice de Salud (IS)	Condición
0 – 0.2	Muy Bueno
0.2 – 0.4	Bueno
0.4 – 0.6	Observado
0.6 – 0.85	Malo
0.85 - 1	Muy Malo

Nota. Los límites propuestos son a criterio de experto

Validación de la simulación

La validación de la simulación será comparándola con el análisis desarrollado por la empresa consultora que le brinda el servicio de análisis de aceite de los transformadores, los cuales, a estos 18 transformadores en cuestión les acuño una condición lingüística de la siguiente forma:

Tabla 4.13 Clasificación según condición según empresa consultora

Descripción lingüística	Color	Significado
Aceptado	Verde	'Parámetros dentro de los límites recomendados.
Observado	Amarillo	Presencia de algún contaminante
En falla	Rojo	Falla interna significativa

Fuente: "Tomado de informe final para Electrocentro" (2021)

4.6.5 Propuesta de mejora (Etapa 5)

Ya teniendo los valores del índice de salud obtenidos por lógica difusa, se desarrolla las siguientes propuestas para la mejora del mantenimiento y tener conceptos de inferencia de cada condición, como lo desarrollado en el anexo 8.

4.7 Aspectos éticos en Investigación

El presente proyecto se base en el uso estricto de los datos para el uso de este proyecto de investigación, rigiéndose a los principios éticos considerados en el "Código de Ética de Investigación" de la Universidad Nacional del Callao, el cual tiene como principio, la probidad, el profesionalismo, la transparencia, la objetividad, la igualdad, el compromiso, la honestidad, la confidencialidad, independencia, diligencia y dedicación.

V. RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos

5.1.1 Resultado de parámetros a evaluar en el IS

La determinación de los parámetros del índice de Salud, fue dado por la premisa que los datos recolectados vienen de informes de análisis de aceite. Ahí se separó el aislamiento del

transformador de potencia en dos partes, en aislamiento líquido y aislamiento sólido, ya que sus representaciones son el aceite mineral y el papel del que está compuesto el transformador, por esa razón se consideró como parámetros los siguientes:

Tabla 5.1 Resultado de la determinación de Parámetros estudiados

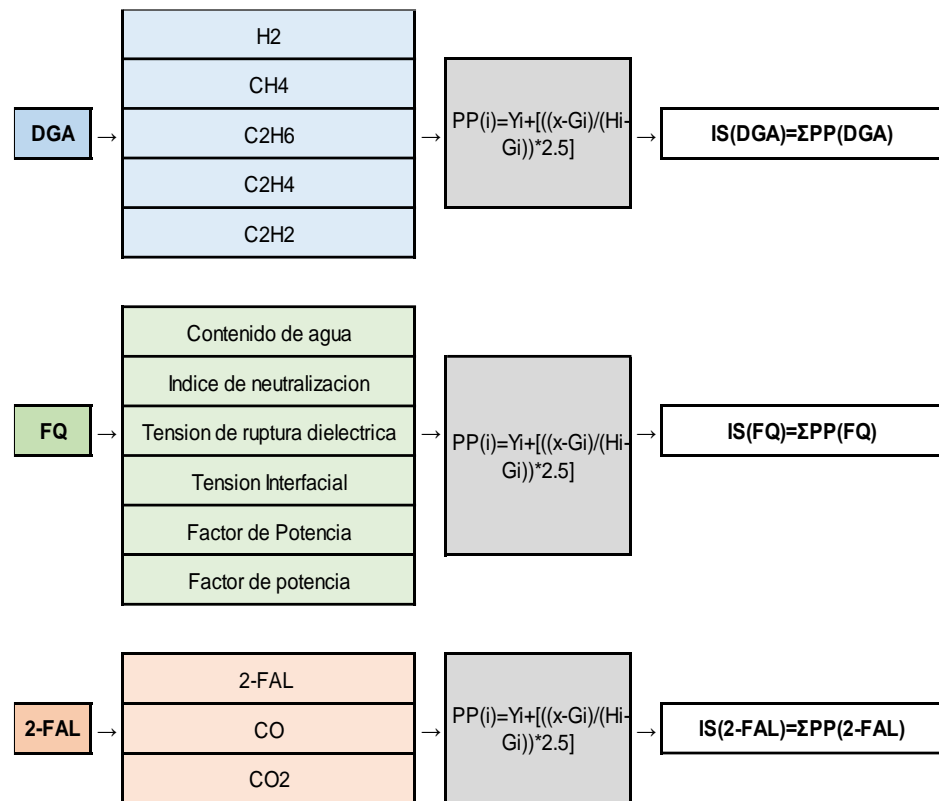
Categoría	Ítem	Variable	Descripción
IS(DGA)	1	H ₂ (ppm)	Aislamiento Líquido (Análisis de gases disueltos) "DGA"
	2	CH ₄ (ppm)	
	3	C ₂ H ₆ (ppm)	
	4	C ₂ H ₄ (ppm)	
	5	C ₂ H ₂ (ppm)	
	6	Contenido de agua (ppm)	
IS(FQ)	7	Índice de neutralización (mgKOH/g)	Aislamiento Líquido (Análisis Físico-Químico) "FQ"
	8	Tensión de ruptura dieléctrica (KV)(2mm)	
	9	Tensión Interfacial (dynes/cm)	
	10	Factor de Potencia (25°) (%)	
	11	Factor de potencia (100°) (%)	
IS(2-FAL)	12	2-FAL (ppm)	Aislamiento Sólido (Análisis de Furanos, CO y CO ₂) "2-FAL"
	13	CO (ppm)	
	14	CO ₂ (ppm)	

5.1.2 Resultado Estimación del IS

Para la estimación del IS se desarrolló una metodología por la cual se siga el paso a paso para la determinación del IS de TP.

Por ello se tuvo como resultado un diagrama de proceso, descrito a continuación. En el cual figura la formula a emplear para el cálculo de los sub índices.

Figura 5.1 Flujo de proceso para la determinación de los sub índices



5.1.3 Resultados de Implementación del IS

Para la implementación del IS, se hizo la programación del entorno en Matlab, en el cual se programó las funciones de membresía, los puntos de cada uno de los grupos de membresía y las reglas de inferencia experta.

Como resultado se tuvo las 64 reglas de inferencia basada en experiencia y bibliografía basta, cuya observación se da en el anexo 2. Así como se desarrollaron las reglas también se calcularon los subíndices, de los cuales se tiene como resultado los siguientes cuadros.

Tabla 5.2 IS FQ calculado

Nº	SUBESTACION	Nº DE SERIE	IS H2O	IS NN	IS RD	IS TI	IS FP (25°)	IS FP (100°)	IS FQ	DESCRIPCION
1	MACHU	TR-2006-1271-02	4.83	4.56	4.94	6.57	1.54	9.04	31.48	Observado
2	HUAYUCACHI	128924T	2.50	1.67	4.10	2.60	0.61	1.51	12.98	Excelente
3	HUANCAYO ESTE	147146	1.25	1.67	0.98	2.87	0.54	1.09	8.39	Excelente
4	HUANCAYO ESTE	143913	0.88	0.83	1.03	1.54	0.05	0.18	4.51	Excelente
5	SALESIANOS	740036-01	1.00	0.83	0.65	2.46	1.46	1.35	7.75	Excelente
6	SALESIANOS	160901T	1.50	2.65	1.72	2.98	0.99	2.30	12.13	Excelente
7	CHALA NUEVA	L-16178	1.75	1.67	0.43	2.83	0.63	1.24	8.54	Excelente
8	INGENIO	143712	2.25	0.83	2.83	2.08	0.64	1.04	9.67	Excelente
9	MACHU	144132	1.13	0.83	0.92	0.40	0.29	0.32	3.88	Excelente
10	CONCEPCION	A-4121 / 35265	1.25	0.83	1.02	0.21	0.23	0.86	4.39	Excelente
11	CHUPACA	701151-01	1.25	0.83	1.85	2.75	1.66	1.54	9.89	Excelente
12	COMAS	L21579	1.63	1.67	0.63	3.12	0.60	1.73	9.37	Excelente
13	HUAYUCACHI	97033694	1.63	0.83	2.48	2.52	0.18	0.85	8.49	Excelente
14	PARQUE INDUSTRIAL	161345T	1.63	2.79	1.17	3.63	10.75	2.94	22.91	Bueno
15	PARQUE INDUSTRIAL	146961	0.88	0.83	2.48	2.17	0.13	0.26	6.74	Excelente
16	PARQUE INDUSTRIAL	TR2008-10061-01	0.75	0.83	0.48	0.50	0.01	0.06	2.64	Excelente
17	PARQUE INDUSTRIAL	L30304	1.13	0.83	2.00	1.75	0.28	0.57	6.55	Excelente
18	CHUMPE	TR2014-09068-01	0.88	3.09	1.32	6.18	2.93	5.00	19.39	Bueno

Tabla 5.3 IS de DGA

Nº	SUBESTACION	Nº DE SERIE	O2/N2	IS H2	IS CH4	IS C2H6	IS C2H4	IS C2H2	IS DGA	Descripción
1	MACHU	TR-2006-1271-02	0.16	0.77	0.50	0.92	4.30	0.00	6.48	Excelente
2	HUAYUCACHI	128924T	0.32	9.94	6.08	4.06	1.90	0.00	21.98	Bueno
3	HUANCAYO ESTE	147146	0.16	2.60	0.61	0.00	0.00	0.00	3.21	Excelente
4	HUANCAYO ESTE	143913	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Excelente
5	SALESIANOS	740036-01	0.10	0.40	1.67	3.25	0.80	0.00	6.12	Excelente
6	SALESIANOS	160901T	0.36	0.88	0.00	0.00	3.80	0.00	4.68	Excelente
7	CHALA NUEVA	L-16178	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Excelente
8	INGENIO	143712	0.33	0.75	0.00	0.00	0.30	0.00	1.05	Excelente
9	MACHU	144132	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Excelente
10	CONCEPCION	A-4121 / 35265	0.25	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	Excelente
11	CHUPACA	701151-01	0.08	0.00	4.00	6.65	0.50	0.00	11.15	Excelente
12	COMAS	L21579	0.31	0.00	0.00	0.00	2.20	0.00	2.20	Excelente
13	HUAYUCACHI	97033694	0.34	0.00	1.75	0.00	0.00	0.00	1.75	Excelente
14	PARQUE INDUSTRIAL	161345T	0.34	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.30	Excelente
15	PARQUE INDUSTRIAL	146961	0.34	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	Excelente
16	PARQUE INDUSTRIAL	TR2008-10061-01	0.21	0.00	1.75	0.00	0.00	0.00	1.75	Excelente
17	PARQUE INDUSTRIAL	L30304	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Excelente
18	CHUMPE	TR2014-09068-01	0.18	2.23	0.50	0.75	0.80	0.00	4.28	Excelente

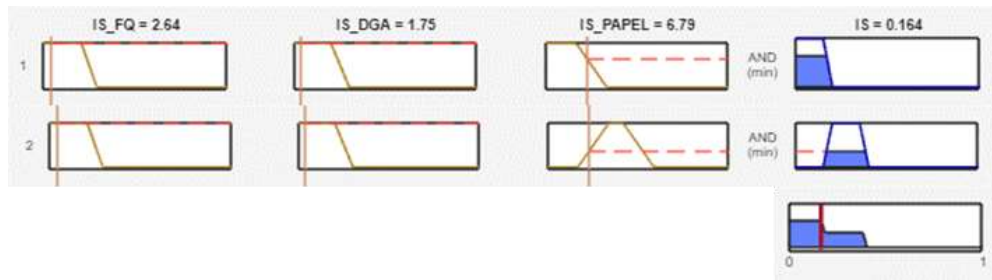
Tabla 5.4 IS Papel

Nº	SUBESTACION	Nº DE SERIE	IS 2-FAL	IS CO	IS CO2	IS PAPEL	Descripción
1	MACHU	TR-2006-1271-02	3.52	0.77	0.85	5.14	Excelente
2	HUAYUCACHI	128924T	2.79	1.11	0.73	4.64	Excelente
3	HUANCAYO ESTE	147146	1.04	0.59	0.36	1.98	Excelente
4	HUANCAYO ESTE	143913	1.04	1.09	0.83	2.95	Excelente
5	SALESIANOS	740036-01	1.04	1.26	0.70	3.00	Excelente
6	SALESIANOS	160901T	2.72	1.31	0.90	4.93	Excelente
7	CHALA NUEVA	L-16178	1.04	0.60	0.46	2.10	Excelente
8	INGENIO	143712	1.04	0.48	1.43	2.95	Excelente
9	MACHU	144132	1.04	0.30	0.31	1.65	Excelente
10	CONCEPCION	A-4121 / 35265	1.04	2.20	0.94	4.18	Excelente
11	CHUPACA	701151-01	1.04	1.62	1.90	4.56	Excelente
12	COMAS	L21579	1.04	1.33	0.91	3.28	Excelente
13	HUAYUCACHI	97033694	1.04	1.52	1.36	3.92	Excelente
14	PARQUE INDUSTRIAL	161345T	2.53	0.99	0.33	3.86	Excelente
15	PARQUE INDUSTRIAL	146961	1.04	1.40	0.84	3.28	Excelente
16	PARQUE INDUSTRIAL	TR2008-10061-01	1.04	4.62	1.13	6.79	Excelente
17	PARQUE INDUSTRIAL	L30304	1.04	0.37	0.43	1.85	Excelente
18	CHUMPE	TR2014-09068-01	1.04	1.41	0.00	2.45	Excelente

Estos resultados de los sub índices, son los valores de entrada en el software desarrollado en Matlab.

Por ejemplo, para el TP N°1, estas serían las gráficas evaluadas por el sistema difuso, en el cual las dos primeras reglas son las que coinciden y generaran una gráfica de la cual se calculara el centroide, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5.2 Resultado de IS de TP N°1



De igual manera se evaluará el resto de los transformadores, dando como resultado la siguiente Tabla.

Tabla 5.5 Índice de Salud de transformadores de la UN Huancayo

Nº	SUBESTACION	Nº DE SERIE	IS FQ	IS DGA	IS PAPEL	IS Difusor	Descripción
1	MACHU	TR-2006-1271-02	31.48	6.48	5.14	0.49	Observado
2	HUAYUCACHI	128924T	12.98	21.98	4.64	0.28	Bueno
3	HUANCAYO ESTE	147146	8.39	3.21	1.98	0.09	Excelente
4	HUANCAYO ESTE	143913	4.51	0.00	2.95	0.09	Excelente
5	SALESIANOS	740036-01	7.75	6.12	3.00	0.09	Excelente
6	SALESIANOS	160901T	12.13	4.68	4.93	0.09	Excelente
7	CHALA NUEVA	L-16178	8.54	0.00	2.10	0.09	Excelente
8	INGENIO	143712	9.67	1.05	2.95	0.09	Excelente
9	MACHU	144132	3.88	0.00	1.65	0.09	Excelente
10	CONCEPCION	A-4121 / 35265	4.39	0.38	4.18	0.09	Excelente
11	CHUPACA	701151-01	9.89	11.15	4.56	0.14	Excelente
12	COMAS	L21579	9.37	2.20	3.28	0.09	Excelente

13	HUAYUCACHI	97033 694	8.49	1.75	3.92	0.09	Excelente
14	PARQUE INDUSTRIAL	16134 5T	22.9 1	0.30	3.86	0.28	Bueno
15	PARQUE INDUSTRIAL	14696 1	6.74	0.13	3.28	0.09	Excelente
16	PARQUE INDUSTRIAL	TR20 08- 10061 -01	2.64	1.75	6.79	0.16	Excelente
17	PARQUE INDUSTRIAL	L3030 4	6.55	0.00	1.85	0.09	Excelente
18	CHUMPE	TR20 14- 09068 -01	19.3 9	4.28	2.45	0.275	Bueno

Nota: Se llega a observar en la tabla que se cuenta con un transformador observado, dos en estado bueno y el resto en excelente condición.

5.1.4 Resultado de Validación de la simulación

Para la validación de la simulación se comparó con la condición realizada por la empresa consultora que brinda el servicio de extracción y análisis de aceite para la empresa Electrocentro S.A. La cual está sustentada a continuación:

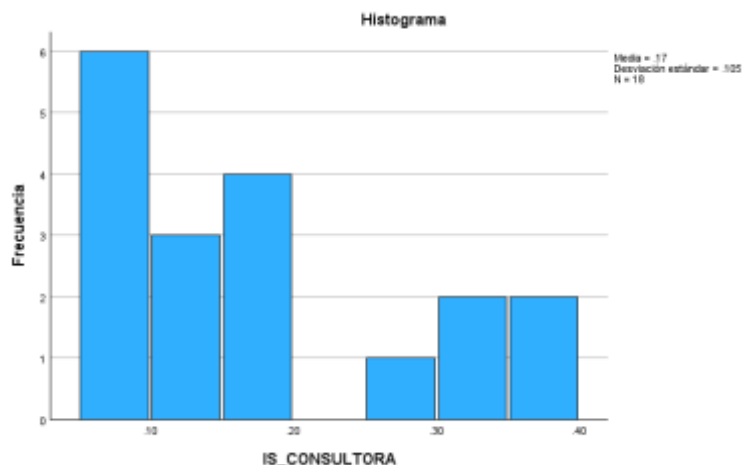
Tabla 5.6 Resultados de IS Difuso vs IS Consultoría

Nº	SUBESTACION	Nº DE SERIE	IS Difuso	IS Consultoría
1	MACHU	TR-2006- 1271-02	0.49	0.35
2	HUAYUCACHI	128924T	0.28	0.35
3	HUANCAYO ESTE	147146	0.09	0.32
4	HUANCAYO ESTE	143913	0.09	0.1
5	SALESIANOS	740036-01	0.09	0.15
6	SALESIANOS	160901T	0.09	0.18
7	CHALA NUEVA	L-16178	0.09	0.12
8	INGENIO	143712	0.09	0.09

9	MACHU	144132	0.09	0.08
10	CONCEPCION	A-4121 / 35265	0.09	0.09
11	CHUPACA	701151-01	0.14	0.18
12	COMAS	L21579	0.09	0.6
13	HUAYUCACHI	97033694	0.09	0.8
14	PARQUE INDUSTRIAL	161345T	0.28	0.32
15	PARQUE INDUSTRIAL	146961	0.09	0.08
16	PARQUE INDUSTRIAL	TR2008- 10061-01	0.16	0.18
17	PARQUE INDUSTRIAL	L30304	0.09	0.1
18	CHUMPE	TR2014- 09068-01	0.275	0.29

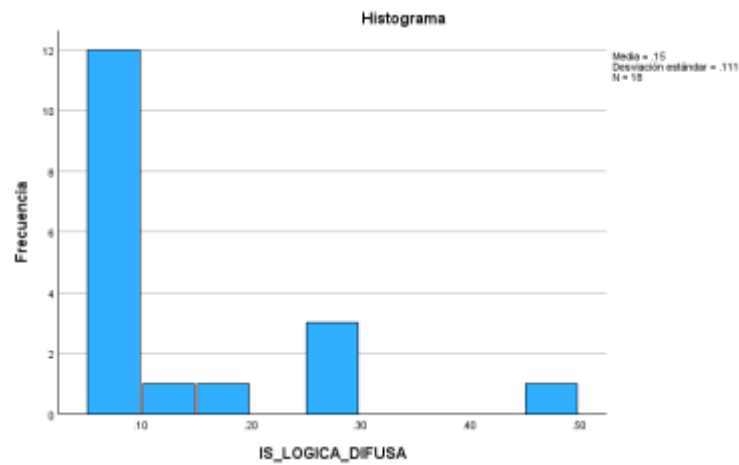
A continuación, se comparó a manera de visualizar la diferencia entre los dos estudios, mediante un Histograma

Figura 5.3 Histograma de IS Consultora



Se puede observar que, de acuerdo al comportamiento de los histogramas, se tiene aproximadamente resultados similares, pero también hay unos cuantos que son distintos, pero no de una forma que tergiverse la información, solo es tema de sensibilidad de la herramienta.

Figura 5.4 Histograma de IS Lógica difusa



5.1.5 Resultado de Propuesta de mejora

Como parte final de la presente investigación se realizó un cuadro de toma de decisiones a partir del IS de los TP, y su significado de cada uno de las condiciones lingüísticas. El cuadro de toma de decisiones se muestra a continuación.

Tabla 5.7 Cuadro de toma de decisiones

IS	CONDICION	DESCRIPCION
0 – 0.2	MUY BUENO	Los parámetros del TP están dentro de los límites correctos. Continuar con los análisis de aceite a frecuencia normal.
0.2 – 0.4	BUENO	Los parámetros están dentro de lo aceptable. Continuar con los análisis de aceite a frecuencia normal.
0.4 - 0.6	OBSERVADO	Uno o más parámetros están fuera de los límites admisibles. Si la observación se encuentra en: <ul style="list-style-type: none"> • IS DGA: Usar los triángulos de Duval para la determinación de la

		<p>posible falla insipiente según IEEE C57.104 2019.</p> <ul style="list-style-type: none"> • IS FQ: Verificar si la Rigidez dieléctrica y/o Contenido de humedad no cumple con los límites admisibles, consultar IEEE C57 637 • IS 2-FAL: Verificar el grado de polimerización del papel, para saber la criticidad, y verificar la tendencia de los gases de descomposición como el CO y CO2
0.6 - 0.8	MALO	<p>Programar pruebas eléctricas para la contratación de la evaluación e la posible falla.</p> <p>Existe una falla en el interior de gran impacto, evaluar el tipo de falla con los triángulos de Duval, de acuerdo a la norma IEEE C57.105 2019. Adicionalmente verificar la calidad del aceite y posible peligro de pérdidas dieléctricas del aceite y por último, evaluar el tiempo de vida remanente basado en 2-Fal para la proyección de compra a futuro.</p>
0.8 - 1	MUY MALO	<p>Equipo con riesgo de indisponibilidad.</p> <p>Programar pruebas eléctricas para la contratación de la posible falla.</p> <p>Evaluar el tipo de falla con los triángulos de Duval, de acuerdo a la norma IEEE C57.105 2019. Adicionalmente verificar</p>

la calidad del aceite y posible peligro de perdidas dieléctricas del aceite y por último, evaluar el tiempo de vida remanente basado en 2-Fal para la proyección de compra a pronta o cambio por algún transformador redundante

VI. DISCUSIONES DE RESULTADOS

6.1 Contrastación de los resultados con otros estudios similares.

- Uno de los objetivos de la investigación fue determinar los parámetros necesarios para el desarrollo del índice de salud del activo, bajo esta premisa Castillo y Robles en el año 2022, en su tesis “Evaluación del índice de salud integral basado en sistemas difusos para la gestión del mantenimiento del transformador de distribución de la subestación eléctrica de la sede central SUNAT”, toma como parámetros más importantes los parámetros derivados de los análisis de aceite y tiene resultados favorables, para la determinación del IS. A continuación, se muestra los límites admisibles desarrollados por Castillo y otros.

Figura 6.1 Límites admisibles según Castillo y Robles

Gas (ppm)	Puntuación S_i			
	1	2	3	4
Hidrogeno - H_2	<100	101-700	701-1800	>1800
Metano - CH_4	<120	121-400	401-1000	>1000
Acetileno - C_2H_2	<35	36-50	51-80	>80
Etileno - C_2H_4	<50	51-100	101-200	>200
Etano - C_2H_6	<65	66-100	101-150	>150
Monóxido de carbono - CO	<350	351-570	571-1400	>1400
Dióxido de carbono - CO_2	<2500	2500-4000	4001-10000	>10000

Fuente: Tomado de Castillo Alarcón, y otros, 2022

La contrastación de la presente investigación, yace en el uso de la normativa actualizada para la determinación de los límites admisibles, usando IEEE C57.104 2019, la cual ingresa nuevos conceptos como la relación O_2/N_2 , que no abarca la IEEE C57.104 2006, norma que fue utilizada en el trabajo de investigación de Castillo y Robles.

La presente investigación desarrolla diferentes límites admisibles basados en la actualización de la norma, bibliografía basta y adicionalmente a la experiencia. A continuación, se muestra la tabla de límites admisibles en el ítem de DGA.

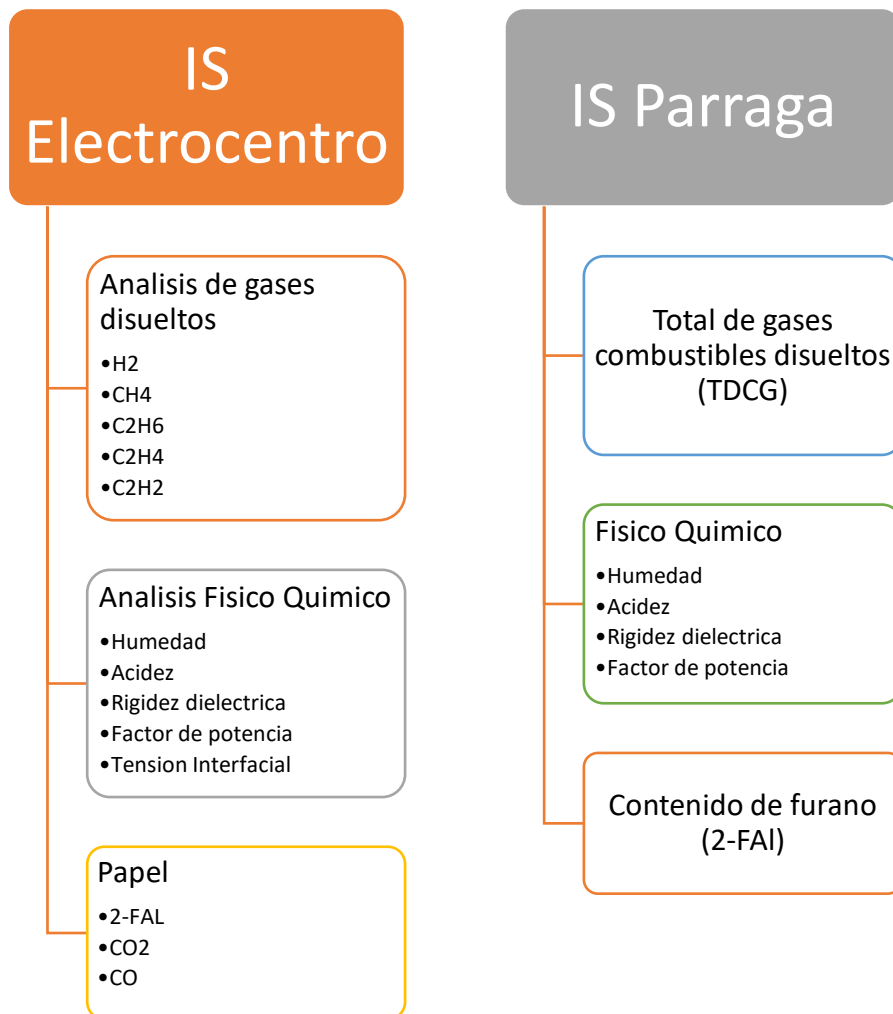
Tabla 6.1 Límites admisibles DGA basado en la norma IEEE C57.104 2019

Gas	1	2	3	4
DGA				
"O ₂ /N ₂ ≤0.2" / "O ₂ /N ₂ >0.2"				
H₂ (ppm)	0-75 / 0-20	76-100 / 21-40	101-200 / 41-90	>200 / >90
CH₄ (ppm)	0-45 / 0-10	46-90 / 11-20	91-150 / 21-50	>150 / >51
C₂H₆ (ppm)	0-30 / 0-7	31-90 / 8- 15	91-175 / 16-40	>175 / >40
C₂H₄ (ppm)	0-25	26-50	51-100	>100
C₂H₂ (ppm)	0-1	1.1-2	2-4 / 2-7	>4 / >7

Nota: La separación por barra significa primero los límites admisibles dados a la relación menor a 0.2 y el otro lado a la relación mayor a 0.2.

- El autor Párraga (2019) en su tesis para la obtención del grado de Maestro en ciencias, con mención en sistemas eléctricos de distribución "El índice de salud y su influencia en la gestión del ciclo de vida de los transformadores del sistema eléctrico de la mina Cobriza". Usaron una aplicación de la metodología difusa para el cálculo del Índice de Salud, teniendo en consideración los datos de entrada, los cuales el autor Parraga uso, el contenido de humedad, la acidez, rigidez dieléctrica (BDV), factor de potencia, gases combustibles disueltos totales (TDCG) y 2- furaldehído. Lo cual la diferencia es el enfoque de los datos de ingreso, ya que la presente investigación utilizó el diagnóstico de gases disueltos (DGA), Análisis Físico Químico (FQ) y Contenido de Furanos (2- FAL). La siguiente imagen describe la diferencia.

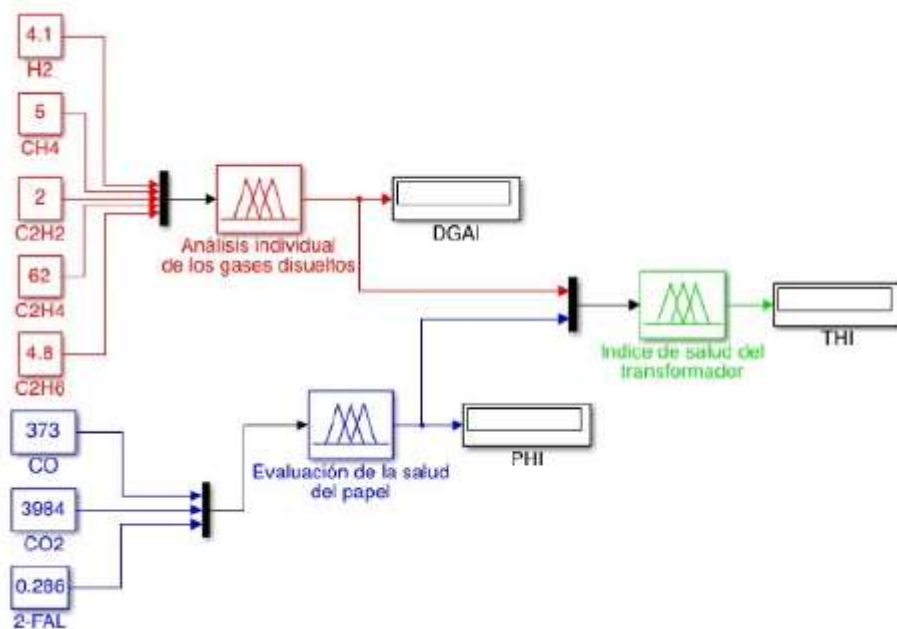
Figura 6.2 Diferencia entre los datos de entrada entre trabajos de investigación



La diferencia entre los dos primeros ítems son distintos ya que, la presente investigación desarrolla el valor de cada uno de los valores de los gases disueltos, a diferencia del autor Párraga, que evalúa la suma de todos los gases. La presente investigación desarrolla un sub índice de DGA y Papel. En el primero se desarrolla los gases disueltos que tienen relación con las partículas que se generan a partir del aceite. En el subíndice de salud de papel, el presente proyecto a diferencia del propuesto por Párraga, se evalúa la condición del papel del transformador mediante los gases de descomposición como CO₂, CO y el análisis de furanos, los cuales conforman el IS Papel.

- Los autores Tariacuri, Aponte y Cadavid (2020) en su artículo “Índice de salud para transformadores de potencia usando el análisis de gases disueltos y 2-FAL”, tal como lo describe en el título de investigación, el autor utilizó los dos indicadores importantes en el análisis de aceite, el análisis de gases disueltos y contenido de furanos. La presente investigación de manera similar también utiliza el análisis de gases disueltos y contenido de furanos, pero de diferentes formas. A continuación, se muestra el esquema desarrollado por Tariacuri, Aponte y Cadavid en su artículo de investigación.

Figura 6.3 Esquema de diagrama de bloques de Simulink



Fuente: Tomado de “Índice de salud para transformadores de potencia usando el análisis de gases disueltos y 2-Fal, 2020”

Se puede observar que los autores realizaron un sistema difuso para obtener los sub índices dados tanto por las variables de diagnóstico de gases disueltos y condición de papel, para al final obtener también mediante un sistema difuso, el índice de salud del transformador. A diferencia de ello, el presente proyecto utilizó una ecuación lineal 4.1 detallada anteriormente, la cual genera los sub índices tanto de DGA y Papel.

- Otro objetivo que se tuvo en la investigación fue el uso de la lógica difusa para determinar el IS del activo, en este contexto Ceron y otros, en su paper titulado “Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos en Aceite Mineral con Voltajes entre 69kV y 230kV usando Lógica Difusa” (2014), Fuzzifica cada uno de sus parámetros basándose en normas como la IEEE C57.104 2008, IEC 60599 2007, mientras que en la presente investigación ejecuta la rusificación una vez calculado el valor de cada sub índice, esto conlleva que a diferencia de lo planteado por Ceron y otros, las reglas de inferencia desarrolladas en la presente investigación son menores en cantidad, ya que al estar calculados en sub índice reduce la programación de reglas expertas por cada uno de los parámetros de cada sub índice.

6.2 Responsabilidad Etica

Yo Anthony Saul Arcos Reyes con DNI 71586580 declaro bajo juramento. Que los datos utilizados en la presente investigación son de uso exclusivo académico y respetando los principios éticos de investigador dado por la universidad Nacional del Callao. Y declaro mi responsabilidad por la información emitida en la presente investigación.

VII. CONCLUSIONES

- La metodología aplicada permitió determinar el índice de salud de los transformadores de potencia de la UN. Huancayo, definiendo los parámetros necesarios para la investigación, para luego determinar las funciones de pertenencia ya que se usó lógica difusa para la determinación del IS, programar, simular y por último tener un cuadro de decisiones. Así cumpliendo el objetivo general de determinar el índice de salud de los TP de la UN. Huancayo.
- Se logro determinar los parámetros a evaluar en la investigación, ya que era una de las partes más importantes. Se determino como parámetros de estudio el medio aislante líquido y medio aislante sólido, los cuales fueron representados con el análisis de gases disueltos (DGA) , Análisis físico-Químico y Análisis de contenido de furanos, los dos primeros como

indicadores del medio aislante líquido, mientras que la medición del contenido de furanos representa el medio aislante sólido que sería el papel. Así cumpliendo el objetivo específico de determinar los parámetros para el Índice de salud del activo.

- Se logró Estimar el IS usando lógica difusa para los 18 transformadores estudiados, ya que se pudo simular en el entorno de Matlab, el índice de salud, programando los puntos y ecuaciones de pertenencia de cada sub índice y también el índice de salud como variable de salida, del mismo modo se logró establecer las reglas de experto para el proceso de inferencia del tipo de lógica difusa escogido (mandani). Así cumpliendo el segundo objetivo específico, de estimar el índice de salud del activo.
- Ya habiendo desarrollado el entorno de programación, se logró implementar la herramienta con satisfacción ya que se introdujeron los datos de los sub índices como variables de entrada, y con las reglas de experto ya programadas, tuvimos como resultado el índice de salud del activo, para los 18 transformadores en estudio. Así cumpliendo con el tercer objetivo específico de implementar el IS de TP usando lógica difusa en la UN. Huancayo.
- Para la comprobación de funcionalidad del método se comparó con el estudio de parte de la empresa que brinda servicio de toma de muestras y análisis de aceite para la empresa Electrocentro, se llegó a observar que en la mayoría de los casos coinciden en la determinación del estado del activo, cabe resaltar que las veces que no se coincido son por sensibilidades de la herramienta, ya que los conceptos de estado del activo son cercanos. Así cumpliendo con el cuarto objetivo específico que sería la validación de la simulación.
- Por último, se tuvo como resultado un cuadro de toma de decisiones, basado en el índice de salud desarrollado, en el cual brinda recomendaciones de que hacer en caso presente alguna las 5 condición en las cuales se ah encasillado el transformador de potencia. Así cumpliendo el ultimo objetivo específico, que es realizar una propuesta de mejoras.

VIII. RECOMENDACIONES

- El índice de salud desarrollado en la presente investigación, cuenta con una base teoría y criterio experto basta, que llega a desembocar en una buena determinación de la condición, pero se recomienda, agregar algunos parámetros de operación, tales como la carga a la cual esta expuesta el transformador, un criterio de criticidad por las pérdidas económicas que puede significar y por último considerar las pruebas eléctricas que se les desarrolla ca da uno de los transformadores.
- La norma técnica IEEE C57.104 2019, la cual ha servido de referente para la presente investigación, considera la relación de O₂ y N₂, tal como se ha considerado la presente investigación. Sin embargo, la misma norma también utiliza el concepto de edad del activo para los limites admisibles de los transformadores, se recomienda profundizar en ese detalle, ya que volvería a la herramienta más sensible y sensata.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acercamiento al cálculo de índice de salud de transformadores de fuerza en Cuba. **MONTANÉ GARCIA, Jorge Juan, HERNÁNDEZ AREU, Orestes Nicolás y DEL CASTILLO SERPA, Alfredo Juan. 2021.** La Habana : Tecnológica de Costa Rica, Diciembre de 2021, Tecnología en Marcha, Vol. 34, págs. 34-47. E-2215-3241.

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO PARA TIERRAS FULLER CONTAMINADAS CON ACEITE DIELECTRICO. **DURAN RINCON, Melvin y CONTRERAS, Nelson. 2006.** 32, Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, Diciembre de 2006, Scientia et Technica, Vol. III, págs. 419-424. ISSN 0122-1701.

Análisis de gases disueltos para monitoreo y diagnóstico de transformadores de fuerza en servicio. **CRESPO SÁNCHEZ, Gustavo. 2015.** 2, La Habana : Ingeniería Energética, agosto de 2015, Ingeniería Energética, Vol. XXXVI, págs. 180-189. ISSN 1815- 5901.

BERNAL, César. 2010. *Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales.* [ed.] Orlando Fernández Palma. Tercera. Bogotá : PEARSON EDUCACIÓN, 2010. ISBN: 978-958-699-128-5.

CASTILLO ALARCÓN, Julio César y ROBLES CAMONES, Lavoissier Alex. 2022. *Evaluación del índice de salud integral basado en sistemas difusos para la gestión del mantenimiento del transformador de distribución de la subestación eléctrica de la sede central SUNAT.* Escuela de Ingeniería Eléctrica y de Potencia, Universidad Tecnológica del Perú. Lima : Repositorio institucional de la Universidad Tecnológica del Perú, 2022. Tesis de titulación.

Chemicoil R&D. 2020. *schutzls. schutzls.com.* [En línea] Schutz Industrial lubricants & Specialties, 28 de Octubre de 2020. [Citado el: 21 de Abril de 2024.] <https://schutzls.com/chemicoilrd/aceites-dielectricos/contenido-de-agua-astm->

Enel Colombia SA ESP. 2022. Enel Colombia SA ESP. *Enel Colombia SA ESP.* [En línea] Enel Colombia SA ESP, 2022. [Citado el: agosto de 8 de 2024.] <https://www.enelx.com/co/es/empresas/business-solutions/mantenimiento-instalaciones/analisis-aceites>.

Envejecimiento del aceite dielectrico Acidez o numero de neutralización.

PERDOMO BONALDE, Hector José. 2023. Santiago : Servicios Elehptronn Spa, febrero de 2023, Servicios Elehptronn Spa, págs. 1-4.

Evaluación de los estándares ASTM D877 y ASTM D1816 para determinar la tensión de ruptura dieléctrica a frecuencia industrial en aceites aislantes.

ALFONSO GONZÁLES, Fabio, y otros. 2022. Colombia : Unidades Tecnológicas de Santander, 2022. CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERÍA (INGENIO 2022).

Fuzzy Logic and Expert Knowledge in the Management of the life cycle of Power transformers of the Cobriza Mine. **CHAUCA, Mario Bernabe, y otros. 2019.** Lima : LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, And, 2019. LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, And. Vol. 17. ISBN: 978-0-9993443-6-1.

I. Galindo, R. García y E. Martínez. 2010. *Sistema vía web para la gestión de capacitación de lacasa de cultura Frida Kahlo.* Ciudad de Mexico : Instituto Politécnico Nacional, 2010.

IEEE Power and Energy Society. 2016. *C57.106-2015 - IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment.* s.l. : IEEE, 2016. 978-1-5044-0097-8.

—. **2016.** *IEEE C57.106 2015 Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment.* New York : IEEE, 2016.

IEEE Standards Association. 2017. *IEEE Guide for Evaluation and Reconditioning of Liquid Immersed Power Transformers.* New York : IEEE, 2017. págs. 1-88. 10016-5997.

Índice de salud para transformadores de potencia usando el analisis de gases disueltos y 2-Fal. **TARIACURI QUENGUAN, Jonathan Alexander, CADAVID,**

Hector y APONTE, Guillermo. 2020. 1, Bogota : e- Gnosis, 15 de Enero de 2020, e-Gnosis, Vol. 18. ISSN: 1665-5745.

Information and control. Fuzzy sets. **ZADEH, Lofti. 1971.** 4, Los Angeles : The Journal of Symbolic Logic, 12 de marzo de 1971, The Journal of Symbolic Logic, Vol. 38, págs. 177-200.

Integración de la lógica difusa a la dinámica de sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas. **MARTINEZ ROJAS, Natalia y ANDRADE SOSA, Hugo Hernando. 2016.** 6, Bucaramanga : Revista Elementos, 27 de Mayo de 2016, Universidad Industrial de Santander, Vol. 6, págs. 149-166. ISSN-e 2248-5252.

Introducción al razonamiento aproximado: Lógica Difusa. **De Vito, Eduardo Luis, D'NEGRI, Carlos Eduardo y DE VITO, EDUARDO LUIS. 2006.** 3, Buenos Aires : Asociación Argentina de Medicina Respiratoria, diciembre de 2006, Revista Americana de Medicina Respiratoria, Vol. 6, págs. 126-136. ISSN: 1852-1630.

Investigación aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria. **LOZADA, José. 2014.** [ed.] Universidad Tecnológica Indoamérica. 1, Quito : s.n., diciembre de 2014, CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica, Vol. 3, págs. 34-39. ISSN-e 1390-9592.

Life of transformer. **DOBLE. 2008.** Orlando : Orlando Eng, 2008.

Lifeder. 2022. Lifeder. *www.lifeder.com*. [En línea] Lifeder, 31 de Agosto de 2022. [Citado el: 21 de Abril de 2024.] <https://www.lifeder.com/metodo-cuantitativo/>.

LINARES ESCOBAR, Javier Andrés. 2009. *DISEÑO DE SUBESTACIONES DE MEDIA TENSIÓN.* Escuela de ingeniera Electrica, Universidad Autonoma de Occidente. Santiago de Cali : Universidad Autonoma de Occidente Facultad de Ingenieria Departamento de Energetica y Mecanica, 2009. Tesis de grado.

Lógica difusa para la toma de decisiones y la selección de personal. **RUVALCABA COYASO, Francisco Javier y VERMONDEN, Anais. 2015.** 29, Bogotá : Universidad del Rosario, diciembre de 2015, Revista Universidad y Empresa, Vol. 17, págs. 239-256. ISSN: 0124-4639.

Mantenimiento Proactivo de transformadores. **LANTOS, Esteban. 2010.** 1, Buenos Aires : TBN- Ingeniería de Mantenimiento Industrial y Servicios Integrales de Lubricación, S.L., Diciembre de 2010, Ingeniería del Mantenimiento, Vol. II, págs. 6-10.

Metodología para Evaluar la Condición de Transformadores Eléctricos de Potencia Basada en un Índice de Salud. **NUÑEZ MATA, Oscar, y otros. 2023.** 1, San José : Ingeniería, Junio de 2023, Ingeniería, Vol. 33. ISSN 2215-2652.

—. **Núñez Mata, Óscar, y otros. 2023.** 1, San José : Escuela de Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica, Enero de 2023, Ingeniería, Vol. 33, págs. 48-65. ISSN 2215-2652.

NAUPAS PAITÁN, Humberto, y otros. 2018. *Metodología de la investigación Cuantitativa-Cualitativa y Redacción de la Tesis.* quinta. Bogotá : Ediciones de la U, 2018. ISBN 978-958-762-876-0.

PARRAGA ACOSTA, Jose Carmelo. 2019. El índice de salud y su influencia en la gestión del ciclo de vida de los transformadores del sistema eléctrico de la mina Cobriza. *Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Centro.* [En línea] agosto de 2019. [Citado el: 21 de Abril de 2024.] <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5174>.

PICKSTER, Keri. 2015. *Determination of Probability of Failure of Power Transformers using Statistical Analysis.* Faculty of Engineering and the Built Environment, University of the Witwatersrand. Johannesburg : University of the Witwatersrand, 2015. Tesis de grado.

Ricardo, Rodrigo. 2020. Estudyando. *estudyando.com.* [En línea] Estudyando, 21 de Septiembre de 2020. [Citado el: 21 de Abril de 2024.] <https://estudyando.com/investigacion-experimental-y-no-experimental-diferencias-ventajas-y-desventajas/>.

Robles Camones, Lavoissier Alex y Castillo Alarcón, Julio César. 2022. *Evaluación del índice de salud integral basado en sistemas difusos para la gestión del mantenimiento del transformador de distribución de la subestación eléctrica de la sede central SUNAT.* Lima : s.n., 2022.

Rodriguez, Astrid Yomila Ramirez. 2018. *EVALUACIÓN DE LA SALUD DE ACTIVOS DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE LAS*

SUBESTACIONES DEL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ.
Escuela de ciencias aplicadas e ingeniería, Universidad EAFIT. Medellín :
Universidad EAFIT, 2018. Tesis de maestría.

ROSS, Timothy. 2004. *FUZZY LOGIC WITH ENGINEERING APPLICATIONS.*
Segunda. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2004. ISBN 0-470-86074-X.

Rus Arias, Enrique. 2021. Economipedia.com. *Economipedia.com.* [En línea]
Economipedia, 5 de Febrero de 2021. [Citado el: 21 de Abril de 2024.]
<https://economipedia.com/definiciones/investigacion-descriptiva.html>.

STESEPANETS, Anastasia. 2024. Ganttpro. *blog.ganttpro.com.* [En línea]
Ganttpro, 17 de Enero de 2024. [Citado el: 21 de Abril de 2024.]
<https://blog.ganttpro.com/es/metodologia-de-cascada/#que-es-waterfall>.

T&D Electric. 2022. tydelectric. *tydelectric.com.* [En línea] 4 de Noviembre de
2022. [Citado el: 15 de Abril de 2024.] <https://tydelectric.com/partes-transformador-potencia/>.

TAMAYO, Jesús, y otros. 2016. *La industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país.* Lima : Osinergmin, 2016.
ISBN: 978-612-47350-0-4.

TECSA. 2020. tecsaqro. *www.tecsaqro.com.mx.* [En línea] TECSA, 27 de
Noviembre de 2020. [Citado el: 16 de Abril de 2024.]
<https://www.tecsaqro.com.mx/blog/analisis-de-aceite-para-transformadores/>.

Todo sobre la lubricación de las turbinas y su mantenimiento a través del análisis del aceite. **TERRADILLOS, Jesús. 2003.** 2, s.l. : Ingeniería y gestión de
mantenimiento: una nueva visión del mantenimiento, Marzo de 2003,
WEARCHECK IBERICA, Vol. 32, págs. 59-67.

Transequipos S.A. 2021. transequipos. *transequipos.com.* [En línea]
Transequipos, 27 de Enero de 2021. [Citado el: 27 de Abril de 2024.]
<https://transequipos.com/la-tension-interfacial-y-su-importancia-dentro-del-analisis-fisicoquimico/>.

TWENERGY. 2019. twenergy. *twenergy.com.* [En línea] 31 de Octubre de 2019.
[Citado el: 31 de Abril de 2024.] <https://twenergy.com/energia/energia-electrica/que-son-las-subestaciones-electricas/>.

Urquijo Pastrana, Leidy. 2020. strategy. *www.strategy.com.co*. [En línea] 28 de Julio de 2020. [Citado el: 20 de Abril de 2024.] <https://www.strategy.com.co/salud-de-activos-gestion-optima/>.

US ARMY CORPS OG ENGINEERS. 1998. *TM 5-686 Power Transformer Maintenance And Acceptance Testing*. US Army Corps of Engineers. Washington DC : s.n., 1998.

Vargas, Johan. 2020. Ingeniería de Subestaciones. *IDS Ingeniería de Subestaciones*. [En línea] 27 de Septiembre de 2020. [Citado el: 15 de Abril de 2024.] <https://ingenieriadesubestaciones.com/equipos-electricos-primarios-de-una-subestacion-electrica/#:~:text=El%20transformador%20de%20poder%20es,un%20circuito%20de%20corriente%20alterna..>

Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte I. Correlación entre la vida y la temperatura. **FLORES, Wilfredo, y otros. 2007.** 1, s.l. : IEEE Latin America Transactions, Marzo de 2007, IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, Vol. V, págs. 50-54.

X. ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

Problema General	Objetivo General	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>¿Cómo determinar el índice de salud de transformadores de potencia a partir de análisis de aceite usando Lógica Difusa en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021?</p> <p>Problemas específicos</p> <p>¿Cuáles son los parámetros para determinar el índice de salud de los transformadores de potencia a partir del análisis de aceite en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021?</p> <p>¿De qué manera desarrollamos una metodología para la estimación del índice de salud a partir del análisis de aceite usando lógica difusa en la unidad de negocios</p>	<p>Determinar el índice de salud de transformadores de potencia partir del análisis de aceite usando lógica difusa en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021</p> <p>Objetivos específicos</p> <p>Determinar los parámetros del índice de salud de los transformadores de potencia a partir del análisis de aceite en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021</p> <p>Estimar el índice de salud con lógica difusa a partir del análisis de aceite en la unidad de negocios Huancayo de la empresa Electrocentro, 2021</p>	No aplica.	<p>Índice de Salud</p> <p>Dimensiones: Parámetros de IS Estimación del IS Clasificación de IS Validación de IS Propuesta de mejora basado en el IS</p>	<p>Tipo Aplicada</p> <p>Enfoque Cuantitativo</p> <p>Nivel Descriptivo</p> <p>Diseño No Experimental</p> <p>Población Unidad de Negocio Huancayo</p> <p>Muestra Transformadores de potencia de la Unidad de Negocio Huancayo</p> <p>Técnica</p>

Huancayo de la empresa
Electrocentro, 2021?

Análisis de
documentos

**Análisis y
Procesamiento de
datos**

Lógica Difusa-Matlab

¿Cómo implementar la metodología
para la estimación del índice de
salud con lógica difusa a partir del
análisis de aceite en la unidad de
negocios Huancayo de la empresa
Electrocentro, 2021?

implementar el índice de salud
con lógica difusa a partir del
análisis de aceite en la unidad de
negocios Huancayo de la
empresa Electrocentro, 2021

¿Cómo realizar la validación de la
simulación de la metodología
propuesta para determinar el IS a
partir del análisis de aceite en la
UN Huancayo?

Realizar la validación de la
simulación de la metodología
propuesta que determine el IS a
partir del análisis de aceite en la
UN Huancayo

¿Como realizar una propuesta de
mejora del mantenimiento basado
en el IS de los TP a partir del

Realizar una propuesta de mejora
del mantenimiento basado en el
IS de los TP a partir del análisis
de aceite en la UN Huancayo

análisis de aceite en la UN

Huancayo?

Anexo 2: Reglas de Experto

Tabla 10.1 Reglas de Experto para programar

Nº	Regla experta
1	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is BUENO then IS is MUY_BUENO
2	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is BUENO
3	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is OBSERVADO
4	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
5	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is BUENO then IS is BUENO
6	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is BUENO
7	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MALO
8	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
9	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is BUENO then IS is OBSERVADO
10	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is OBSERVADO
11	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MALO
12	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
13	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is BUENO then IS is OBSERVADO
14	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is OBSERVADO
15	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MALO
16	If IS_FQ is BIEN and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
17	If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is BUENO then IS is BUENO
18	If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is BUENO
19	If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is OBSERVADO
20	If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
21	If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is BUENO then IS is BUENO

-
- 22 If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is OBSERVADO
 - 23 If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MALO
 - 24 If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
 - 25 If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is BUENO then IS is OBSERVADO
 - 26 If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is OBSERVADO
 - 27 If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MALO
 - 28 If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
 - 29 If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is BUENO then IS is MALO
 - 30 If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is MALO
 - 31 If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MUY_MALO
 - 32 If IS_FQ is ASEPTABLE and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
 - 33 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is BUENO then IS is OBSERVADO
 - 34 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is OBSERVADO
 - 35 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MALO
 - 36 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
 - 37 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is BUENO then IS is OBSERVADO
 - 38 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is OBSERVADO
 - 39 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MALO
 - 40 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
 - 41 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is BUENO then IS is MALO
 - 42 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is MALO
 - 43 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MUY_MALO
 - 44 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
 - 45 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is BUENO then IS is MALO
-

-
- 46 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is MALO
- 47 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MUY_MALO
- 48 If IS_FQ is OBSERVADO and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
- 49 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is BUENO then IS is OBSERVADO
- 50 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is MALO
- 51 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MUY_MALO
- 52 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is BIEN and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
- 53 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is BUENO then IS is OBSERVADO
- 54 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is OBSERVADO
- 55 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MUY_MALO
- 56 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is ASEPTABLE and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
- 57 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is BUENO then IS is MALO
- 58 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is MALO
- 59 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MUY_MALO
- 60 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is OBSERVADO and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
- 61 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is BUENO then IS is MALO
- 62 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is ASEPTABLE then IS is MALO
- 63 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is OBSERVADO then IS is MUY_MALO
- 64 If IS_FQ is EN_FALLA and IS_DGA is EN_FALLA and IS_PAPEL is EN_FALLA then IS is MUY_MALO
-

Anexo 3: Valores de ítem DGA.

Tabla 10.2 Valores ítem de DGA

N.º	SUBESTACION	O2/N2	H2	CH4	C2H6	C2H4	C2H2
1	MACHU	0.15	23	9	11	43	0
2	HUAYUCACHI	0.32	880	33	12	19	0
3	HUANCAYO ESTE	0.16	76	11	0	0	0
4	HUANCAYO ESTE	0.38	0	0	0	0	0
5	SALESIANOS	0.10	12	30	48	8	0
6	SALESIANOS	0.36	7	0	0	38	0
7	CHALA NUEVA	0.29	0	0	0	0	0
8	INGENIO	0.33	6	0	0	3	0
9	MACHU	0.37	0	0	0	0	0
10	CONCEPCION	0.25	23	0	0	0	0
11	CHUPACA	0.08	0	72	146	5	0
12	COMAS	0.30	0	0	0	22	0
13	HUAYUCACHI	0.34	0	7	0	0	0
14	PARQUE INDUSTRIAL	0.34	0	0	0	3	0
15	PARQUE INDUSTRIAL	0.33	21	0	0	0	0
16	PARQUE INDUSTRIAL	0.21	0	7	0	0	0
17	PARQUE INDUSTRIAL	0.36	0	0	0	0	0
18	CHUMPE	0.18	67	9	9	8	0

Anexo 4: Valores de ítem Físico Químico.

Tabla 10.3 Valores de ítem Físico Químico

N.º	SUBESTACION	H2O	NN	RD	TT	FP (25º) (%)	FP (100º) (%)
1	MACHU	34	0.17	40.5	20.6	0.123	7.23
2	HUAYUCACHI	20	0.02	47.2	37.5	0.049	1.81
3	HUANCAYO ESTE	10	0.02	69.1	36.1	0.043	1.31
4	HUANCAYO ESTE	7	0.01	68.8	42.6	0.004	0.21
5	SALESIANOS	8	0.01	71.1	38.2	0.117	1.62
6	SALESIANOS	12	0.04	64.7	35.5	0.079	2.76
7	CHALA NUEVA	14	0.02	72.4	36.3	0.05	1.49
8	INGENIO	18	0.01	57.4	40	0.051	1.25
9	MACHU	9	0.01	69.5	48.1	0.023	0.38
10	CONCEPCION	10	0.01	68.9	49	0.018	1.03
11	CHUPACA	10	0.01	63.9	36.7	0.133	1.85
12	COMAS	13	0.02	71.2	34.8	0.048	2.07
13	HUAYUCACHI	13	0.01	60.1	37.9	0.014	1.02
14	PARQUE INDUSTRIAL	13	0.05	68	32.1	0.86	3.35
15	PARQUE INDUSTRIAL	7	0.01	60.1	39.6	0.01	0.31
16	PARQUE INDUSTRIAL	6	0.01	72.1	47.6	0.001	0.07
17	PARQUE INDUSTRIAL	9	0.01	63	41.6	0.022	0.68
18	CHUMPE	7	0.07	67.1	21.7	0.252	5

Anexo 5: Valores de ítem Papel.

Tabla 10.4 Valores de ítem Físico Químico

Nº	SUBESTACION	O2/N2	2-FAL	CO	CO2
1	MACHU	0.15	0.598	153	1706
2	HUAYUCACHI	0.32	0.258	155	1028
3	HUANCAYO ESTE	0.16	0.05	117	711
4	HUANCAYO ESTE	0.38	0.05	152	1158
5	SALESIANOS	0.10	0.05	252	1393
6	SALESIANOS	0.36	0.225	183	1256
7	CHALA NUEVA	0.29	0.05	84	645
8	INGENIO	0.33	0.05	67	2000
9	MACHU	0.37	0.05	42	432
10	CONCEPCION	0.25	0.05	308	1309
11	CHUPACA	0.08	0.05	323	3800
12	COMAS	0.30	0.05	186	1273
13	HUAYUCACHI	0.34	0.05	213	1900
14	PARQUE INDUSTRIAL	0.34	0.135	139	468
15	PARQUE INDUSTRIAL	0.33	0.05	196	1180
16	PARQUE INDUSTRIAL	0.21	0.05	477	1588
17	PARQUE INDUSTRIAL	0.36	0.05	52	608
18	CHUMPE		0.05	282	

Anexo 6: Sub Índices de Salud.

Tabla 10.5 Resultados de Sub Índices de Salud

Nº	SUBESTACION	IS FQ	IS DGA	IS PAPEL
1	MACHU	31.48	6.48	5.14
2	HUAYUCACHI	12.98	21.98	4.64
3	HUANCAYO ESTE	8.39	3.21	1.98
4	HUANCAYO ESTE	4.51	0.00	2.95
5	SALESIANOS	7.75	6.12	3.00
6	SALESIANOS	12.13	4.68	4.93
7	CHALA NUEVA	8.54	0.00	2.10
8	INGENIO	9.67	1.05	2.95
9	MACHU	3.88	0.00	1.65
10	CONCEPCION	4.39	0.38	4.18
11	CHUPACA	9.89	11.15	4.56
12	COMAS	9.37	2.20	3.28
13	HUAYUCACHI	8.49	1.75	3.92
14	PARQUE INDUSTRIAL	22.91	0.30	3.86
15	PARQUE INDUSTRIAL	6.74	0.13	3.28
16	PARQUE INDUSTRIAL	2.64	1.75	6.79
17	PARQUE INDUSTRIAL	6.55	0.00	1.85
18	CHUMPE	19.39	4.28	2.45

Anexo 7: Membership Function Editor

Figura 10.1 Edición de límites de membresía de IS_DGA

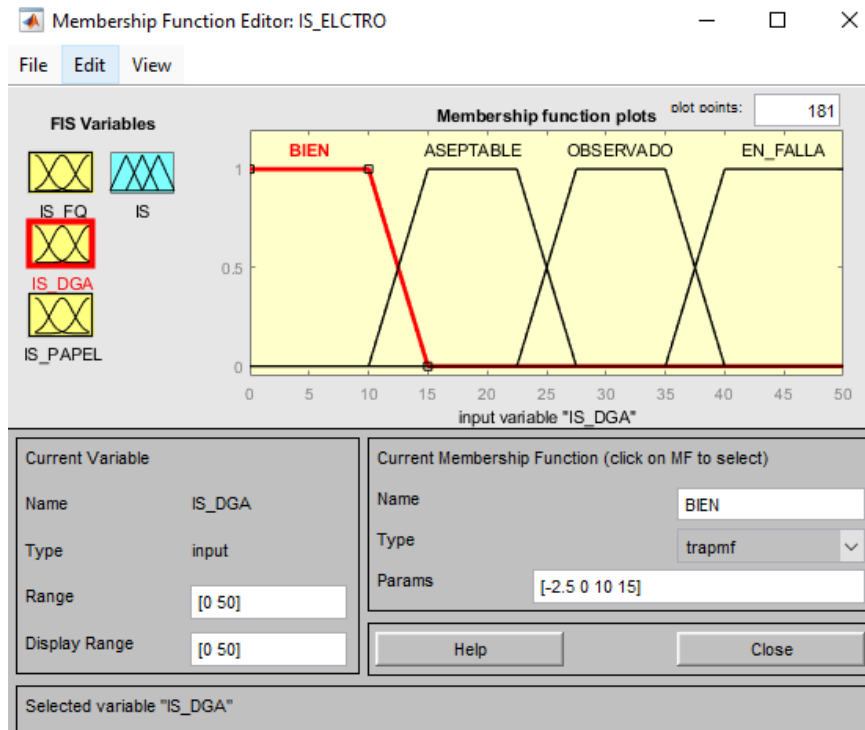
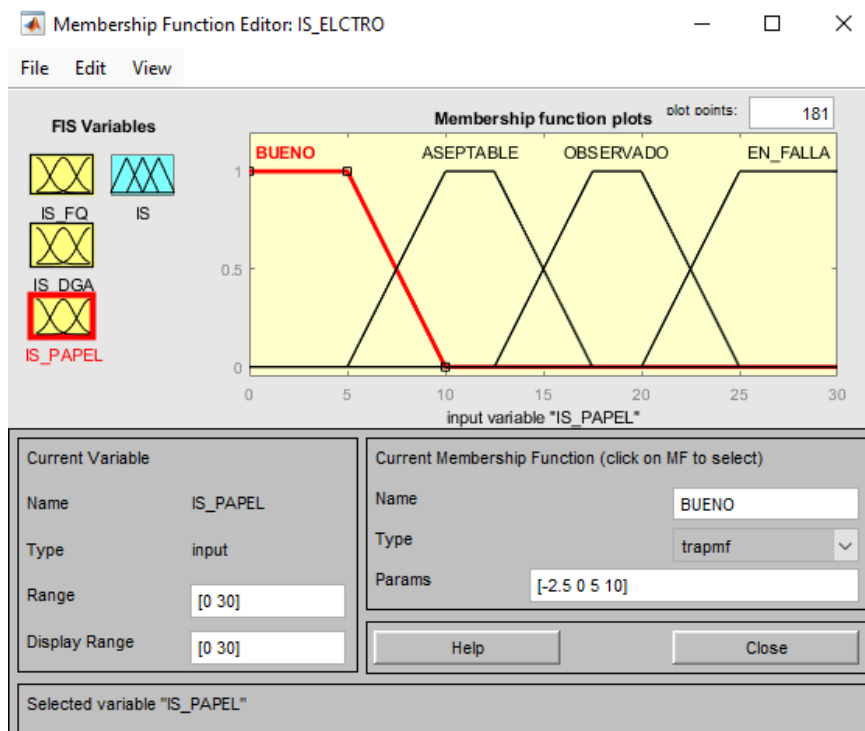


Figura 10.2 Programación de los puntos de membresía IS_PAPEL



Anexo 8: Propuesta de mejora

Tabla 10.6 Sectorización de condiciones

IS	CONDICION	DESCRIPCION
0 – 0.2	MUY BUENO	Los parámetros del TP están dentro de los límites correctos. Continuar con los análisis de aceite a frecuencia normal.
0.2 – 0.4	BUENO	Los parámetros están dentro de lo aceptable. Continuar con los análisis de aceite a frecuencia normal.
0.4 - 0.6	OBSERVADO	Uno o más parámetros están fuera de los límites admisibles. Si la observación se encuentra en: <ul style="list-style-type: none">• IS DGA: Usar los triángulos de Duval para la determinación de la posible falla insipiente según IEEE C57.104 2019.• IS FQ: Verificar si la Rigidez dieléctrica y/o Contenido de humedad no cumple con los límites admisibles, consultar IEEE C57 637• IS 2-FAL: Verificar el grado de polimerización del papel, para saber la criticidad, y verificar la tendencia de los gases de descomposición como el CO y CO2
0.6 - 0.8	MALO	Programar pruebas eléctricas para la contratación de la evaluación e la posible falla. Existe una falla en el interior de gran impacto, evaluar el tipo de falla con los triángulos de Duval, de acuerdo a la norma IEEE C57.105 2019. Adicionalmente verificar la calidad del aceite y posible peligro de pérdidas dieléctricas del aceite y por último, evaluar el tiempo de vida remanente basado en 2-Fal para la proyección de compra a futuro.

0.8 - 1	MUY MALO	<p>Equipo con riesgo de indisponibilidad.</p> <p>Programar pruebas eléctricas para la contratación de la posible falla.</p> <p>Evaluar el tipo de falla con los triángulos de Duval, de acuerdo a la norma IEEE C57.105 2019. Adicionalmente verificar la calidad del aceite y posible peligro de pérdidas dieléctricas del aceite y por último, evaluar el tiempo de vida remanente basado en 2-Fal para la proyección de compra a pronta o cambio por algún transformador redundante</p>
----------------	-----------------	--

Anexo 9: Autorización de uso de datos

Autorización del uso de Datos

Yo Marcos Mallqui Alcocer identificado con DNI 19936286 en mi calidad de Jefe de Transmisión del Mantenimiento de Transmisión área de la empresa/institución Electrocentro S.A. con RUC N° 20129646099 ubicada en la ciudad de Huancayo.

OTORGO LA AUTORIZACIÓN

Al señor Anthony Saul Arcos Reyes identificado con DNI N° 71586580, bachiller de la escuela profesional de ingeniería en Energía, que utilice la siguiente información de la empresa:

- Análisis de aceite de transformadores del área de mantenimiento transmisión 2021, 2022 y 2023

con la finalidad de que pueda desarrollar su Tesis para optar el Título Profesional.

Indicar si el Representante que autoriza la información de la empresa, solicita mantener el nombre o cualquier distintivo de la empresa en reserva, marcando con una "X" la opción seleccionada.

- Mantener en Reserva el nombre o cualquier distintivo de la empresa; o
- Mencionar el nombre de la empresa.

Ing. Marcos Mallqui Alcocer
DE UNIDAD MANTENIMIENTO TRANSMISIÓN
ELECTROCENTRO S.A.



Firma y sello del Representante Legal
DNI: 19936286

El Bachiller declara que los datos emitidos en esta carta y en el Trabajo de Investigación, en la Tesis son auténticos. En caso de comprobarse la falsedad de datos, el bachiller será sometido al inicio del procedimiento disciplinario correspondiente; asimismo, asumirá toda la responsabilidad ante posibles acciones legales que la empresa, otorgante de información, pueda ejecutar.



Firma del Bachiller
DNI: 71586580