



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE
FALLA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA MEDIANTE
LÓGICA DIFUSA**

Proyecto de investigación presentado previo a la obtención del título de
Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Chiliquinga Sampedro Kevin Israel

TUTOR:

Ing. Castillo Fiallos Jessica Nataly Ms.C

LATACUNGA, ABRIL 2024



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, **Chiliquinga Sampedro Kevin Israel**, con cédula de ciudadanía No. 050435886-2, declaro ser autor del presente proyecto de investigación **“ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FALLA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA MEDIANTE LÓGICA DIFUSA”**, siendo la **Ing. Castillo Fiallos Jessica Nataly Ms.C.** tutora del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, agosto 2024

Chiliquinga Sampedro Kevin Israel

C.C. 050435886-2



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutora del Trabajo de Investigación sobre el título:

“ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FALLA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA MEDIANTE LÓGICA DIFUSA”, de **Chiliquinga Sampedro Kevin Israel**, de la carrera de **Ingeniería Eléctrica**, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico - técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, agosto 2024

La Tutora



Firmado electrónicamente por:
JESSICA NATALY
CASTILLO FIALLOS

Ing. Castillo Fiallos Jessica Nataly Ms.C

C.C. 060459021-6



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**; por cuanto, el postulante **Chiliquina Sampedro Kevin Israel** con el título de Proyecto de titulación: **“ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FALLA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA MEDIANTE LÓGICA DIFUSA”** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúnen los méritos suficientes para ser sometidos al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar el CD correspondiente, según la normativa institucional.

Latacunga, Agosto 2024

Para constancia firman:

Lector 1
Ing. Rueda Flores Walter Paul
CC: 050368989-5

Lector 2
Ing. Corrales Bastidas Byron Paul
CC: 0502347768

Lector 3
Ing. Salazar Achig Edgar Roberto
CC: 050284761-9

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi guía y darme la fuerza necesaria para superar cada desafío.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, por formar profesionales que representan el futuro de un nuevo Ecuador.

A las autoridades y docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica, por su valiosa contribución al desarrollo técnico y humanístico de una juventud llena de sueños, comprometida con la construcción de un mejor país.

Un agradecimiento especial a la Ing. Jessica Castillo, una excelente tutora, cuya guía y sabiduría reflejan su calidad como ser humano.

Israel Sampedro

DEDICATORIA

En la vida, cada final marca un nuevo comienzo. Hoy, Dios me brinda la oportunidad de reconocer a las personas que son especiales para mí. A mi madre Carolina, mi razón de ser, con quien he enfrentado cada obstáculo; espero, cada día, hacerte sentir orgullosa. A mi papi Juan, quien llegó para protegerme y cuidarme. A mi hermana Marilin, cuyo carácter y ocurrencias hacen que nuestro hogar sea perfecto.

A los que nos cuidan desde el cielo, mi primo Adrian, mi abuelita Rosa, y mis queridos perritos Peluche y Mateo. Los amo profundamente y siempre los recordaré. A mis tíos, primos y toda mi familia, por ser mi pilar incondicional.

A mi mentor de corazón, Edison, por su apoyo constante y su orientación, que ha sido clave en mi desarrollo personal y a mis aliados incondicionales Arturo, Roberto y Edith.

Israel

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FALLA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA MEDIANTE LÓGICA DIFUSA

Autor:

Chiliquinga Sampedro Kevin Israel

RESUMEN

La presente investigación se enfoca en la identificación de fallas térmicas y eléctricas en el transformador de potencia, que son el núcleo de la subestación y operan de manera continua. El diagnóstico de las fallas en el convertidor eléctrico representa un desafío, ya que tradicionalmente es necesario interrumpir su operación para detectar anomalías internas. Para evitar estas interrupciones, la forma más eficaz de predecir fallas sin detener el equipo es mediante el análisis de la degradación del aceite dieléctrico, este proceso produce gases como hidrógeno, metano, etileno, acetileno y etano, cuyas concentraciones son indicadores clave de posibles fallas.

La identificación de fallas en la máquina estacionaria se lleva a cabo mediante el análisis de gases utilizando el método de Rogers o el método IEC, unificados con la lógica difusa, se convierte en una herramienta de mantenimiento predictivo permitiendo detectar fallas con precisión y corregirlas en el corto plazo, lo que facilita la intervención directa del personal de mantenimiento en problemas específicos como la humedad en el papel aislante, soldaduras defectuosas, cortocircuitos entre devanados o sobrecalentamientos, identificada la falla, el personal de mantenimiento puede prepararse adecuadamente con los materiales, equipos y herramientas necesarios, lo que reduce significativamente el tiempo de inactividad del transformador.

El uso de lógica difusa ha demostrado alta precisión en la detección de anomalías, permitiendo determinar si el transformador opera en condiciones normales o presenta fallas como sobrecalentamiento, arcos eléctricos o descargas parciales. El modelo difuso de Rogers alcanza una precisión del 92 %, mientras que el método IEC difuso la supera con un 94.8 %, mostrando una mayor eficacia en la detección de anomalías en situaciones reales.

Palabras claves: Transformador, Análisis de gases disueltos, Fallas incipientes, Norma IEC, Método de Rogers y Lógica difusa.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**TITLE: ANALYSIS OF DISSOLVED GASES FOR THE IDENTIFICATION OF
FAULTS IN POWER TRANSFORMERS BY MEANS OF FUZZY LOGIC**

Author:

Chiliquinga Sampedro Kevin Israel

ABSTRACT

This research focuses on the identification of thermal and electrical faults in the power transformer, which are the core of the substation and operate continuously. The diagnosis of faults in the electrical converter represents a challenge, since traditionally it is necessary to interrupt its operation to detect internal anomalies. To avoid these interruptions, the most effective way to predict failures without shutting down the equipment is by analyzing the degradation of the dielectric oil, this process produces gases such as hydrogen, methane, ethylene, acetylene and ethane, whose concentrations are key indicators of possible failures.

The identification of faults in the stationary machine is carried out by gas analysis using the Rogers method or the IEC method, unified with fuzzy logic, becomes a predictive maintenance tool allowing to detect faults accurately and correct them in the short term, this facilitates the direct intervention of maintenance personnel in specific problems such as moisture in the insulating paper, defective welds, short circuits between windings or overheating. Once the fault is identified, the maintenance personnel can be adequately prepared with the necessary materials, equipment and tools, which significantly reduces transformer downtime.

The use of fuzzy logic has demonstrated high accuracy in the detection of anomalies, allowing to determine whether the transformer operates under normal conditions or presents faults such as overheating, arcing or partial discharges. Rogers' fuzzy model achieves an accuracy of 92 %, while the fuzzy IEC method exceeds it with 94.8 %, showing a higher efficiency in the detection of anomalies in real situations.

Key words: Transformer, Dissolved gas analysis, Incipient faults, IEC standards, Rogers' method and Fuzzy logic.

ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
2.1. El problema	3
2.2. Situación Problemática	3
2.3. Formulación del problema.....	4
2.4. Objeto y campo de acción	4
2.4.1. Objeto de Investigación:	4
2.4.2. Campo de Acción:	4
2.5. Beneficiarios.....	4
2.5.1. Directo	4
2.5.2. Indirecto	4
2.6. Justificación.....	4
2.7. Hipótesis	5
2.8. Objetivos.....	5
2.8.1. General.....	5
2.8.2. Específicos	5
2.9. Sistemas de tareas	6
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
3.1. Antecedentes.....	7
3.2. Transformador eléctrico	7
3.2.1. Pruebas eléctricas en el transformador	8
3.2.2. Resistencia de aislamiento	8
3.2.3. Prueba de corriente de excitación	9
3.2.4. Prueba de relación de transformación.....	9
3.2.5. Prueba de resistencia (DC) de devanados	9

3.2.6.	Pruebas de reactancia de fuga o corriente de cortocircuito.....	9
3.2.7.	Termografía.	10
3.3.	Aceite del transformador	11
3.3.1.	Propiedades del aceite mineral nuevo.....	11
3.3.2.	Propiedades del aceite mineral en servicio	12
3.3.3.	Clasificación de aceites minerales en servicio.....	12
3.3.3.1.	Clase I.....	12
3.3.3.2.	Clase II.....	12
3.3.3.3.	Clase III	12
3.3.4.	Limites recomendados del aceite mineral reacondicionado llenado antes de la energización.....	13
3.3.4.1.	Mezclas de aceite mineral.....	13
3.4.	Gasificación de líquidos aislantes bajo tensión eléctrica e ionización	13
3.4.1.	DGA análisis de gases	14
3.4.2.	Gases Indicativos de Fallas.....	15
3.4.2.1.	Hidrógeno (H ₂):	15
3.4.2.2.	Metano (CH ₄):.....	15
3.4.2.3.	Etano (C ₂ H ₆):	15
3.4.2.4.	Etileno (C ₂ H ₄):.....	15
3.4.2.5.	Acetileno (C ₂ H ₂):.....	15
3.4.2.6.	Monóxido de Carbono (CO):	15
3.4.2.7.	Dióxido de Carbono (CO ₂):	16
3.5.	Método de Ratio de Rogers	16
3.6.	Método de Ratio de IEC	16
3.7.	Lógica Difusa	17
3.7.1.	Conjuntos borrosos	19

3.7.2.	Funciones de membresía.....	19
3.7.2.1.	Forma triangular	19
3.7.2.2.	Forma S.....	20
3.7.2.3.	Forma trapezoidal	20
3.7.3.	Operaciones borrosas	21
3.7.4.	Fuzzificación.....	22
3.7.5.	Reglas borrosas	22
3.7.6.	Reglas difusas de Mamdani	23
3.7.7.	Reglas difusas de Takagi – Sugeno	23
3.7.8.	Inferencia Borrosa.....	24
3.7.9.	Defusificación	24
3.8.	Fuzzy Logic MATLAB	24
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	26
4.1.	Relaciones Difusas de Rogers	27
4.1.1.	Fusificación de Variables i, j, k y l	27
4.1.2.	Funciones de Pertenencia.....	28
4.1.3.	Reglas Difusas	31
4.2.	Relaciones Difusas IEC	33
4.2.1.	Fusificación de Variables l, i y k	33
4.2.2.	Funciones de pertenencia IEC	34
4.2.3.	Reglas Difusas	35
4.3.	Identificación de falla en la salida del método difuso de Rogers	35
4.4.	Identificación de falla en la salida del método difuso de la IEC	37
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	38
5.1.	Análisis de gases disueltos aplicando lógica difusa	38
5.1.1.	Relación de Rogers difuso	38

5.1.2.	Relación de la IEC difuso	39
5.2.	Análisis de resultados	41
5.2.1.	Análisis de entrenamiento difuso.....	41
5.2.1.1.	Método de Rogers difuso.....	41
5.2.1.2.	Método de la IEC difuso.....	41
5.2.1.3.	Análisis Rogers e IEC difuso y la máquina de soporte de vectores (SVM)	42
5.2.2.	Análisis de prueba de los difusos.....	43
5.2.3.	Análisis del caso práctico	46
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
6.1.	Conclusiones.....	50
6.2.	Recomendaciones	51
7.	REFERENCIALES.....	52
8.	ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites de Prueba para Aceite Mineral Nuevo Antes de Energización [19].	11
Tabla 2. Conjunto de gases disueltos.	16
Tabla 3. Tipos de falla [33].	26
Tabla 4. Agrupación de fallas de la IEC y el método de Roger[33].	26
Tabla 5. Relaciones difusas de Rogers[34].	27
Tabla 6. Clasificación de fallas según la Rogers[34].	31
Tabla 7. Relaciones difusas IEC[33].	33
Tabla 8. Clasificación de fallas de la IEC[33].	35
Tabla 9. Caso base método difuso de Rogers.	36
Tabla 10. Salida difusa de Rogers que indica el porcentaje y el tipo de falla [34].	36
Tabla 11. Caso Base método difuso de IEC.	37
Tabla 12. Salida del Fuzzy IEC que indica la falla en forma porcentual y tipo de falla[33].	37
Tabla 13. Identificación de fallas del difuso de Rogers.	41
Tabla 14. Identificación de fallas del difuso IEC.	42
Tabla 15. Ejemplo de datos DGA.	43
Tabla 16. Comparación de falla por métodos difusos y convencionales de DGA [35].	44
Tabla 17. Validación de fallas por métodos difusos y convencionales de DGA.	45
Tabla 18. Identificación de fallas del patio de transformadores de la subestación Novacero.	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del transformador.....	8
Figura 2. Fotografía termográfica de un transformador [17].....	10
Figura 3. Funciones de pertenencia más habituales [25].....	18
Figura 4. Sistema de interferencia difusa [13].....	18
Figura 5. Ejemplo de subconjuntos borrosos.....	19
Figura 6. Forma triangular.....	20
Figura 7. Forma S.....	20
Figura 8. Forma trapezoidal.....	21
Figura 9. Operaciones de lógica difusa en la función triangular[28].	22
Figura 10. Pantalla Lógica difusa.....	25
Figura 11. Ventana de ingreso de variables.	28
Figura 12. Entradas y Salidas del método de Rogers.....	28
Figura 13. Cuadro de agregar y remover funciones.	29
Figura 14. Cuadro para añadir funciones de pertenencia.....	29
Figura 15. Entrada de funciones de pertenencia i, j, k, l.....	30
Figura 16. Salida de fallas de Rogers.....	31
Figura 17. Implementación de reglas difusas para el método de Rogers.....	32
Figura 18. Vista gráfica de las Reglas de Rogers.....	32
Figura 19. Entradas y Salidas para el método IEC.....	33
Figura 20. Función k de pertenencia de entrada.....	34
Figura 21. Funciones de salida IEC.....	34
Figura 22. Reglas difusas de IEC.....	35
Figura 23. Relaciones de Rogers i, j, k y l.....	38
Figura 24. Análisis mediante el difuso de Rogers.....	39
Figura 25. Método didáctico de identificación de falla por el método difuso de Rogers.....	39

Figura 26. Análisis mediante el difuso de la IEC	40
Figura 27. Método didáctico de identificación de fallas por el método difuso de la IEC	40
Figura 28. Comparación de resultados de entrenamiento	42
Figura 29. Métodos de análisis de gases	45
Figura 30. Conjunto de gases del Transformador 60 MVA	48
Figura 31. Conjunto de gases del transformador 20 MVA a 18 kV	48
Figura 32. Conjunto de gases del transformador 20 MVA a 13.8kV	49

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FALLA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA MEDIANTE LÓGICA DIFUSA

Fecha de inicio:

Fecha de finalización:

Lugar de ejecución: No aplica

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia: Carrera de Electricidad

Tipo de Proyecto: Proyecto de investigación

Proyecto de investigación vinculado:

Equipo de Trabajo:

Tutor de titulación: Ing. Castillo Fiallos Jessica Nataly Ms.C

Estudiante: Chilingua Sampedro Kevin Israel

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Sublínea 1: Sistemas de transmisión y distribución de energía.

2. INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia son esenciales y de alto costo en los sistemas eléctricos de potencia. Su mal funcionamiento puede interrumpir el suministro eléctrico, por lo que es crucial identificar fallas incipientes, detectarlas a tiempo puede limitar el daño el equipo, prevenir fallos tempranos y generar importantes ahorros en costo de operación, mantenimiento y mejora la confiabilidad de la subestación en cual se encuentre [1].

El aceite aislante de un transformador puede fallar debido a tensiones eléctricas y térmicas. Entre las fallas más comunes se encuentran el arco eléctrico, las descargas parciales, chisporroteo, arco, flasheo, fallas térmicas y el sobrecalentamiento de conductores. Estas fallas pueden descomponer los materiales aislantes, generando gases en diversas concentraciones como el hidrógeno (H_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4), acetileno (C_2H_2), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2) que pueden encontrarse disueltos en el aceite [2].

La detección de fallas puede realizarse evaluando la cantidad y la tasa de generación de gases. Puesto que dependiendo la falla se producen distintos gases, la presencia de estos se puede identificar la naturaleza de la falla[3]. El estudio de gases disueltos es el medio más efectivo para identificar estas concentraciones, que implica tomar una muestra de aceite del transformador para medir las concentraciones de gases disueltos y diagnosticar la causa. Entre los métodos DGA más comunes se encuentran Key Gas, Rogers Ratio, Support Vector Machine, IEC Ratio, Duval triángulo y la implementación en la investigación de los métodos combinados con lógica difusa como el método de Rogers difuso y el IEC difuso [4].

La lógica difusa es útil en estos casos, ya que ofrece una manera efectiva de describir el comportamiento de sistemas difíciles de analizar. A diferencia de la lógica clásica, donde las afirmaciones solo pueden ser verdaderas o falsas (lógica Booleana), la lógica difusa permite un rango de valores entre 0 y 1, reflejando el grado de pertenencia a un conjunto. Gracias a su capacidad para manejar la ambigüedad, la lógica difusa puede utilizarse para determinar reglas de diagnóstico y ajustar las funciones de pertenencia antes de llegar a una conclusión [5].

En la presente investigación, se examinan dos métodos DGA: Rogers Ratio e IEC Ratio. Se desarrolló un controlador de lógica difusa en MATLAB para la evaluación de ambos métodos. Los resultados del experimento indican que la técnica difusa es un enfoque viable para clasificar fallas en transformadores[6].

2.1. El problema

2.2. Situación Problemática

Los transformadores son un eslabón vital en un sistema de energía donde técnicas de seguimiento y diagnóstico son fundamentales para mejorar la confiabilidad del equipo. El convertidor eléctrico es de los equipos más importante de un sistema para elevar o disminuir el voltaje y por su elevado costo, por ello es fundamental que opere en óptimas condiciones[7].

La máquina estacionaria consta de papel aislante sumergido en aceite de tipo mineral o vegetal, por lo tanto, el aceite de transformador y el aislamiento de papel son esenciales fuentes para detectar fallas incipientes, tendencia de aislamiento y generalmente refleja el estado de salud del transformador.

Durante fallas debido a problemas eléctricos se producen tensiones térmicas lo desencadena en descomposición del aceite y el papel que evoluciona en gases que disminuye la disipación de calor y la rigidez dieléctrica del aceite. Los gases generados se descomponen en hidrógeno (H_2), acetileno (C_2H_2), etileno (C_2H_4), metano (CH_4), y etano (C_2H_6). Por otro lado, la descomposición del papel produce monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2) [8].

A pesar de la existencia de diversas técnicas de interpretación del análisis de gases, tales como Rogers, IEC, gas clave y el triángulo de Duval, es importante destacar que todos estos enfoques se fundamentan en la experiencia del personal encargado. Aunque estas metodologías proveen valiosa información sobre la salud de los transformadores, la interpretación precisa de los resultados sigue dependiendo en gran medida de la pericia y conocimientos del personal especializado.

Los fallos internos en transformadores se clasifican en categorías térmicas y eléctricas, cada tipo de falla evoluciona generando gases característicos. No obstante, el análisis de estos gases no es siempre sencillo, ya que puede haber múltiples defectos presentes simultáneamente. La determinación de la naturaleza de la falla, basada en el tipo y cantidad de gases detectados, se vuelve crucial en este proceso. Además, es importante tener en cuenta que diversas fallas pueden generar niveles de energía que varían desde niveles bajos hasta arcos sostenidos muy altos. Este complejo panorama resalta la importancia de técnicas avanzadas de análisis y diagnóstico para una interpretación precisa de los resultados. La implementación de la lógica difusa en la interpretación de resultados de gases disueltos se vuelve esencial en este contexto.

La naturaleza de la falla, determinada por el tipo y cantidad de gases detectados, se vuelve un proceso más flexible y adaptativo.

2.3. Formulación del problema

Detectar fallas incipientes en transformadores minerales o vegetales es desafiante. Detener la máquina para ensayos implica pérdidas económicas. Se requiere un método de monitoreo eficiente para preservar la continuidad operativa de la máquina estacionaria.

2.4. Objeto y campo de acción

2.4.1. Objeto de Investigación:

Transformador

2.4.2. Campo de Acción:

330000 Ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 330605 Conductores Aislados/330609 Transmisión y Distribución

2.5. Beneficiarios

2.5.1. Directo

Los beneficiarios del presente proyecto investigativo son estudiantes y personal académico que componen la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.5.2. Indirecto

Los beneficiarios serán las empresas público o privadas que adopten el modelo.

2.6. Justificación

La presente investigación se enfocará en el análisis de fallas incipientes de transformadores mediante análisis de gases disueltos minerales y vegetales, es uno de los controles más efectivos, existen muchas técnicas de interpretación para los resultados de DGA. Sin embargo, todas estas técnicas se basan en la experiencia del personal. La interpretación de los datos es todavía un desafío en la máquina estacionaria por lo cual mediante la lógica difusa ayudará a estandarizar DGA mediante técnicas de interpretación e identificar transformadores críticos que necesiten un mantenimiento objetivo.

La modelación de la lógica difusa se clasificará en los gases disueltos del aceite de tipo mineral o vegetal, los cuales permitirán analizar de variables que resulten en fallas incipientes, en base

a las técnicas tradicionales, las cuales se comparan con los resultados difusos donde se evidencia que el modelo difuso es muy eficaz, en interpretar los resultados de la DGA identificando la clasificación crítica de los transformadores.

2.7. Hipótesis

La identificación de fallas incipientes en transformadores de potencia por análisis de muestras de gases disueltos se determina de diferentes formas, por la experiencia del operador o por la técnica de lógica difusa que permite insertar múltiples variables, entregando como resultado una o más fallas de tipo eléctrico o térmico, sin ocasionar la inoperatividad de la máquina y predecir el mantenimiento objetivamente.

2.8. Objetivos

2.8.1. General

Identificar las fallas incipientes en transformadores de potencia, aplicando lógica difusa en base a muestras de gases disueltos de tipo mineral y vegetal.

2.8.2. Específicos

- Investigar modelos de lógica difusa para la identificación de fallas en transformadores.
- Implementar un modelo de lógica difusa que determinen las fallas incipientes en los transformadores mediante análisis de gases.
- Validar los resultados obtenidos de la lógica difusa para asegurar su precisión en la identificación de fallas en transformadores de potencia.

2.9. Sistemas de tareas

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar modelos de lógica difusa para la identificación de fallas en transformadores.	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión bibliográfica sobre las fallas incipientes en transformadores de tipo mineral y vegetal. - Recopilación de datos de ensayo de gases disueltos. - Determinación de un modelo base de lógica difusa para fallas eléctricas y térmicas en transformadores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Información de las fallas incipientes eléctricas y térmicas en transformadores de aceite mineral y vegetal. - Listado de variables y parámetros de los gases disueltos mineral y vegetal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensayos de gases disueltos de aceite de tipo mineral y vegetal - Microsoft Office.
Implementar un modelo de lógica difusa que determinen las fallas incipientes en los transformadores mediante análisis de gases	- Modelo de lógica difusa de fallas incipiente en transformadores mediante análisis de gases.	- Entrenamiento de la lógica difusa para la evaluación de análisis de gases en transformadores de potencia.	<ul style="list-style-type: none"> - Matlab - Microsoft Office.
Validar los resultados obtenidos de la lógica difusa para asegurar su precisión en la identificación de fallas en transformadores de potencia	- Análisis comparativo de resultados de lógica difusa con datos de fallas conocidas.	- Obtención de un conjunto de datos que demuestren la efectividad de la detección de fallas en transformadores.	- Microsoft Office.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. Antecedentes

Los transformadores en el sistema eléctricos de potencia son maquinas estacionarias de numerosas investigaciones que buscan prolongar su operación, la durabilidad del trafo es un aspecto crucial para las empresas de distribución de eléctrica como para los fabricantes de transformadores y otras empresas relacionadas [9].

Conocer el tiempo de vida del convertidor de voltaje es fundamental manejar el riesgo relacionado con la confiabilidad de la red de eléctrica y garantizar el servicio eléctrico, las máquinas eléctricas se degrada de distintas formas, dependiendo su diseño y función. Están expuestas a fallas térmicas, eléctricas causadas por el entorno y fallas por maniobra, junto con el estado de la máquina estacionaria mediante métodos predictivos se ha vuelto esencial para conocer su condición [10].

Un transformador deja operar cuando no puede desempeñar su papel de manera efectiva como un vínculo confiable entre las diversas secciones de un sistema eléctrico con distintos niveles de voltaje, la máquina estacionaria es diseñada para operar durante un período de 20 a 35 años, las temperaturas oscilan entre 65 y 95 grados Celsius.

La lógica difusa, se ha utilizado para manejar la incertidumbre en la evaluación del transformador de potencia al integrarse DGA como los métodos IEC y Rogers. Estos métodos clasifican las fallas térmicas y eléctricas basándose en las relaciones de gases generados por la descomposición del aceite aislante, se benefician de la lógica difusa al transformar las proporciones de gases en conjuntos difusos con funciones de pertenencia. Esto permite una interpretación más flexible y precisa de los datos, mejorando así la identificación y clasificación de fallas en los transformadores.

3.2. Transformador eléctrico

El estudio del transformador, generador eléctrico y máquinas eléctricas se fundamentan en la inducción electromagnética investigada por Michael Faraday y Joseph Henry en 1832. Un transformador eléctrico es una máquina estacionaria basado en los principios de inducción electromagnética entre bobinas fijas, interconectadas por el campo magnético con el objetivo de elevar o reducir el voltaje y mantener la frecuencia, excepto los autotransformadores porque las bobinas no están conectadas físicamente entre sí.

La figura 1 muestra la estructura fundamental de un transformador con dos bobinas, se visualiza los devanados primario y secundario, que están eléctricamente aislados entre sí, pero comparten un núcleo común que concentra y dirige el flujo magnético.

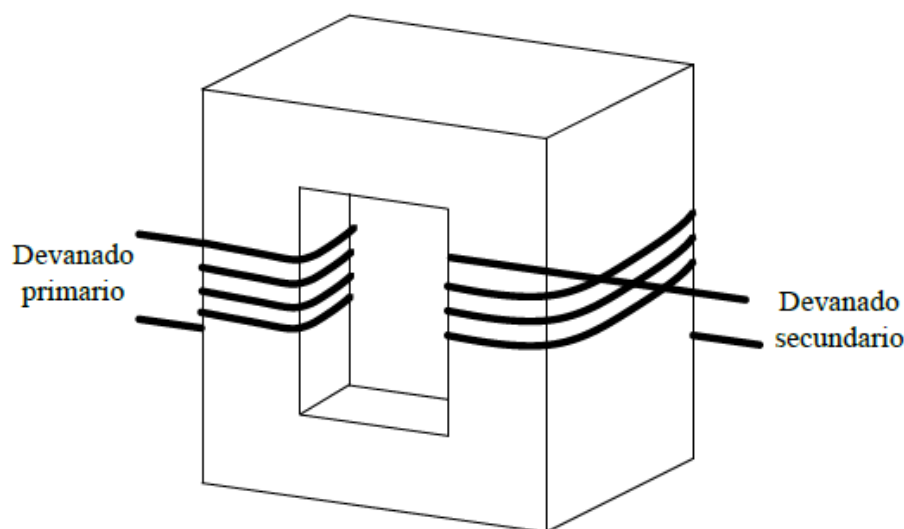


Figura 1. Estructura del transformador

3.2.1. Pruebas eléctricas en el transformador

Son las pruebas a las que se somete cada transformador fabricado para asegurar que la máquina estacionaria cumple con los requisitos establecidos. Según los estándares IEC 60076, se consideran las siguientes pruebas de rutina para transformadores[11]:

3.2.2. Resistencia de aislamiento

La prueba de resistencia de aislamiento es un método no destructivo empleado para evaluar la condición del aislamiento, la prueba mide la resistencia que el aislamiento ofrece al paso de corriente cuando se le aplica voltaje directo, se mide en mega ohmios $M\Omega$, en el convertidor de tensión, se mide entre los devanados y la tierra, en intervalos de tiempo que van de un minuto a diez minutos. El equipo que evalúa la resistencia de aislamiento es típicamente conocido como MEGGER, que contiene un generador de corriente continua (DC) que produce una alta tensión directa, generando la corriente de aislamiento. Esta corriente se compone la corriente que fluye a través del aislamiento y sobre el aislamiento[12].

3.2.3. Prueba de corriente de excitación

Es la corriente que fluye por el devanado primario del transformador cuando está en vacío. Esta corriente induce el campo magnético en el núcleo y proporciona la energía requerida para las pérdidas del núcleo.

Estas pruebas permiten detectar cambios en la geometría del núcleo o de sus devanados, cortocircuitos entre espiras, apilamiento defectuoso de las laminaciones en el núcleo o el uso de metales (acero) de baja calidad, lo cual afecta la reluctancia y los valores de la corriente de excitación [13].

3.2.4. Prueba de relación de transformación

Esta prueba garantiza que las bobinas contengan el número de vueltas correctos para convertir los niveles de voltaje requeridos, los resultados de la prueba identifican las anomalías en el trafo como cortocircuitado en devanados, espiras abiertas, fallas en el tap y similares [14].

3.2.5. Prueba de resistencia (DC) de devanados

La prueba mide la resistencia eléctrica de los devanados aplicando una corriente directa detectando problemas de vueltas cortocircuitadas, conexiones defectuosas o empalmes sueltos, los resultados obtenidos deben compararse con los valores del fabricante del equipo o valores de pruebas anteriores para verificar el estado, el equipo de medición es el micro óhmetro, de tipo analógico o digital. La comparación de los resultados con los valores esperados permite identificar cualquier anomalía en el devanado, asegurando así el correcto funcionamiento del transformador y ayudando a prevenir fallas en su operación [15].

3.2.6. Pruebas de reactancia de fuga o corriente de cortocircuito

El adecuado funcionamiento de las partes activas permite el flujo de corriente eléctrica a través de devanados primarios y secundarios, que genera capacitancia que es la acumulación del campo eléctrico, manteniendo un valor constante cuando el transformador opera de acuerdo a su diseño y dentro de sus parámetros nominales [16].

3.2.7. Termografía.

Todos los cuerpos emiten energía desde su superficie en forma electromagnética. ondas con magnitud proporcional a su temperatura, cuanto más caliente es el objeto, más energía tiende a irradiar, la temperatura determina la longitud de onda de la energía emitida; cuanto más frío es el objeto, mayor es su longitud de onda y se acorta con elevación de temperatura.

Los cuerpos comienzan a irradiar infrarrojos de energía primero, no visible para el ojo humano pero visible por medios de una cámara infrarroja. La radiación medida por la cámara de infrarrojos no depende sólo de la temperatura del objeto sino también de su emisividad. La radiación proveniente del área circundante y reflejada sobre el objeto también influye en la medición. Por lo tanto, a medir la temperatura con precisión, junto con los efectos de diferentes fuentes de radiación que interactúan con el objeto, otras variables como la emisividad, la distancia entre la cámara y el objeto escaneado, la temperatura ambiente y la humedad, también debe ser considerado. Además, debido a las características de la radiación infrarroja, para detectar cualquier sobrecalentamiento mediante En los escaneos IR, el cuerpo generador de calor debe estar alineado en línea vista con el termógrafo.

La técnica IR se utiliza en muchas diferentes áreas de la ciencia y la industria. En el campo eléctrico, es una valiosa herramienta en el mantenimiento predictivo de equipos y instalaciones. Deficiencias en las conexiones eléctricas, como ajuste insuficiente, óxido y conductores con cuerdas cortadas, conducir a la generación de una temperatura excesiva que puede detectarse temprana y precisa mediante visualización[17].

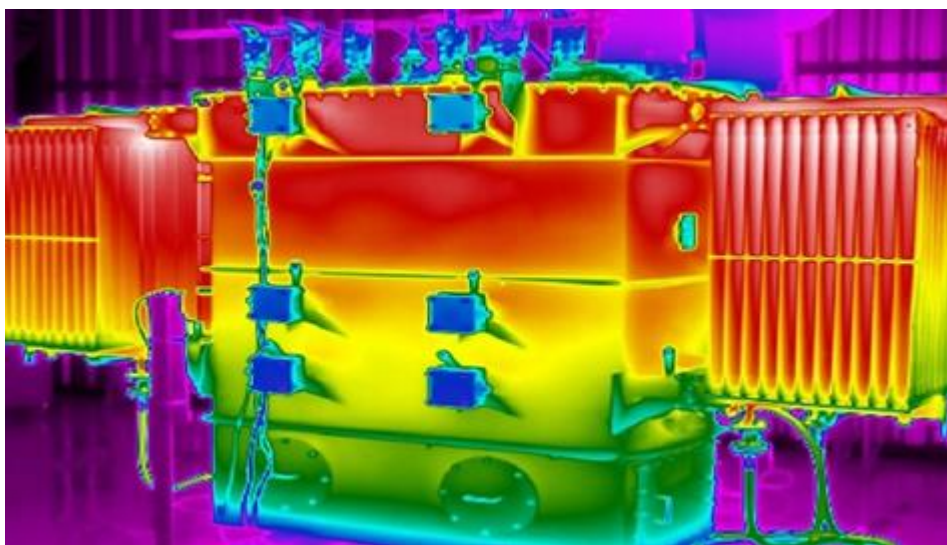


Figura 2. Fotografía termográfica de un transformador [17].

3.3. Aceite del transformador

El aceite en el trafo se utiliza para prevenir la formación de arcos eléctricos, regula la temperatura de la máquina estacionaria y funciona como refrigerante de los devanados y el núcleo que se encuentran sumergidos en aceite.

3.3.1. Propiedades del aceite mineral nuevo

El aceite mineral suministrado en máquinas estacionarias nuevas desde la planta de fábrica debe ser evaluado mediante la toma de una muestra en el lugar de operación. Los límites recomendados para el aceite, previo a la energización, se detallan en la tabla 1. Las propiedades, como la tensión interfacial (IFT), la tensión de ruptura dieléctrica y el factor de disipación, que son sensibles a ciertos contaminantes disueltos o partículas reflejarán la exposición a los materiales de construcción de equipos normales [18].

Tabla 1. Límites de Prueba para Aceite Mineral Nuevo Antes de Energización [19].

Límites de prueba para aceite mineral nuevo			
Prueba y método	Valor para clase de tensión		
	≤ 69 k V	69 k V a < 230 k V	≥ 230 k V
Tensión de ruptura dieléctrica	-	-	-
ASTM D1816 k V mínimo	-	-	-
Espacio de 1 mm	25	30	35
Espacio de 2 mm	45	55	60
Factor de disipación (factor de potencia)	-	-	-
Norma ASTM D924	-	-	-
25 °C, % máximo	0,05	0,05	0,05
100 °C, % máximo	0,40	0,40	0,30
Tensión interfacial	-	-	-
ASTM D971 mN/m mínimo	38	38	38
Color	-	-	-
Norma ASTM D1500	10	10	0,5
Unidades ASTM máximo	-	-	-
Examinación visual Norma ASTM D1524	Brillante y claro	Brillante y claro	Brillante y claro
Número de neutralización (acidez)			
Norma ASTM D974	0,03	0,03	0,03
Contenido de agua	-	-	-
Norma ASTM D1533 mg/kg máximo	20	10	10
Contenido de inhibidor de oxidación cuando se especifica	-	-	-
Norma ASTM D2668	-	-	-
Aceite mineral tipo I, % máximo	0,08	0,08	0,08
Aceite mineral tipo II, % máximo	3	3	3
Azufre corrosivo	No corrosivo	No corrosivo	No corrosivo

3.3.2. Propiedades del aceite mineral en servicio

No es factible establecer valores de prueba específicos y límites recomendados para todas las aplicaciones posibles, actualmente, ninguna prueba por sí sola puede determinar con precisión el estado del aceite dieléctrico mineral o vegetal en servicio, sin embargo, se pueden resumir la utilidad de las pruebas actuales y proponer el reacondicionamiento del aceite aislante del transformador.

El aceite mineral y vegetal del transformador es susceptible a la oxidación, la cual ocurre en presencia de oxígeno, humedad y calor, factores difíciles de eliminar en un transformador sumergido en líquido, por estas razones los fabricantes ofrecen aceite dieléctrico con inhibidor de oxidación.

3.3.3. Clasificación de aceites minerales en servicio

3.3.3.1. Clase I

Esta categoría incluye aceites minerales que permanecen en condiciones de operación, el aislante dieléctrico no necesita ser retirado del servicio si solo se excede un límite específico, ni se requiere su reemplazo si solo algunos valores de propiedades están fuera del rango establecido.

3.3.3.2. Clase II

Aceites minerales que no cumplen con los estándares de ruptura dieléctrica o contiene de contaminantes deben ser reacondicionado, el proceso se realiza mediante filtración mecánica, filtración a presión, deshidratación al vacío u otros métodos de depuración similar.

3.3.3.3. Clase III

Estos aceites deben ser recuperados utilizando métodos como la tierra de Fuller o métodos equivalentes, o bien reemplazarse. Es importante tener en cuenta que la recuperación del aceite puede eliminar el inhibidor de oxidación, por lo que se debe reponer a niveles cercanos a su valor máximo recomendado.

3.3.4. Límites recomendados del aceite mineral reacondicionado llenado antes de la energización.

Los límites de prueba recomendados son aplicables tras el reacondicionamiento o recuperación del aceite mineral o vegetal en servicio para transformadores o reactores, una vez realizado el llenado y antes de proceder a la energización, estos límites no se aplican a maquinas estacionarias nuevas, es importante destacar los trafos de potencia están equipados con sistemas de protección con diafragmas para evitar la entrada de aire, para ello el contenido de gas disuelto debe mantenerse dentro de los límites recomendados por el fabricante en caso contrario se evalúa mediante técnicas de DGA.

3.3.4.1. Mezclas de aceite mineral

Aunque los aceites minerales convencionales de diferentes proveedores pueden diferir en sus características, estos aceites, así como las mezclas de estos aceites. El aceite mineral es miscible con algunos tipos de líquidos aislantes no inflamables y menos inflamables. Es aconsejable utilizar sistemas de procesamiento y manipulación específicos para cada tipo de líquido para evitar incluso rastros de contaminación cruzada entre líquidos a base de petróleo y no derivados del petróleo. Los restos de líquidos de silicona pueden provocar la formación de espuma en el aceite durante la deshidratación al vacío y el llenado del equipo. Las mezclas de líquidos aislantes menos inflamables o no inflamables con aceite mineral convencional alterarán las características de inflamabilidad del líquido menos inflamable. Las diferencias en la constante dieléctrica de los líquidos pueden provocar tensiones de tensión localizadas en los equipos[19].

3.4. Gasificación de líquidos aislantes bajo tensión eléctrica e ionización

Esta prueba mide y evalúa la capacidad de los líquidos aislantes para absorber o desprende gases cuando están sujetos a un voltaje eléctrico. En aplicaciones específicas, es crucial conocer la velocidad de absorción o desprendimiento de gas por un líquido bajo altos gradientes de voltaje. La respuesta del líquido, ya sea absorbiendo o liberando conjunto de gases, depende de su carácter aromático con cual los líquidos con alta aromaticidad tienden a absorber gas bajo tensión, mientras que los líquidos con baja aromaticidad tienden a desprender hidrógeno al aplicar voltaje, los resultados de la prueba y el rendimiento del equipo es limitada, y las mediciones pueden variar significativamente entre diferentes laboratorios o métodos, por lo que los resultados deben interpretarse de forma cualitativa[19].

3.4.1. DGA análisis de gases

Durante su uso, el aislamiento del trafo de potencia se degrada bajo los efectos de diversas tensiones, produciendo gases del aceite dieléctrico que desprenden componentes químicos por su funcionamiento, la detección de los gases es útil para identificar anomalías y evitar interrupciones imprevistas.

Los componentes gaseosos individuales que pueden identificarse y determinarse incluyen son oxígeno (O_2), hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), acetileno (C_2H_2), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4), propano (C_3H_8) y propileno (C_3H_6). Excepto O_2 y N_2 , todos los gases mencionados deben tener un electrón desapareado cuando ocurre la descomposición; esto signif

ica que estos gases son en realidad el resultado de reacciones químicas secundarias. El desprendimiento de gases es originado por la ruptura de moléculas de hidrocarburos provocadas por tensiones eléctricas o térmicas. Estos gases se conocen como gases clave. Entre los métodos utilizados para detectar e identificar los gases generados, el DGA se considera el método más informativo [20].

A lo largo de las décadas, el monitoreo del análisis de gases disueltos (DGA) se ha convertido en una herramienta de diagnóstico muy útil y es aplicada universalmente por las empresas de servicios públicos o fabricantes para la evaluación de la condición de los transformadores de potencia y, en los últimos años, de los cambiadores de tomas en carga y los interruptores de aceite a granel. Sin embargo, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en su norma C 57 104 ha resaltado algunas desventajas del análisis de gases disueltos, como se indica a continuación: “La existencia de numerosas técnicas para la detección y medición de gases es importante reconocer que el análisis e interpretación de estos gases no es una ciencia exacta, sino un proceso interpretativo que está sujeto a variaciones en cada conjunto de composiciones químicas”. Además, “El resultado de varios ensayos realizados en laboratorios de ASTM indica que los procedimientos analíticos DGA son variables, tienen poca precisión lo que conllevan a ser extremadamente inexactos, especialmente entre laboratorios”. Finalmente, “Sin embargo, se debe advertir a los operadores que, aunque las razones físicas para la formación de gases tienen una base técnica sólida, la interpretación de esos datos en términos de la causa o causas específicas no es una ciencia exacta, sino el resultado empírico de cual se deriva reglas para su interpretación”, de forma general que los gases clave disueltos siempre están presentes en el

aceite dieléctrico del transformador en algún nivel presentando cantidades de gases generados depende del tipo de falla[21].

3.4.2. Gases Indicativos de Fallas

Se describen los principales gases que indican fallas en un transformador sumergido en aceite dieléctrico de tipo mineral o vegetal [22]:

3.4.2.1. Hidrógeno (H_2):

Este gas suele aparecer al principio de cualquier tipo de falla, por descargas de baja energía, descargas parciales y descargas de tipo corona, su formación comienza alrededor de los 150°C.

3.4.2.2. Metano (CH_4):

Se genera por descargas parciales o por el sobrecalentamiento en la celulosa y en el aceite dieléctrico, empieza a formarse en pequeñas cantidades a temperaturas similares a las del hidrógeno.

3.4.2.3. Etano (C_2H_6):

Principalmente se origina por la degradación térmica del aceite, comenzando a producirse a en los 250°C.

3.4.2.4. Etileno (C_2H_4):

Este gas aparece en el aceite a partir de los 350°C, siendo generalmente un resultado indicativo de condiciones térmicas extremas en el aceite a elevadas temperaturas.

3.4.2.5. Acetileno (C_2H_2):

Se genera a temperaturas superiores a 500°C, y suele estar asociado con la presencia de un arco eléctrico. Si este gas se produce en cortos períodos de tiempo, se deben tomar precauciones inmediatas.

3.4.2.6. Monóxido de Carbono (CO):

Normalmente se produce por la descomposición térmica de la celulosa o de otros materiales aislantes sólidos.

3.4.2.7. Dióxido de Carbono (CO_2):

Indica el envejecimiento térmico de la celulosa o descargas en la misma, el monóxido y el dióxido de carbono se produce por sobrecalentamiento excesivo en el papel aislante.

En la tabla 2 un conjunto de gases del transformador operando en condiciones normales.

Tabla 2. Conjunto de gases disueltos

Conjunto de gases en condiciones normales							
Gas	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2 :
[$\mu\text{L/L}$ (ppm)]	100	120	1	50	65	350	2500

3.5. Método de Ratio de Rogers

Las relaciones de Rogers, diferencian más fallas térmicas que el método de ratio de Dornenburg, es el método de ratio de gases más popular. Este método examina cuatro ratios de gases CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ y $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$. Utiliza un sistema de codificación simple basado en los rangos de ratios para identificar fallas. Este método permite detectar cuatro estados diferentes en un transformador aislado con aceite: envejecimiento, descargas parciales con o sin seguimiento, fallas eléctricas y térmicas de diversas severidades. La técnica, basada en los principios de la degradación térmica, también se incluye en la norma IEEE C57 104-2008. Es eficaz porque correlaciona los resultados de investigaciones de fallas con DGA en cada caso. Sin embargo, algunos valores de los ratios pueden ser inconsistentes con los códigos diagnósticos asignados a diversas fallas y el método no considera los gases disueltos por debajo de los valores de concentración normales, lo que puede llevar a interpretaciones incorrectas[23].

3.6. Método de Ratio de IEC

El método de ratio de IEC, similar al método de ratio de Rogers, no incluye el ratio $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$, ya que solo indica un rango específico de temperatura de descomposición. Este método utiliza tres ratios de gases con diferentes rangos de codificación y se basa en la metodología de diagnóstico de fallas recomendada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). A diferencia del método de Rogers, la IEC no distingue entre subtipos específicos de defectos térmicos y eléctricos. La primera edición del método IEC (IEC 60599-1978) se basa en una codificación simple, mientras que la segunda edición (IEC 60599-1999) utiliza rangos de ratios modificados directamente. Antes de interpretar los gases disueltos utilizando ratios, estos deben

evaluarse para determinar su "normalidad". La segunda iteración del enfoque IEC presenta una representación gráfica en 3D de los rangos de ratios, permitiendo determinar la proximidad de fallas no diagnosticadas a fallas específicas al ubicarlas en el gráfico. Las descargas parciales son una clasificación común para las fallas de transformadores de potencia, con variaciones en energía y fallas térmicas cuya severidad cambia con la temperatura de la falla[24].

3.7. Lógica Difusa

La teoría difusa aborda ambigüedades y amplían la teoría de conjuntos; un elemento tiene solo dos opciones pertenecer o no a un conjunto, sin ambigüedades. Desde que se introdujo la lógica difusa en 1965, se ha avanzado significativamente en este campo, con Japón siendo un líder en su desarrollo y aplicación en una variedad de sistemas, especialmente en electrodomésticos y en la industria, medicina y exploración espacial. Aunque se han publicado numerosos libros y artículos sobre el tema, todavía hay mucho por investigar y descubrir.

La lógica difusa, basada en los conjuntos difusos, opera de manera similar a la lógica Booleana en la teoría clásica de conjuntos. Se utilizan afirmaciones lógicas del tipo si-entonces, que son comunes en inteligencia artificial y emular el razonamiento humano, en control industrial se valora la experiencia y el conocimiento del operador para simular el comportamiento humano en las máquinas, aunque estas tengan limitaciones.

El razonamiento difuso basado en el valor de verdad difuso fue introducido por Baldwin en 1979, unos años después del primer enfoque, la regla compositiva de inferencia, descrita por Zadeh en 1973 y 1975 [25]. La idea principal que diferencia estas dos soluciones es el dominio del razonamiento. La clásica regla compositiva de inferencia trabaja directamente sobre las funciones de verdad de un hecho y una premisa. La idea se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$u_g(y) = \sup_{x \in X} (u_x(x) * r I(u_a(x), u_b(y))) \quad (\text{III.1})$$

Donde $\mu A'(x)$, $\mu A(x)$, $\mu B'(y)$, $\mu B(y)$ son funciones, $* r$ representa cualquier norma triangular utilizada para la intersección entre un hecho difuso A' y una implicación difusa I , que se obtiene desde una premisa difusa A y una conclusión difusa B . Los conjuntos difusos se describen en universos de discurso X , para una premisa y un hecho, y Y para la conclusión B y el resultado de la inferencia B' . La complejidad computacional del enfoque para premisas multi compuestas se vuelve problemática debido al análisis multidimensional, Mamdani y

Assilan presentaron por primera vez un enfoque simplificado muy común en 1975. La idea utilizó la operación mínima como norma triangular y los valores de los hechos (entrada del sistema)[25].

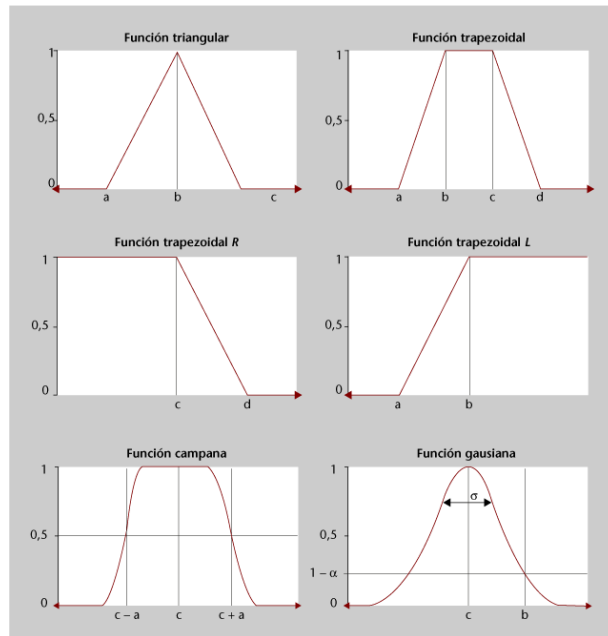


Figura 3. Funciones de pertenencia más habituales [25].

Para diseñar un controlador lógico que emule el comportamiento de un proceso, se utiliza el conocimiento y la experiencia de un operador humano. En comparación con el control tradicional, el control difuso ofrece dos ventajas prácticas:

- No es necesario disponer de un modelo matemático del proceso a controlar.
- Controlador no lineal desarrollado de forma empírica.

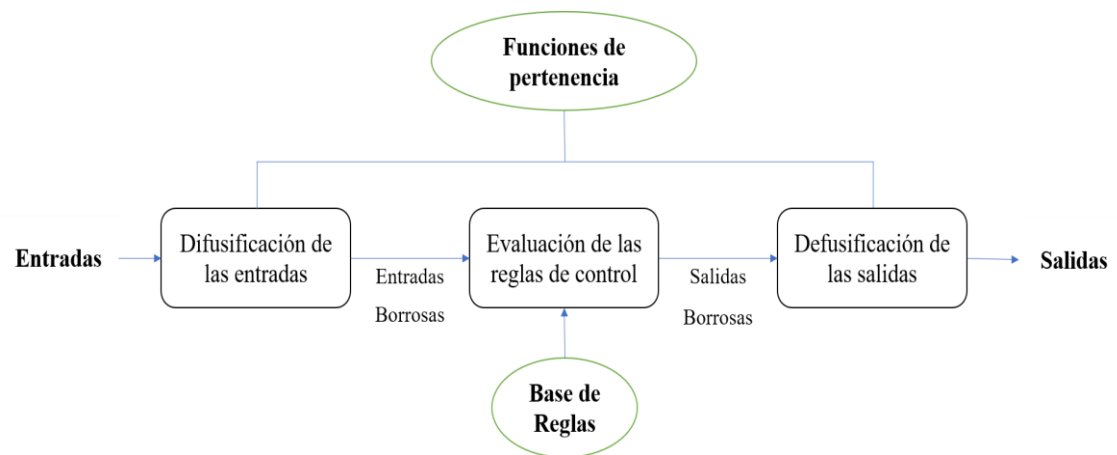


Figura 4. Sistema de interferencia difusa [13].

3.7.1. Conjuntos borrosos

El conjunto borroso tradicional contiene límites, donde el elemento puede pertenecer o no pertenecer a ellos, lo cual se define entre verdadero o falso, sin términos intermedios. Por otro lado, los conjuntos difusos introducen funciones de pertenencia en el rango entre cero y uno. Esto permite definir subconjuntos difusos y asociarlos a valores lingüísticos representados por palabras o etiquetas[27].

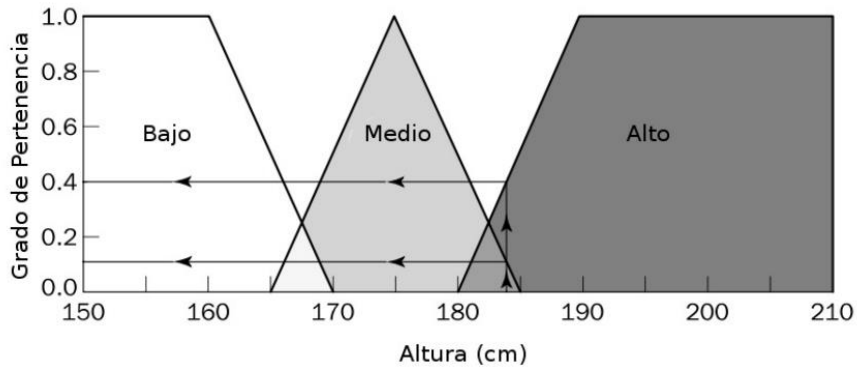


Figura 5. Ejemplo de subconjuntos borrosos

3.7.2. Funciones de membresía

Las funciones de pertenencia indican el grado del elemento que pertenece al subconjunto definido por las etiquetas lingüísticas. Existen diversas formas de funciones, siendo las más típicas las trapezoidales, triangulares, forma S, entre otras:

3.7.2.1. Forma triangular

Ecuación y gráfica que indica los límites que dan la forma triangular mediante lógica difusa:

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{x - a}{m - a} & \text{si } x \in (a, m] \\ \frac{b - x}{b - m} & \text{si } x \in (m, b] \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$

(III.2)

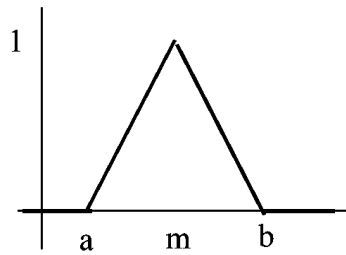


Figura 6. Forma triangular

3.7.2.2. Forma S

Ecuación y gráfica que indica los límites que dan la forma S mediante lógica difusa:

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ 2 \left[\frac{x-a}{h-a} \right]^2 & \text{si } x \in (a, m] \\ 1 - 2 \left[\frac{x-a}{h-a} \right]^2 & \text{si } x \in (m, h] \\ 1 & \text{si } x \geq h \end{cases}$$

(III.3)

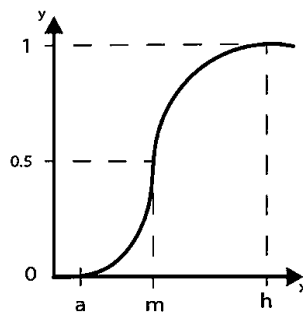


Figura 7. Forma S

3.7.2.3. Forma trapezoidal

Ecuación y gráfica que indica los límites que dan la forma trapezoidal mediante lógica difusa:

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq a) \text{ o } (x \geq d) \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } x \in (a, b] \\ 1 & \text{si } x \in (b, c) \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } x \in (c, d) \end{cases}$$

(III.4)

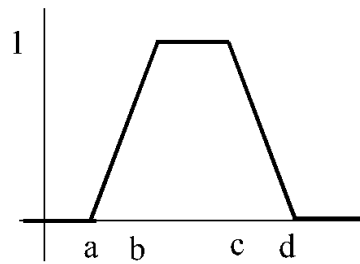


Figura 8. Forma trapezoidal

3.7.3. Operaciones borrosas

Los subconjuntos pueden ser manipulados mediante ciertos operadores o a través de operaciones entre ellos, generando nuevos conjuntos al aplicar operadores a un conjunto único o al combinar múltiples conjuntos, las operaciones lógicas, como complemento, unión e intersección, son esenciales en controladores y modelos difusos para evaluar las condiciones de las reglas y otros aspectos del proceso [28]. A continuación, se detallan estas operaciones para los conjuntos difusos etiquetados A y B , asociados a una variable lingüística x , las operaciones se definen en forma matemática.

Complemento:

$$U_{\bar{A}}(x) = 1 - U_A(x) \quad (\text{III.5})$$

Unión - Operador lógico OR:

$$U_{A \cup B}(x) = \max[U_A(x), U_B(x)] \quad (\text{III.6})$$

Intersección - Operador lógico AND

$$U_{A \cap B}(x) = \min[U_A(x), U_B(x)] \quad (\text{III.7})$$

La presente figura demuestra el complemento, la unión e intersección de las operaciones lógicas:

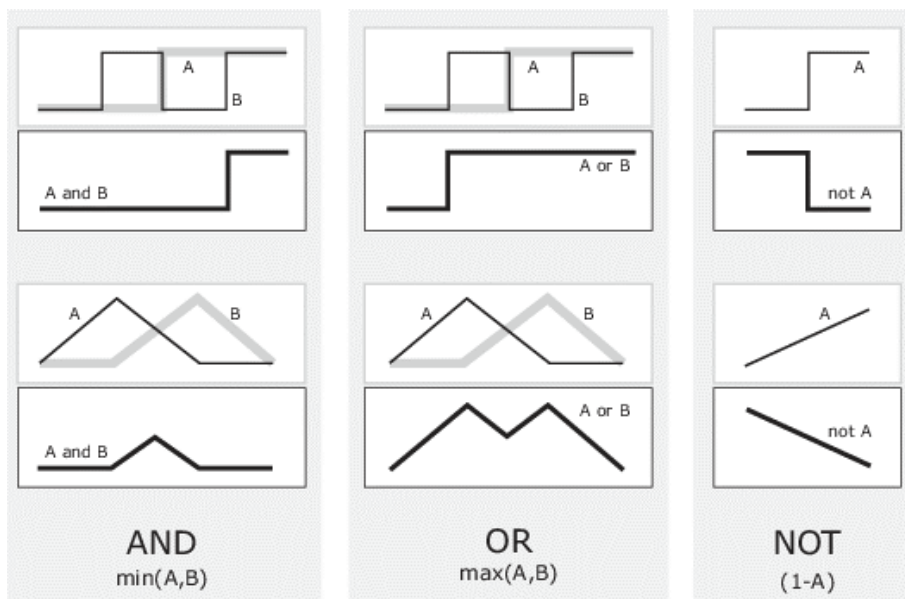


Figura 9. Operaciones de lógica difusa en la función triangular[28].

3.7.4. Fuzzificación

La fuzzificación convierte una variable numérica medida en un valor físico en representación difusa, el proceso supone que los valores numéricos están en un dominio conocido o limitado, dicho dominio está particionado en subconjuntos que cubren el dominio completo, y que cada subconjunto tiene una etiqueta descriptiva y la función de pertenencia asociada [29].

3.7.5. Reglas borrosas

Los controladores difusos utilizan reglas en formato SI-ENTONCES que combinan conjuntos difusos de entrada conocidas como antecedente o premisas, con un conjunto difuso de salida consecuente o consecuencias, las condiciones son conocidas como reglas difusas o fuzzy rules, emplean lógica e inferencia difusa y los conjuntos difusos de los antecedentes que vinculan operaciones lógicas difusas como AND, NOT y OR [29].

Las reglas difusas expresan la relación entre antecedentes y consecuentes, el conjunto forma las condiciones que define el comportamiento del controlador difuso emulando el conocimiento o la experiencia del operador, así como la estrategia de control, las reglas se representan en tablas especialmente cuando hay dos variables de entrada y una de salida. Con el aumento de variables lingüísticas, la complejidad y el tamaño de condiciones aumentan.

Las condiciones estan asociadas entre 0 y 1, que indica su valor relativo, es relevante cuando algunas reglas tienen menos impacto que otras dentro del conjunto de reglas, existen diversos tipos de reglas, siendo las dos principales las condiciones difusas de Mamdani y las de Takagi – Sugeno.

3.7.6. Reglas difusas de Mamdani

$$IF x_1 \text{ is } A \text{ AND } x_2 \text{ is } B \text{ AND } x_3 \text{ is } C \text{ THEN } u_1 \text{ is } D, u_2 \text{ is } E$$

(III.8)

Donde x_1, x_2, x_3 son las variables de ingreso A, B y C son las funciones de pertenencia de ingreso; u_1 y u_2 son acciones de control, que en términos generales aún son variables lingüísticas; D y E son las funciones de membresía de salida, que frecuentemente se usan en forma singleton por su simplicidad computacional, la función AND con lógica difusa permite modelar situaciones complejas en sistemas de control difuso, aprovechando la capacidad de manejar incertidumbres y gradaciones en las variables de entrada y salida[30].

Ventajas

- Intuitivo.
- Amplia aceptación.
- Se adapta a la incorporación del conocimiento y experiencia.

3.7.7. Reglas difusas de Takagi – Sugeno

$$IF x_1 \text{ is } A \text{ AND } x_2 \text{ is } B \text{ AND } x_3 \text{ is } C \text{ THEN } u_1 = f(x_1, x_2, x_3), u_2 = g(x_1, x_2, x_3)$$

(III.9)

Aquí, x_1, x_2, x_3 son variables de entrada, mientras que A, B y C son funciones de membresía de entrada. Las salidas u_1 y u_2 están definidas por las funciones $f(x_1, x_2, x_3)$ y $g(x_1, x_2, x_3)$ respectivamente.

Aunque es posible emplear funciones no lineales para $f(x_1, x_2, x_3)$ y $g(x_1, x_2, x_3)$, en la práctica se suelen utilizar funciones lineales debido a la complejidad que implica elegir funciones no lineales adecuadas[30].

Ventajas

- Eficiente computacionalmente.
- Utiliza técnicas lineales como controladores PID.
- Optimización y control adaptable.
- Adaptado al análisis matemático.

3.7.8. Inferencia Borrosa

Las condiciones difusas encapsulan el conocimiento y las estrategias de control, se asigna datos específicos a las variables de entrada en las premisas, se aplica la inferencia difusa para determinar el resultado de las variables de salida, el proceso genera un conjunto de difusos de salida en cada condición y posteriormente se combinan para obtener la salida final del sistema fuzzy [31].

3.7.9. Defusificación

La defusificación es el proceso matemático que convierte un conjunto difuso en un valor real, aunque la inferencia difusa produce un resultado basado en información difusa, estas deben convertirse en un valor real, el método más común y estudiado es el centroide, que convierte la salida difusa en un valor real que corresponde al eje x del centro de gravedad del conjunto fuzzy de salida.

3.8. Fuzzy Logic MATLAB

El Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB ofrece herramientas para el análisis, diseño y simulación de sistemas difusos, incluyendo aplicaciones, funciones y bloques de Simulink, facilita configurar entradas, salidas, funciones de membresía y condiciones para sistemas de inferencia difusa; con toolbox se ajusta didácticamente las funciones de pertenencia y condiciones basadas en parámetros, permite evaluar los sistemas diseñados en MATLAB y Simulink, apoyando la explicación de modelos complejos de inteligencia artificial [32].

En la presenta investigación utiliza herramientas que simula el funcionamiento de un controlador difuso a través de un “Sistema de Inferencia Difusa” (FIS, por sus siglas en inglés), un FIS, al igual que los bloques de “SimMechanics” permite de forma dinámica el

comportamiento de sistemas complejos que combina la potencia del análisis fuzzy mejorando el diseño de controladores difusos, sino que también optimiza el proceso de modelado y prueba que una mayor precisión en la interpretación y ajuste de los resultados [26].

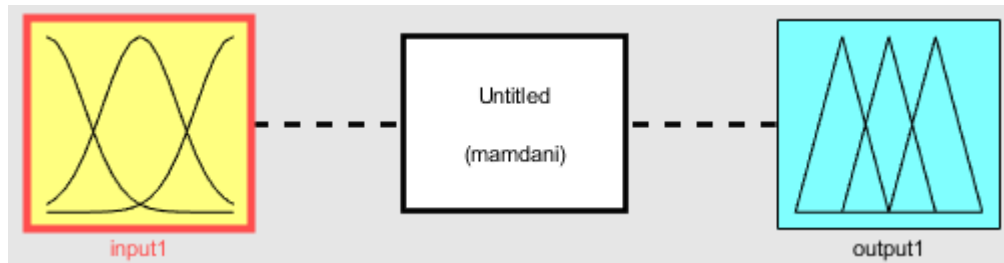


Figura 10. Pantalla Lógica difusa

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Existe una amplia gama de métodos para el análisis de gases disueltos que se han desarrollado con el objetivo de poder identificar la falla incipiente en el transformador de potencia, los métodos más comunes son el triángulo de Duval, el método de Rogers, método de la IEC 60599, Gas clave y análisis de tendencia.

Mediante la aplicación de técnicas DGA, es posible distinguir la falla eléctrica o térmica clasificándolas en forma general, tal como se presenta en la tabla 4:

Tabla 3. Tipos de falla [33].

Clasificación de los Tipos de Falla		
N.-	Tipo de Falla	Código de Falla
A	Falla térmica a baja temperatura	TF
B	Sobrecalentamiento y chisporroteo	OH
C	Arco	ARC
D	Descargas parciales y Corona	PD
E	Desgaste normal	Normal

Las fallas en transformadores se dividen en dos categorías principales: fallas eléctricas y fallas térmicas. Las fallas eléctricas incluyen descargas parciales (H_2 , CH_4), descargas de baja energía (H_2 , CH_4 , C_2H_2) y descargas de alta energía (C_2H_2 , H_2 , CH_4). Las fallas térmicas se clasifican en calentamiento menor ($150^\circ C - 300^\circ C$), calentamiento mayor ($300^\circ C - 700^\circ C$) y calentamiento extremo ($\geq 700^\circ C$) en forma general. La tabla 5 presenta la clasificación de fallas según los métodos de Roger e IEC 60599, detallando cada subdivisión.

Tabla 4. Agrupación de fallas de la IEC y el método de Roger[33].

Método	TF	OH	Arc	DP	NORMAL
Rogers	Ligero sobrecalentamiento $<150^\circ C$	Sobrecalentamiento de conductores	Flasheo con bajo flujo	Descargas parciales	Deterioro Normal
	Sobrecalentamiento de $150^\circ C - 200^\circ C$	Corrientes circulantes en devanados	Arco con alto flujo	Descargas parciales con huella (observar CO)	
	Sobrecalentamiento de $200^\circ C - 300^\circ C$	Corrientes circulantes entre tanque y núcleo, uniones calientes	Chisporroteo continuo a potenciales flotantes		

IEC	Falla térmica <150°C	Falla térmica de 300°C - 700°C	Descargas de baja energía	PDs de baja densidad de energía	Normal
	Falla térmica de 150°C - 300°C	Falla térmica >700°C	Descarga de alta energía	PDs de alta densidad de energía	

4.1. Relaciones Difusas de Rogers

El estudio difuso en el método de relaciones de Rogers, es necesario modificar las variables de entrada tradicionales (i, j, k, l) en conjuntos difusos junto con sus respectivas funciones de pertenencia que están definidas por intervalos bajos de cada relación, lo cual se utilizan datos establecidos en la Tabla 6, donde a cada intervalo o código se le ha asignado una variable lingüística: Bajo, Medio, Alto Muy Alto

Tabla 5. Relaciones difusas de Rogers[34].

Código de la Relación	Intervalo	Código
i	$x < 0.1$	5 (Bajo)
	$0.1 \leq x \leq 1$	0 (Medio)
	$1.0 \leq x \leq 3$	1 (Alto)
	$x > 3$	2 (Muy Alto)
j	$x < 1$	0 (Bajo)
	$x \geq 1$	1 (Alto)
k	$x < 1$	0 (Bajo)
	$1 \leq x \leq 3$	1 (Medio)
	$x > 3$	2 (Alto)
l	$x < 0.1$	0 (Bajo)
	$0.1 \leq x \leq 3$	1 (Medio)
	$x > 3$	2 (Alto)

4.1.1. Fusificación de Variables i, j, k y l

La implantación del análisis difuso se utiliza “Fuzzy Logic Designer” primero, se debe abrir la interfaz de Matlab y escribir “fuzzy” para desplegar la pantalla gráfica, en esta interfaz, se introducen las variables de entrada y salida de acuerdo con el procedimiento descrito a continuación.

Diríjase a la pestaña “Edit” y seleccione la opción “Remove Selected Variable” para eliminar las variables predefinidas. Luego, haga clic nuevamente en la pestaña “Edit” y seleccione “Add Variable”, donde se ingresa las variables de entrada o salida en la Figura 11.

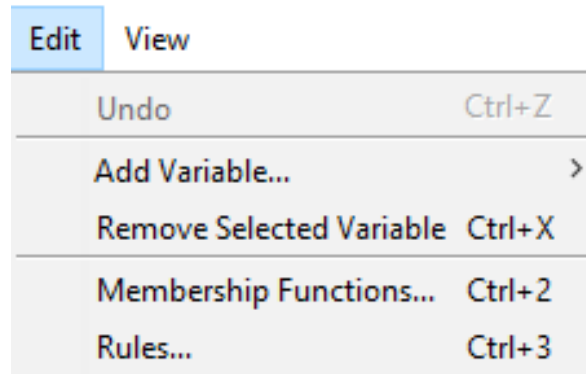


Figura 11. Ventana de ingreso de variables.

Después de seleccionar la opción “Input” o “Output”, se repite el proceso para ingresar cuatro entradas (i, j, k, l) y una salida (falla), esto genera un cuadro de diálogo similar al que se muestra en la figura 12.

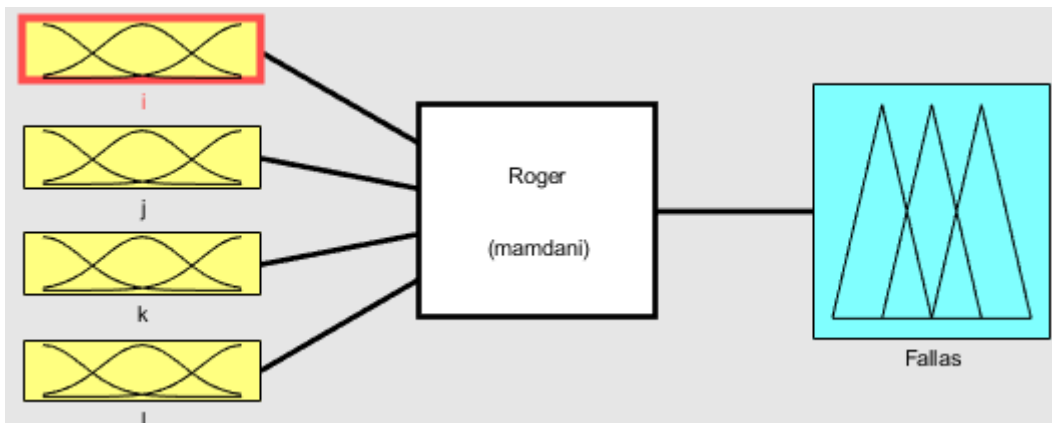


Figura 12. Entradas y Salidas del método de Rogers

4.1.2. Funciones de Pertenencia

El siguiente paso es desarrollar las funciones de pertenencia que describen cada variable. Las funciones que representan los códigos de las relaciones i, j, k, l serán funciones difusas de tipo trapezoidal.

Se emplea el editor de funciones de pertenencia “Membership Function Editor” aperturado el cuadro de diálogo, seleccione una de las variables (i, j, k, l, tipo de falla) y luego haga clic en la opción “Edit” en la barra de menús. Esto despliega el menú similar al que se muestra en la figura 13.

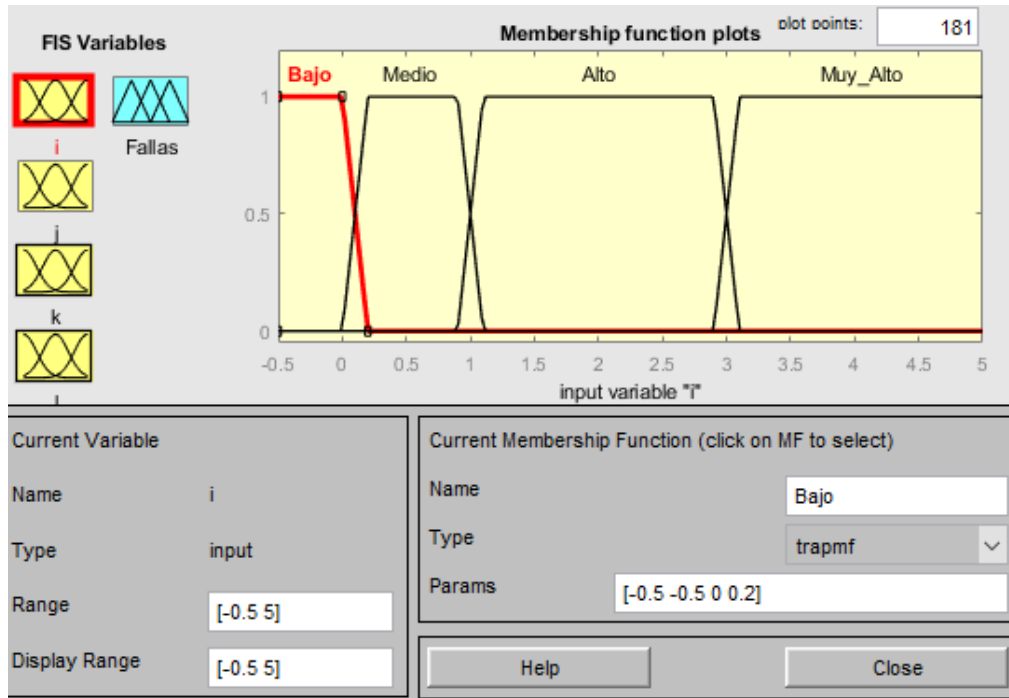


Figura 13. Cuadro de agregar y remover funciones.

En esta ventana, seleccione la opción “Remove All MFs” para eliminar las funciones de pertenencia predeterminadas al configurar las variables de entrada y salida, luego, haga clic nuevamente en la pestaña “Edit” y elija la opción “Add MFs”, que abrirá una ventana similar a la que se muestra en la figura 14.

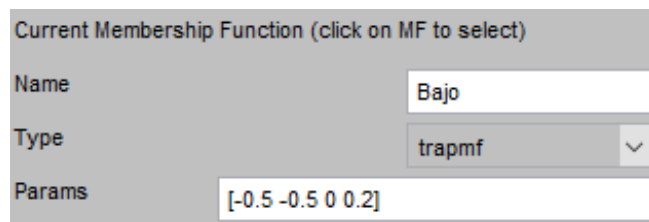


Figura 14. Cuadro para añadir funciones de pertenencia

Esta nueva interfaz gráfica permite al usuario agregar cualquier diferente tipo de funciones de pertenencia; en este caso, se seleccionará la función trapmf. El número de funciones de pertenencia para cada variable de entrada (i, j, k, l) debe coincidir con el número de códigos establecidos en la Tabla 6.

Por ejemplo, para la variable “i”, que tiene cuatro códigos (5, 0, 1, 2 o Bajo, Medio, Alto, Muy Alto), se deben configurar cuatro curvas trapezoidales. Tras seleccionar el tipo y la cantidad de curvas, el usuario debe acceder a la ventana de diálogo mostrado en la figura 15, donde podrá

editar los parámetros de las funciones de pertenencia como el nombre (Name), el tipo (Type) y los puntos de inflexión (Params).

En la parte izquierda de la pantalla, es posible ajustar otros datos de las variables de entrada o salida, como el rango (Range) y el rango de visualización (Display Range) concluido este proceso de fabricación de las funciones, se pueden visualizar las curvas de manera gráfica en la figura 15.

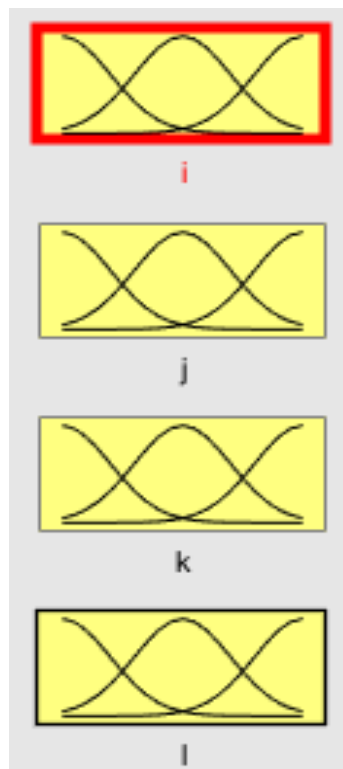


Figura 15. Entrada de funciones de pertenencia i, j, k, l.

El mismo procedimiento utilizado para la variable “i”, se deben construir las curvas para las variables restantes. Para la variable de entrada “j”, se deben configurar dos curvas bajo (0) y alto (1), la variable “k”, se deberán crear tres curvas bajo (0), medio (1) y alto (2). Finalmente, para la variable “l” se implementarán tres funciones bajo (0), medio (1) y alto (2).

En cuanto a la variable de salida “Falla”, se define las funciones de pertenencia de tipo triangular, y el número de curvas corresponderá a la cantidad de fallas identificadas según la clasificación de Rogers, como se detecta en la figura 16.

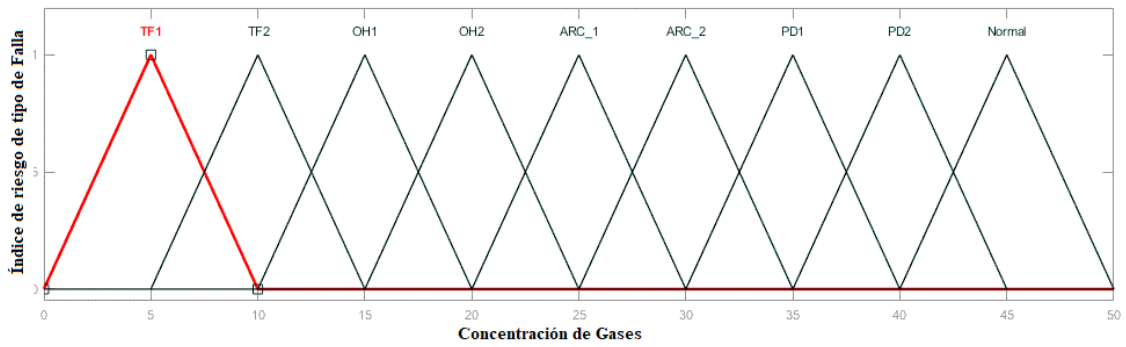


Figura 16. Salida de fallas de Rogers

4.1.3. Reglas Difusas

Tabla 6. Clasificación de fallas según la Rogers[34].

Clasificación de Fallas según Rogers	
Falla	Código
Ligero sobrecalentamiento <150°C	TF1
Sobrecalentamiento de 150°C – 200°C	TF2
Sobrecalentamiento de 200°C – 300°C	TF3
Sobrecalentamiento de conductores	OH1
Corrientes circulantes en devanados	OH2
Corrientes circulantes entre tanque y núcleo, uniones calientes	OH3
Flasheo con bajo flujo	ARC1
Arco con alto flujo	ARC2
Chisporroteo continuo a potenciales flotantes	ARC3
Descargas parciales	PD1
Descargas parciales con huella (observar CO)	PD2
Deterioro Normal	Normal

Para avanzar en la implementación del análisis difuso Rogers se define un conjunto de reglas de SI-ENTONCES (If – Then), las cuales permite llevar a cabo el proceso de inferencia difusa, la construcción de cada regla se obtiene a partir de las fallas que se definen en la tabla 6, un ejemplo de elaborar una regla difusa, si las entradas i, j, k y l se asigna el código (0 1 0 0) se trata de una falla TF3 o sobrecalentamiento de 200°C a 300°C, es decir:

“SI (If) i es Medio AND j es Alto AND k es Bajo AND l es Bajo ENTONCES (Then)

Tipo de Falla es TF_3”

(IV.1)

El operador lógico empleado para combinar las reglas es el operador AND, necesario para cumplir cada regla con el objetivo de poder detectar la salida independiente de cada tipo de falla. En la figura 17 se demuestra cómo se realiza el ingreso de las reglas para el análisis de cada tipo de falla basándonos en la relación de los gases; la creación de cada regla difusa es muy sencilla y amigable para el editor.

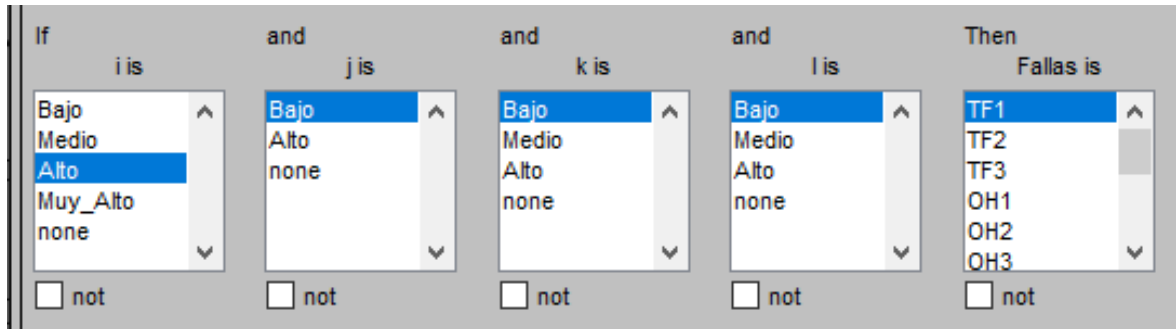


Figura 17. Implementación de reglas difusas para el método de Rogers.

La selección del tipo de conector es el operador AND con el fin de establecer un valor en cada regla y agregar las condiciones correspondientes posibles para modificar y eliminar reglas previamente seleccionadas. La representación gráfica de las 17 reglas, junto con las variables de entrada y salida se visualiza en “Rule Viewer” en la figura 18.

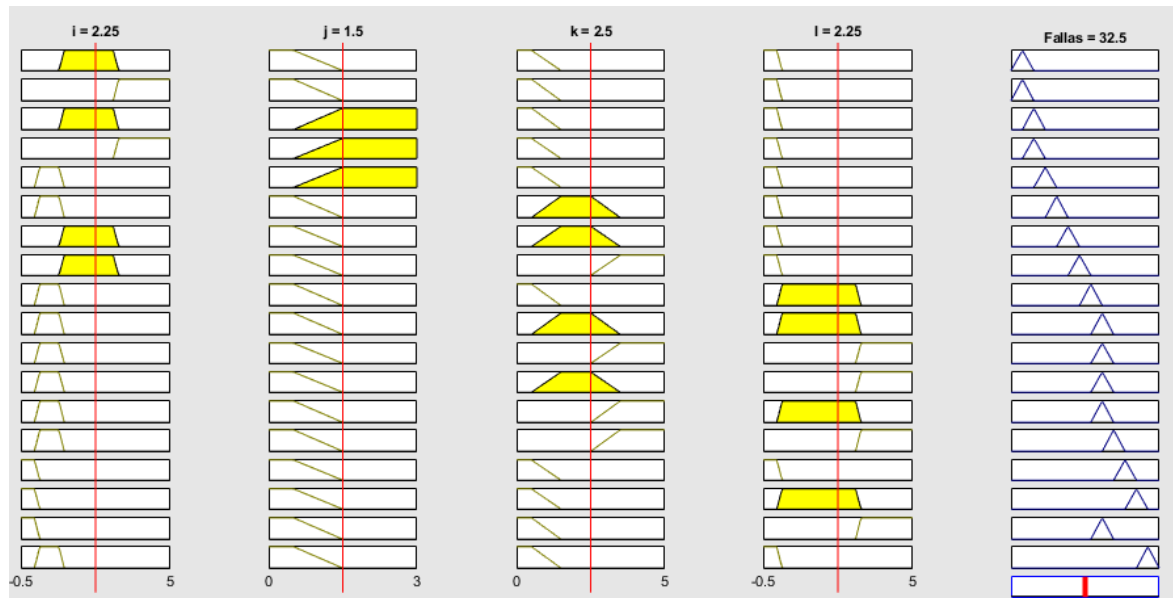


Figura 18. Vista gráfica de las Reglas de Rogers

4.2. Relaciones Difusas IEC

La lógica difusa, en combinación con la IEC, es similar a la técnica de Rogers, el procedimiento incluye la fusificación de las variables para elaborar las funciones y las reglas difusas, utilizando los ratios definidas en la Tabla 7.

Tabla 7. Relaciones difusas IEC[33].

Código de la Relación	Intervalo	Código
l	$x < 0.1$	0 (Bajo)
	$0.1 \leq x \leq 3$	1 (Medio)
	$x > 3$	2 (Alto)
i	$x < 0.1$	1 (Bajo)
	$0.1 \leq x \leq 1$	0 (Medio)
	$x > 1$	2 (Alto)
k	$x < 1$	0 (Bajo)
	$0.1 \leq x \leq 3$	1 (Medio)
	$x > 3$	2 (Alto)

4.2.1. Fusificación de Variables l, i y k

Es necesario incluir únicamente tres variables: “l, i, k”, dado que el método IEC requiere solo tres ratios para detectar una o varias fallas. dentro del diseño de lógica difusa, y siguiendo el procedimiento de Rogers, se establece las funciones difusas de entrada y salida, junto con sus respectivos parámetros, como se muestra en la figura 19.

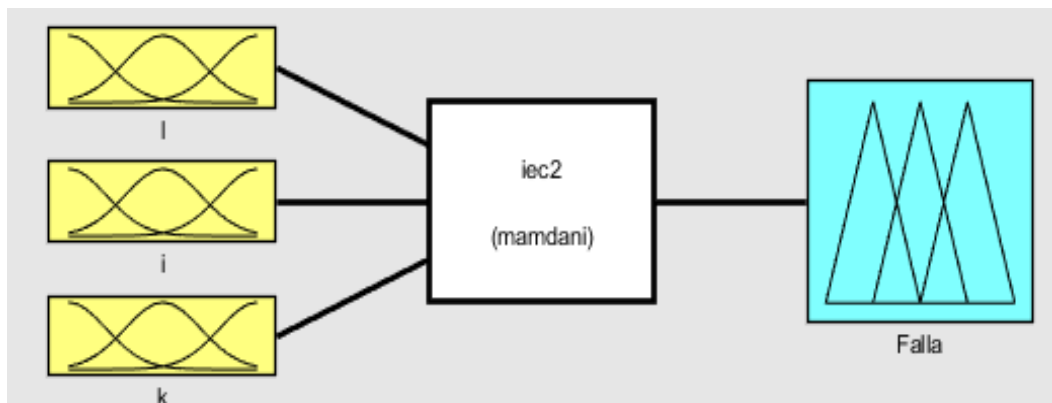


Figura 19. Entradas y Salidas para el método IEC

4.2.2. Funciones de pertenencia IEC

Se define las funciones de pertenencia utilizando la información de la tabla 7 en este caso la variable “k” se han ajustado los intervalos con el método de la IEC previamente estudiados, las curvas correspondientes están detalladas en la figura 20.

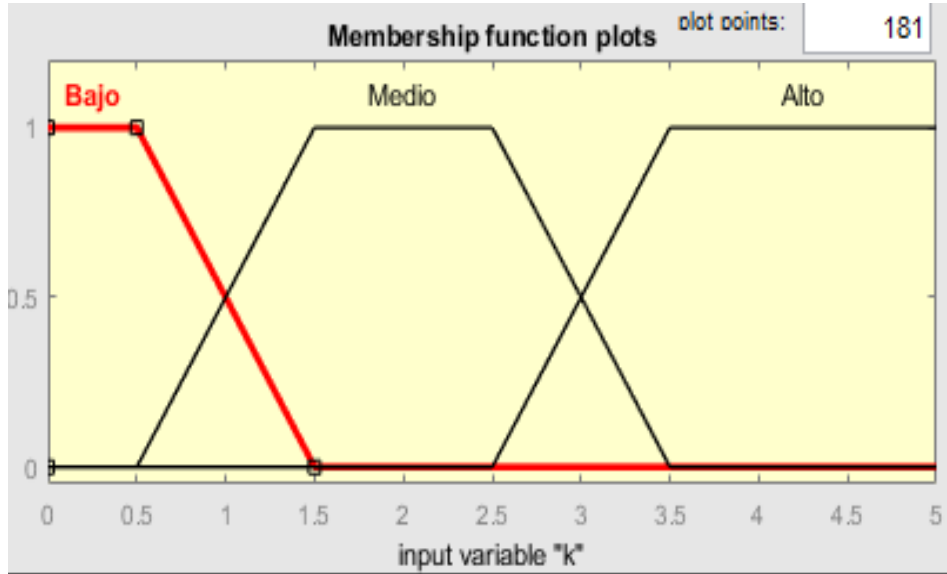


Figura 20. Función k de pertenencia de entrada

Las funciones añadidas son de tipo trapezoidal, sus parámetros, como los puntos de inflexión, el tipo y el nombre, tal como se indicó previamente en el método de Rogers, las variables de salida, se presenta una serie de funciones triangulares, como se ilustra en la figura 21.

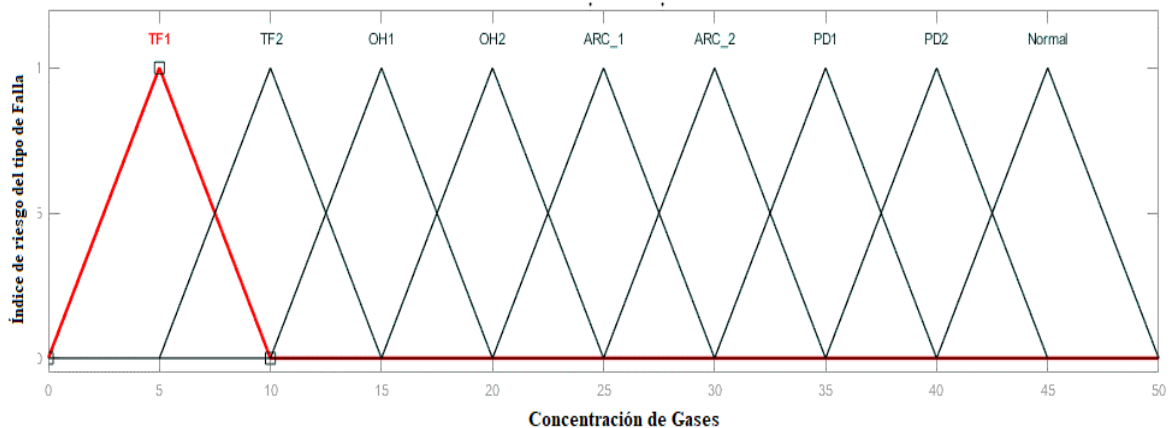


Figura 21. Funciones de salida IEC

4.2.3. Reglas Difusas

Tabla 8. Clasificación de fallas de la IEC[33].

Clasificación de Fallas según la IEC	
Falla	Código
Falla Térmica <150°C	TF1
Falla Térmica de 150°C-300°C	TF2
Falla Térmica de 300°C-700°C	OH1
Falla Térmica >700°C	OH2
Descargas de baja energía	ARC1
Descarga de alta energía	ARC2
PDs de baja densidad de energía	PD1
PDs de alta densidad de energía	PD2
Normal	Normal

En base a la información de la tabla 8, se definen las reglas difusas, las mismas que se incorporan utilizando el procedimiento de Rogers, la figura 22 muestra las reglas incorporadas de manera gráfica cada una de ellas en el visor de reglas.

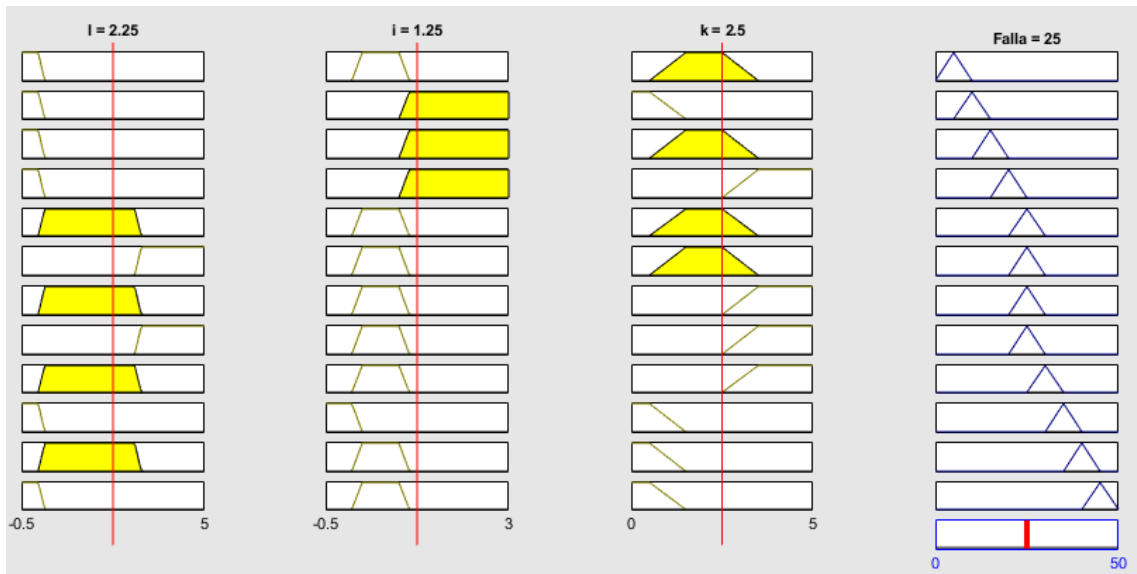


Figura 22. Reglas difusas de IEC

4.3. Identificación de falla en la salida del método difuso de Rogers

Basado en el conjunto de gases del transformador, los valores están en partes por millón (ppm), la relación de Rogers aplicando las ecuaciones presentadas en la tabla 9. Estas ecuaciones se introducen en el modelo para identificar el tipo de falla, utilizando el lenguaje de Mamdani. La

salida del modelo indica si una o dos fallas, ya sean eléctricas o térmicas, podrían ocurrir en la máquina estacionaria.

Tabla 9. Caso base método difuso de Rogers

Cálculo de relación de Rogers							
N	$i = \frac{CH4}{H2}$	$j = \frac{C2H6}{CH4}$	$k = \frac{C2H4}{C2H6}$	$l = \frac{C2H2}{C2H4}$	Salida del Método de Rogers difuso (%)	Falla salida del fuzzy de Rogers	Tipo de Falla general
1	0,15	0,07	16,16	2,70	40,00	Arco con alto flujo	ARC

Para establecer la tabla de salida del modelo difuso de Rogers, se realizaron múltiples entrenamientos en los que la lógica difusa demostró su capacidad para identificar diversas fallas térmicas y eléctricas. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 9, la salida se expresa en porcentajes que indican el tipo de falla incipiente. Además, estos resultados se correlacionan cualitativamente con las fallas especificadas en la tabla 10.

Tabla 10. Salida difusa de Rogers que indica el porcentaje y el tipo de falla [34].

Resultados dependiendo de la salida del fuzzy Rogers		
N.-	Falla	% Tipo de Falla
1	Ligero Sobrecalentamiento < 150°C	5
2	Sobrecalentamiento de 150°C – 200°C	10
3	Sobrecalentamiento de 200°C – 300°C	15
4	Sobrecalentamiento de conductores	20
5	Corrientes circulantes en devanados	25
6	Corrientes circulantes entre tanque y núcleo, uniones calientes	30
7	Flasheo con bajo flujo	35
8	Arco con alto flujo	40
9	Chisporroteo continuo a potenciales flotantes	45
10	Descargas parciales	50
11	Descargas parciales con huella (observar CO)	55
12	Deterioro Normal	60

La tabla 10 describe los tipos generales de fallas, basándose en la clasificación y similitudes entre las fallas eléctricas y térmicas según los métodos de Rogers y la IEC. Los rangos de valores coinciden y pueden validarse en función del grupo de fallas al que pertenecen, como se indica en la tabla 5.

4.4. Identificación de falla en la salida del método difuso de la IEC

Tabla 11. Caso Base método difuso de IEC

Cálculo de relaciones IEC difuso						
N	$l = \frac{C2H2}{C2H4}$	$i = \frac{CH4}{H2}$	$k = \frac{C2H4}{C2H6}$	Método IEC difuso	Falla salida del Fuzzy IEC	Tipo de falla general
1	2,7	0,15	16,17	27,5	Descarga de alta energía	Arc

La tabla 12 presenta un caso base del método difuso de la IEC, en el que se calculan las relaciones para su ingreso en el modelo difuso. En este contexto, las variables l, i y k se emplean como entradas, permitiendo que el sistema identifique fallas incipientes mediante la asignación de valores porcentuales que se correlacionan con tipos específicos de fallas clasificadas; en la tabla 13 se indica mediante la IEC el tipo de falla a cuál pertenece en porcentaje y determinarlo cualitativamente.

Tabla 12. Salida del Fuzzy IEC que indica la falla en forma porcentual y tipo de falla[33].

Análisis de resultados dependiendo la salida del fuzzy IEC		
N.-	Falla	Tipo de Falla
1	Falla Térmica <150°C	5
2	Falla Térmica de 150°C-300°C	10
3	Falla Térmica de 300°C-700°C	15
4	Falla Térmica >700°C	20
5	Descargas de baja energía	25
6	Descarga de alta energía	30
7	PDs de baja densidad de energía	35
8	PDs de alta densidad de energía	40
9	Normal	45

En el ejemplo proporcionado, el modelo difuso de la IEC detecta una descarga de alta energía (arco), coincidiendo con los resultados obtenidos a través del modelo de Rogers. Esta concordancia refuerza la validez de ambos métodos para determinar con precisión fallas incipientes en transformadores de potencia. Cuando es necesario comparar los resultados de ambos modelos, como el difuso de la IEC y el modelo fuzzy de Rogers ofrece una confirmación adicional sobre la naturaleza de la falla, evidenciando la efectividad de lógica difusa en la identificación de fallas.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Esta sección presenta el análisis del estudio de gases disueltos en transformadores de potencia. Se emplearon métodos como la lógica difusa, aplicando las relaciones de IEC y Rogers, y se verificaron los resultados con métodos validados, como la máquina de soporte vectorial (SVM), para los datos de entrenamiento. Para el banco de datos de prueba, se utilizó el triángulo de Duval y gas clave como referencia de confirmación y en el caso real se identifica las fallas incipientes en los trafos de potencia de la subestación Novacero, situada en la provincia de Cotopaxi.

5.1. Análisis de gases disueltos aplicando lógica difusa

5.1.1. Relación de Rogers difuso

El método de Rogers se aplica relaciones difusas las cuales se indicaron en la sección de métodos y procedimientos para la identificación y deducir la falla en la muestra del conjunto de gases, para la introducción de los ratios en los métodos difusos se agrega los valores como se visualiza en la figura 23.

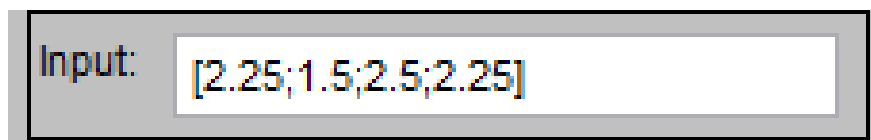


Figura 23. Relaciones de Rogers i, j, k y l.

Ingresado los datos en el cuadro de dialogo se desprende cada una de las condiciones difusas previamente configurada y al final en la salida nos indica el tipo de falla a cuál pertenece una forma muy didáctica de identificar la falla es por medio del trianguló difuso que en la salida se rellena la cual si se verifica en la base de condiciones coincide con la falla que determina en la salida del fuzzy en modo de porcentaje, en la figura 24 se detecta la anomalía en la salida de forma porcentual.

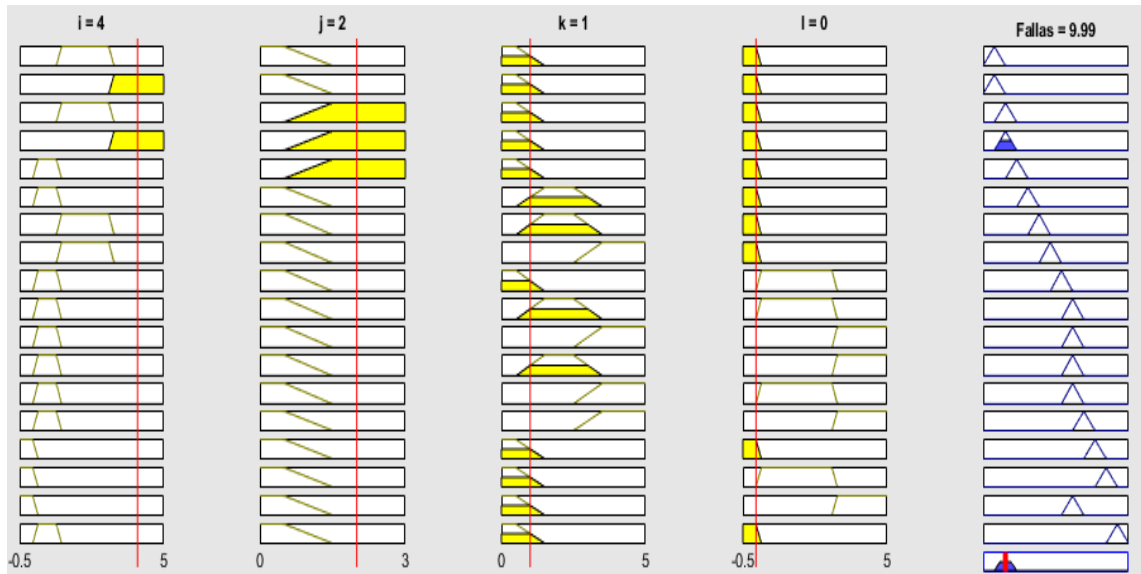


Figura 24. Análisis mediante el difuso de Rogers

La salida del sistema difuso muestra un valor porcentual de 10, que se refleja en la Tabla 11, indicando el tipo de falla correspondiente. En este caso, se identifica una falla térmica, específicamente un sobrecalentamiento en el rango de 150°C a 200°C. Este resultado proporciona al operador una indicación clara para el mantenimiento de la máquina estacionaria. Además, la falla se puede interpretar gráficamente según la salida del sistema difuso, como se representa la figura 25.

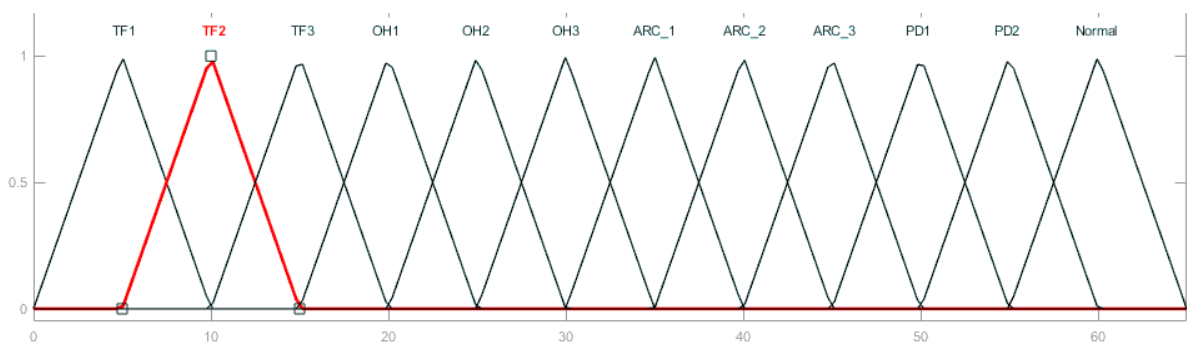


Figura 25. Método didáctico de identificación de falla por el método difuso de Rogers.

5.1.2. Relación de la IEC difuso

El procedimiento del método de Rogers es semejante a la técnica de la IEC, ya que ambos implican la introducción de datos en el sistema difuso. En este caso, se utilizarán solo tres relaciones. La IEC es una versión optimizada del método de Rogers, especialmente en la relación entre etano y metano (C_2H_6/CH_4), que indica la condición de temperatura de

descomposición, sin embargo, no permite identificar de manera coherente una falla específica, la figura 26 muestra las reglas difusas con su salida en forma porcentual; el método didáctico en la figura 27 para identificar la falla eléctrica o térmica.

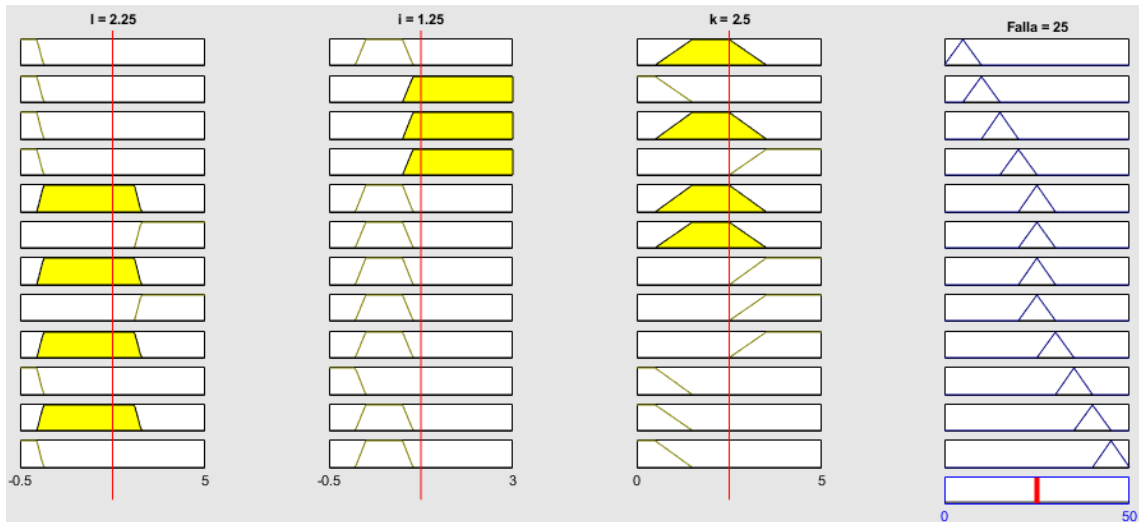


Figura 26. Análisis mediante el difuso de la IEC

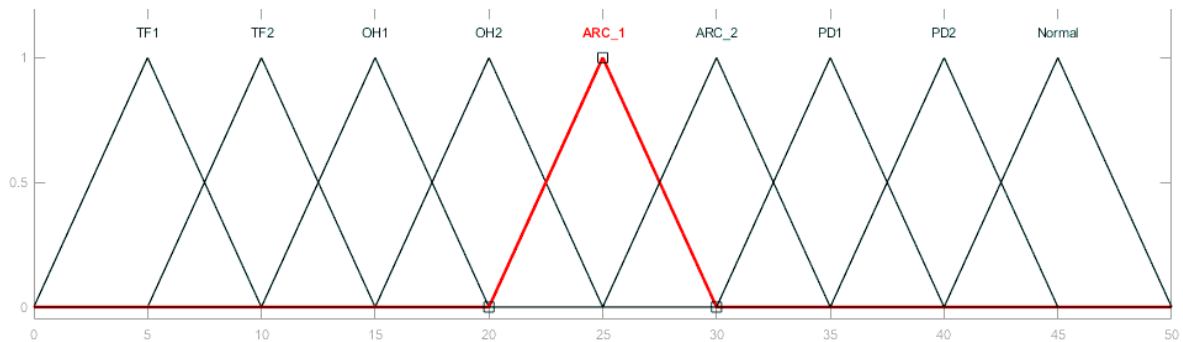


Figura 27. Método didáctico de identificación de fallas por el método difuso de la IEC

Basándose en la salida del sistema difuso y en la salida didáctica, se puede identificar la falla en la Tabla 13, que indica una falla eléctrica debida a descargas de baja energía. Con esta información, el operador y el jefe de mantenimiento pueden elaborar un plan que garantice la operación continua de la máquina estacionaria. En caso de prever una falla grave, la subestación debería implementar un paro de emergencia para realizar el mantenimiento correctivo necesario, asegurando así el suministro eléctrico a los usuarios con el fin de minimizar las pérdidas económicas y en el escenario desfavorable, evitar la necesidad de reemplazar el transformador, el cual es el corazón de un sistema de potencia.

5.2. Análisis de resultados

5.2.1. Análisis de entrenamiento difuso

5.2.1.1. Método de Rogers difuso

El procedimiento de Rogers considera cuatro ratios para identificar y distinguir un rango más amplio en las fallas térmicas. Para validar el modelo difuso de Rogers, se utilizaron 70 conjuntos de datos de gases de transformadores, los cuales fueron comparados con el método de “máquina de soporte vectorial” (SVM). Las salidas de Rogers, presentado en términos porcentuales, se encuentra en la sección de anexos. La Tabla 13 resume las fallas más comunes encontradas en los datos de entrenamiento, lo cual puede ayudar a simplificar la identificación de fallas en futuros análisis de transformadores. Dependiendo de la salida obtenida, se puede utilizar la tabla de salida del sistema difuso de Rogers.

Tabla 13. Identificación de fallas del difuso de Rogers

Análisis de resultados dependiendo la salida del fuzzy Rogers			
N.-	Falla	Tipo de Falla	(%) de Falla
1	Sobrecalentamiento y chisporroteo	OH	32,50
2	Arco	ARC	35,10
3	Desgaste Normal	Normal	60,10
4	Sobrecalentamiento y chisporroteo	OH	29,90
5	Sobrecalentamiento y chisporroteo	OH	30,20
6	Descargas Parciales y corona	DP	50,10
7	Arco	ARC	40,30
8	Normal	Normal	60,10

5.2.1.2. Método de la IEC difuso

El método difuso IEC se centra en tres relaciones clave, lo que mejora la capacidad para distinguir entre fallas eléctricas y térmicas. Para este análisis, se utilizó un conjunto de datos de entrenamiento que mostró una gran similitud con los resultados obtenidos mediante la máquina de soporte vectorial (SVM). Los resultados, expresados en términos porcentuales de acuerdo con su frecuencia de repetición, permitieron la creación de la tabla 14, que resume de manera más sencilla la identificación de fallas en función del difuso IEC.

El uso del método IEC es especialmente beneficioso gracias a su capacidad para ofrecer diagnósticos más precisos y claros, lo que facilita la toma de decisiones en el mantenimiento. La comparación entre los resultados obtenidos mediante el difuso IEC y el modelo de máquina de soporte vectorial (SVM) muestra una gran concordancia, lo que confirma la detección de patrones de fallas.

Tabla 14. Identificación de fallas del difuso IEC

Análisis de resultados dependiendo la salida del fuzzy IEC			
N.-	Falla	Tipo de Falla	(%) de Falla
1	Sobrecalentamiento y chisporroteo	OH	15
2	Sobrecalentamiento y chisporroteo	OH	20
3	Arco	ARC	25
4	Arco	ARC	27,5
5	Descargas Parciales y Corona	DP	35
6	Normal	Normal	45

5.2.1.3. Análisis Rogers e IEC difuso y la máquina de soporte de vectores (SVM)

Los resultados obtenidos SVM para la validación de los métodos difusos de la IEC y Rogers tuvieron gran similitud, la figura 28 muestran los resultados en forma de porcentaje de precisión predictiva donde el método difuso de Rogers muestra el porcentaje de precisión más alto con un 93 %, lo cual indica que este método es ligeramente más eficaz en la identificación de fallas en comparación con el método difuso IEC con un 90 %. El método SVM muestra un resultado competitivo con un 91.43 % de precisión, posicionándose entre los dos métodos difusos, la máquina de soporte de vectores es conocida por su robustez y capacidad de manejar grandes volúmenes de datos.

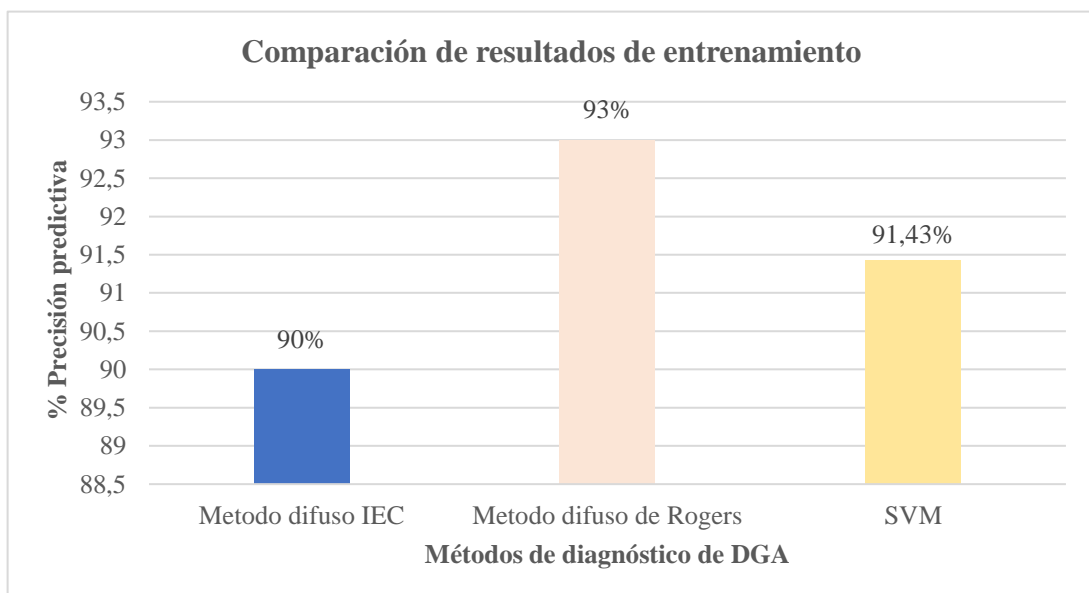


Figura 28. Comparación de resultados de entrenamiento

A continuación, se muestra los errores puntuales por cual los métodos de la IEC y Rogers tienen deficiencia y es que la relación de gases en ambos métodos es la división de un elemento con otro respectivamente para las funciones de pertenencia como se detalla en la tabla 15.

Tabla 15. Ejemplo de datos DGA

Conjunto de datos DGA (ppm)					
N	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
2	127	24	32	0	81

Para el método IEC y de Rogers la relación para las funciones de pertenencia entre los componentes como etileno y el etano depende mucho de los valores del DGA en este caso como son de entrenamiento se toma una data donde se busca la identificación de varios escenarios incluso los errores como se muestra continuación:

$$l(\text{IEC y Rogers Difuso}) = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} = \frac{81}{0} = \text{indefinido}$$

(V.1)

Cuando se encuentra con este tipo de escenarios es porque el aceite mineral o de tipo vegetal no ha sido suministrado a operación dentro del transformador para la emisión de gases, en el caso que existieran valores de ppm igual 0 son valores de laboratorio los cuales son con fines de investigación, en este caso los dos modelos difusos no pueden realizar el diagnóstico de fallas, en el conjunto de datos entrenamientos son 3 lo cual representa 4 %.

5.2.2. Análisis de prueba de los difusos

La tabla 16 muestra la identificación de fallas en un grupo de transformadores de potencia para la validación de los métodos difusos lo cuales en fase de entrenamiento los índices de aciertos son eficientes, las salidas del fuzzy IEC y Rogers se evaluarán en base al método Key de Gas, IEC ratio y Triangulo de Duval, estos últimos son métodos convencionales y clásicos para la identificación de fallas incipiente, cada método tiene su propia nomenclatura para la detectar el estado del transformador y rangos los cuales clasifican las fallas eléctricas y térmicas.

Tabla 16. Comparación de falla por métodos difusos y convencionales de DGA [35].

N	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Falla salida del Fuzzy IEC	Falla salida del Fuzzy de Rogers	Key Gas	IEC Ratio	Duval Triángulo
1	602	90	6	97	262	Descarga de alta energía	Arco con alto flujo	Arco eléctrico y aceite OVH	D2; descarga de alta energía	D1; descarga de baja energía
2	5383	19	4402	31	361	Falla Térmica >700°C y Descargas de baja energía	Corrientes circulantes y Flasheo con bajo flujo	arco eléctrico y PD	T2; falla térmica T > 700 C	T2; falla térmica T > 700 C
3	32	36	19	16	2	Falla Térmica de 150°C-300°C	Sobrecalentamiento de 200°C – 300°C	-	falla térmica, 150 < T < 300 C	falla térmica, 300 < T < 700 C
4	36	79	426	10	1	Falla Térmica de 150°C-300°C	Sobrecalentamiento de 150°C – 200°C	-	falla térmica, 150 < T < 300 C	falla térmica, T < 300 C
5	35	58	204	8	1	Falla Térmica de 150°C-300°C	Sobrecalentamiento de 150°C – 200°C	-	falla térmica, 150 < T < 300 C	falla térmica, T < 300 C
6	79	40	22	33	11	Descargas de baja energía	Arco con alto flujo	-	descarga de baja energía	descarga de alta energía
7	11	10	19	44	2	Falla Térmica <150°C	Corrientes circulantes y Flasheo con bajo flujo	normal	no analizado debido a normal	no analizado debido a normal
8	31	134	502	12	2	Falla Térmica de 150°C-300°C	Sobrecalentamiento de 150°C – 200°C	-	falla térmica, 150 < T < 300 C	falla térmica, T < 300 C
9	5	85	784	30	0	Falla Térmica de 150°C-300°C	Sobrecalentamiento de 150°C – 200°C	-	falla térmica, 150 < T < 300 C	Falla térmica, 300 < T < 700 C
10	27	0	209	739	1224	Descargas de baja energía	Corrientes circulantes y Flasheo con bajo flujo	Arco eléctrico	falla térmica, 150 < T < 300 C	Descarga de alta energía
11	70	21	16	4	2,5	PDs de alta densidad de energía	Flasheo con bajo flujo	-	Falla térmica, 300 < T < 700 C	Falla térmica, 300 < T < 700 C
12	8	169	121	174	0,5	Falla Térmica de 300°C-700°C	Sobrecalentamiento de 150°C – 200°C	-	Falla térmica, 300 < T < 700 C	Falla térmica, 300 < T < 700 C

El método Key de gas o método de gas clave sus rangos solo se limitan a la obtención de descargas parciales, arco eléctrico, sobrecalentamiento del aceite y sobrecalentamiento en la celulosa (papel), estos rangos no contribuyen a una correcta identificación en fallas eléctrica y térmicas de la máquina estacionaria, pero con fines investigativos se toma en cuenta los resultados para la validación de los modelos difusos en base a la tabla 4 de agrupación de fallas, el método del triángulo de Duval es un método clásico donde su metodología e identificación de fallas son muy similares a los métodos de Roger e IEC, la figura 29 se presenta el porcentaje de aciertos predictivos.

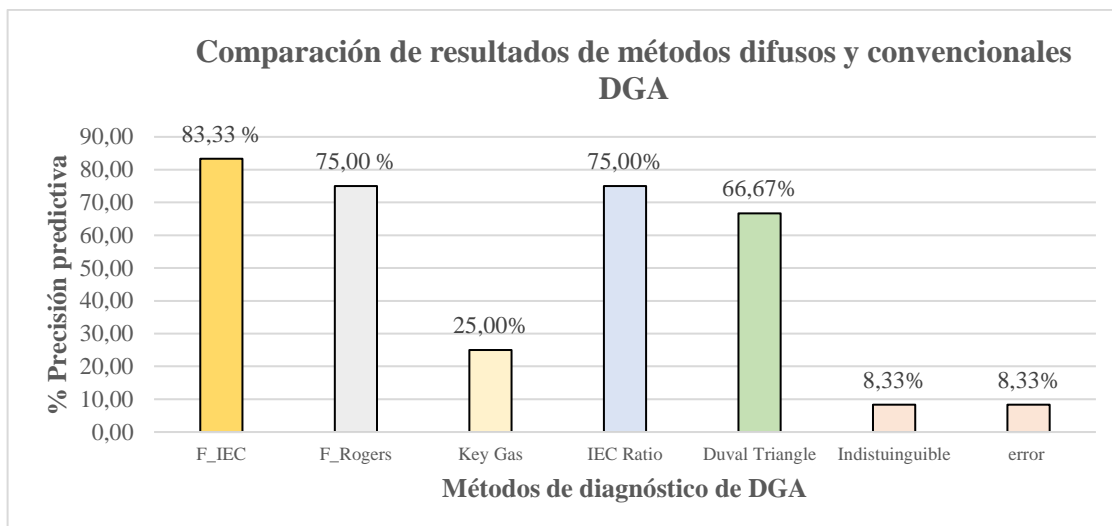


Figura 29. Métodos de análisis de gases

Los resultados de los diversos métodos de análisis de gases disueltos aplicados con y sin lógica difusa muestran una alta efectividad en la asociación de fallas incipientes en el trafo de potencia, el método difuso IEC aplicado destaca con el 83,33 %, indicando un alto índice de acierto en la identificación de anomalías en convertidor eléctrico. El método de difuso Rogers muestra un acierto del 75 % similar a la IEC ratio en comparación a la técnica Key Gas solo alcanza un 25 %, y el método triángulo de Duval una efectividad del 66,67 %, mientras que los indicadores de fallas indistinguibles y errores se mantienen bajos en un 8,33 %, reflejando una gran capacidad de precisión predictiva de los métodos para identificar fallas eléctricas o térmicas.

Este análisis sugiere que la integración de la lógica difusa mejora notablemente la precisión de los métodos tradicionales DGA, mientras que los métodos como el Key Gas podrían necesitar ajustes o complementarse con otros enfoques para mejorar su rendimiento.

Tabla 17. Validación de fallas por métodos difusos y convencionales de DGA

N	Validación	Tipo Falla	Fuzzy IEC	Fuzzy Rogers	Key Gas	IEC Ratio	Triángulo de Duval
1	Si	Arc	Si	Si	Si	Si	Si
2	Si	Arc	Si	Si	Si	No	No
3	Si	TF	Si	Si	-	Si	No
4	Si	TF	Si	Si	-	Si	Si
5	Si	TF	Si	Si	-	Si	Si
6	Si	Arc	Si	Si	-	Si	Si
7	Indistinguible	-	-	-	-	-	-
8	Si	TF	Si	Si	-	Si	Si
9	Si	TF	SI	SI	-	Si	No
10	Si	Arc	Si	Si	Si	No	Si
11	No	OH	No (DP)	No (ARC)	-	Si	Si
12	Si	OH	Si	No	-	SI	SI

En la Tabla 17, el caso 7 se categoriza como falla indistinguible debido a que los métodos difusos presentaron tipos de falla diferentes, los métodos convencionales, como el método de gas clave y la combinación de IEC con el triángulo de Duval, estos no fueron analizados, llevando a la conclusión de que la falla no puede ser identificada. Por otro lado, en el conjunto 8 de gases, los métodos difusos no coinciden con los resultados de los métodos convencionales, considerándose erróneas las salidas del enfoque fuzzy. La solución más acertada sería ajustar o modificar los rangos de las reglas de las funciones difusas basándose en la operación de un banco de transformadores con fallas conocidas, lo cual facilitaría la identificación precisa de problemas. Dado que la duración mínima de vida de un transformador eléctrico es de 25 a 30 años, es crucial que la investigación se traslade al ámbito técnico para reducir los índices de error.

5.2.3. Análisis del caso práctico

El estudio de gases disueltos en los transformadores de potencia de la subestación Novacero, se ha identificado las fallas utilizando métodos de lógica difusa basados en los criterios de la IEC y de Rogers. Los transformadores analizados son tres: transformador 60 MVA a 138 kV, transformador 20 MVA a 18 kV y transformador 20 MVA a 13,8 kV en la tabla 18 muestra la identificación de las fallas en la máquina estacionaria.

Tabla 18. Identificación de fallas del patio de transformadores de la subestación Novacero

Identificación de fallas incipientes de transformadores de potencia en la subestación Novacero											
Transformador S/E Novacero	Fecha de análisis	#	H2 (ppm)	CH4 (ppm)	C2H6 (ppm)	C2H4 (ppm)	C2H2 (ppm)	Falla Fuzzy IEC	Falla Fuzzy Rogers	Falla	Acierto
Trafo 60 MVA a 138 kV	13/5/2016	1	10	5	3	1	0	Normal	Deterioro Normal	Normal	Si
	28/9/2017	2	12	6	2	6	3	Descarga de baja y alta energía	Arco con alto flujo	Arc	Si
	3/2/2018	3	20	7	2	9	6	(Descarga de Alta o Baja Energía)	Arco con alto flujo	Arc	Si
	2/3/2018	4	20	7	2	9	4	(Descarga de Alta o Baja Energía)	Arco con alto flujo	Arc	Si
	23/6/2018	5	26	10	1	9	3	(Descarga de Alta o Baja Energía)	Arco con alto flujo	Arc	Si

Trafo 20 MVA a 18 kV	28/9/2017	1	13	3	2	2	2	Descarga de alta energía y descargas parciales	Flasheo con bajo flujo y Arco	Arc	Si
	3/2/2018	2	10	5	2	2	2	Descarga de alta energía y descargas parciales	Flasheo con bajo flujo y Arco	Arc	Si
	2/3/2018	3	10	5	2	2	2	Descarga de alta energía y descargas parciales	Flasheo con bajo flujo y Arco	Arc	Si
Trafo 20 MVA a 13,8 kV	28/9/2017	1	5	1	2	1	2	Descargas Parciales de alta densidad de energía	Corrientes circulantes y Flasheo		No
	3/2/2018	2	10	5	2	2	2	Descarga de alta energía y descargas parciales	Flasheo con bajo flujo y Arco	Arc	Si
	2/3/2018	3	10	5	2	2	2	Descarga de alta energía y descargas parciales	Flasheo con bajo flujo y Arco	Arc	Si

- **Análisis del transformador 60 MVA a 138 kV**

La Tabla 18 muestra las fallas y el estado de operación del transformador de 60 MVA. En su primer conjunto de gases, el transformador se encuentra operando en un estado normal o con un deterioro típico de la máquina. Sin embargo, desde el segundo hasta el quinto grupo de gases, el método IEC difuso identifica descargas de baja o alta energía. Además, el método difuso de Rogers señala la presencia de un arco de alto flujo, caracterizado como un tipo de arco eléctrico. Esto se asocia con altos niveles de hidrógeno (H_2), lo que sugiere la necesidad de revisar el transformador para detectar posibles problemas, como malas conexiones de potencial, soldaduras rotas, o separadores de bobinas. Según la norma IEC, estas condiciones también pueden dar lugar a la formación de arcos eléctricos, así como a cortocircuitos entre devanados o espiras. Estos diagnósticos se confirman mediante la frecuencia con la que se ha realizado el análisis de gases a lo largo del año.

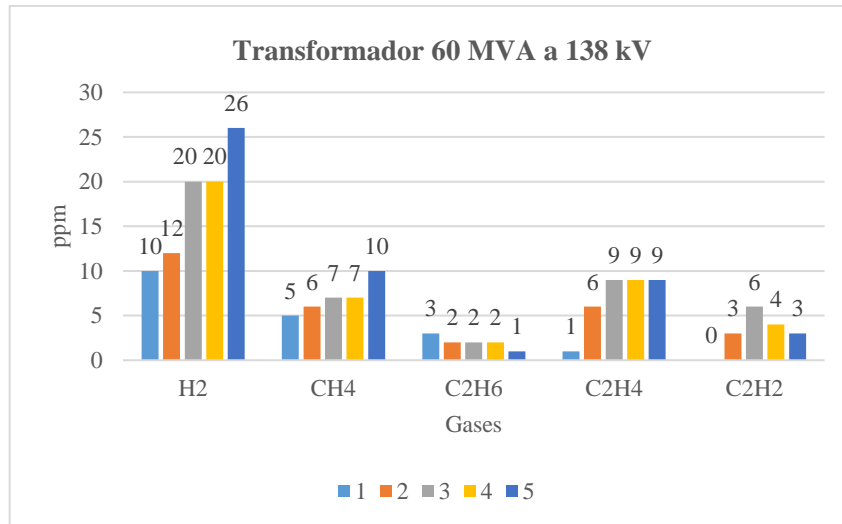


Figura 30. Conjunto de gases del Transformador 60 MVA

• **Análisis del transformador 20 MVA a 18 kV**

La identificación mediante el método IEC clasifica la falla como una descarga de alta energía y descargas parciales, mientras que el método de Rogers señala un flasheo con bajo flujo y arco, definiendo la falla como un arco eléctrico. Estas condiciones requieren la revisión de posibles cortocircuitos entre devanados o espiras, así como la inspección de descargas en espacio llenos de gas, que puede ser causadas por una impregnación incompleta del papel aislante (la celulosa no está completamente saturada con aceite dieléctrico), alta humedad en el papel, o la formación de cera en el papel, la presencia de estas fallas se valida por los elevados valores de hidrógeno detectados en el análisis.

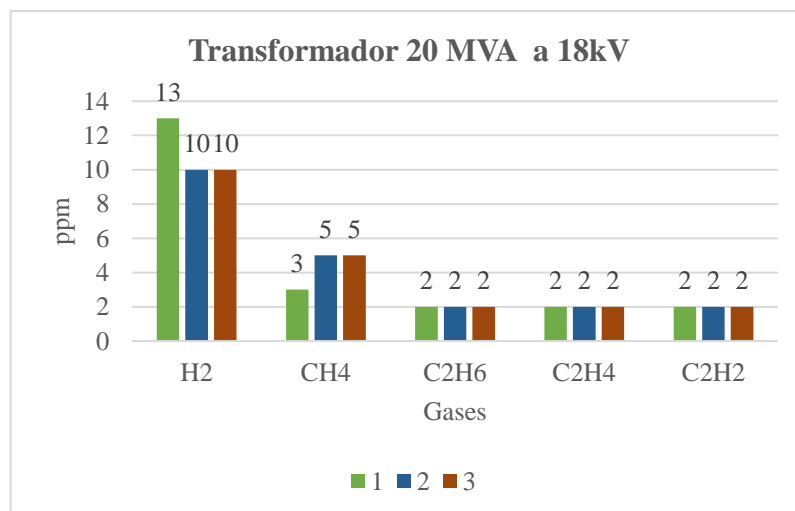


Figura 31. Conjunto de gases del transformador 20 MVA a 18 kV

- **Análisis del transformador 20 MVA a 13.8 kV**

En el conjunto de gases del transformador de 20 MVA a 13.8 kV, en la muestra del 28 de septiembre de 2017, los métodos de análisis mostraron diferencias en la identificación de fallas. El método IEC difuso identificó descargas parciales de alta energía, mientras que el método de Rogers señaló la presencia de corrientes circulantes en el núcleo y flasheo con bajo flujo. Según el método IEC difuso, se trata de descargas parciales de tipo eléctrico, mientras que el método de Rogers las clasifica como arcos eléctricos. Los operadores deben inspeccionar la presencia de humedad en el papel aislante y posibles cortocircuitos entre devanados o espiras.

Después de superar la anomalía inicial, se realizaron más pruebas en febrero y marzo de 2018, durante estas pruebas, el método IEC difuso volvió a identificar descargas parciales de alta energía, y el método de Rogers detectó flasheo, ambos categorizando la falla como un arco eléctrico. Es crucial revisar la humedad del papel aislante y la formación de cera, lo que el método de Rogers valida por la presencia de hidrógeno.

La falla persiste debido a la imposibilidad de interrumpir el suministro de energía a los usuarios, ya que el tiempo mínimo de reparación es de 1 a 3 días, y en casos mayores, de hasta 7 días. Para llevar a cabo el mantenimiento, se debe instalar una subestación móvil que permita continuar el suministro eléctrico mientras se realizan las reparaciones. Los métodos IEC difuso y Rogers difuso, mediante la identificación precisa de las fallas, pueden optimizar el tiempo de mantenimiento y asegurar que la falla se corrija de manera óptima.

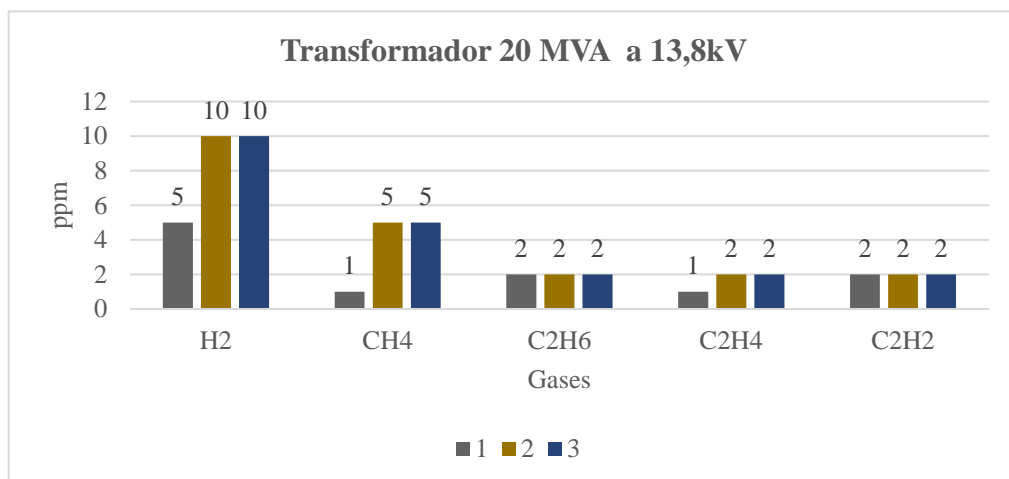


Figura 32. Conjunto de gases del transformador 20 MVA a 13.8kV

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Los métodos difusos de análisis de gases disueltos (DGA) han facilitado la identificación de fallas incipientes en transformadores, la integración de la lógica difusa en los modelos IEC y de Rogers, se convierte en una herramienta eficaz para predecir una o varias fallas con mayor precisión, permite desarrollar estrategias de mantenimiento más directas y planificadas, lo que ayuda a reducir pérdidas y minimizar los costos de mantenimiento, la implementación de estos difusos es económica y fácil de manejar, lo que hace que su uso sea accesible y práctico para optimizar el mantenimiento de transformadores.
- Los métodos más efectivos para la identificación de fallas térmicas y eléctricas son el modelo difuso de Rogers, que alcanza una precisión del 92 %, y el método IEC difuso, es superior con un 94.8 %, estas cifras reflejan una alta precisión en la identificación de tipos de fallas cuando se aplica la lógica difusa. La ligera ventaja del método IEC se debe a su mejor capacidad para adaptarse y detectar anomalías en situaciones reales, en los conjuntos de datos de prueba, el método de Rogers mostró una eficiencia del 83 %, mientras que el método IEC alcanzó un 92 % en comparación con los métodos convencionales. La efectividad de ambos métodos difusos resalta su utilidad en la mejora del mantenimiento predictivo, facilitando decisiones precisas y contribuyendo a prolongar la vida útil del transformador.
- Los ratios utilizados en los métodos IEC y de Rogers dependen de las concentraciones de gases en ppm en cada elemento, la obtención de las funciones de pertenencia puede ser errónea si falta alguno de los gases, estos ratios se calculan mediante la división de un gas por otro, la ausencia de los mismos provoca que el ratio se vuelva indefinido, las posibles causas de esta ausencia pueden incluir condiciones operativas inusuales del transformador, como cambios ambientales, reparaciones o sobrecargas, así como fallas en los equipos de muestreo o el uso de aceite nuevo. En tales casos, la predicción de fallas puede ser incorrecta, lo que se traduce en un margen de error del 5.2 % en el método difuso IEC y del 8 % en la técnica de Rogers.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda que la investigación de fallas incipientes mediante lógica difusa debería trasladarse al ámbito de operación y mantenimiento de transformadores, ya que los rangos de evaluación de fallas pueden ajustarse para reducir el margen de error. Para lograrlo, es fundamental que el personal se interese en la predicción de fallas. La normativa IEC 60599 utiliza un método basado en códigos para identificar fallas incipientes, pero con un nivel de acierto limitado, la lógica difusa se presenta como una herramienta valiosa, comúnmente utilizada en sistemas de control difuso como los de Takagi-Sugeno, que se aplican para el control, el caso de los sistemas de Mamdani, la lógica difusa ayuda a identificar de forma porcentual el tipo de falla eléctrica o térmica. Sin embargo, este enfoque ha sido poco investigado en el ámbito eléctrico, siendo un paso esencial en cara a la inteligencia artificial, ofrece un campo prometedor para futuras investigaciones.
- Se recomienda llevar a cabo una mejora continua y validación de los modelos de lógica difusa utilizados en el análisis de gases disueltos (DGA) mediante los métodos IEC y de Rogers. Esto implica actualizar periódicamente las funciones de pertenencia y las reglas difusas en función de nuevos hallazgos en el campo, asegurando así que se adapten a la realidad operativa.

7. REFERENCIALES

- [1] L. Yang, R. Liao, S. Caixin, and M. Zhu, “Influence of vegetable oil on the thermal aging of transformer paper and its mechanism,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 3, pp. 692–700, Jun. 2011, doi: 10.1109/TDEI.2011.5931054.
- [2] E. O. Cholota Morocho, “Gestión de datos del análisis físico-químico y su influencia en el tiempo de entrega de indicadores de operatividad de los transformadores de distribución de la empresa INEDYC,” 2017, Accessed: Aug. 06, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/25710>
- [3] T. V. Oommen, C. C. Claiborne, E. J. Walsh, and J. P. Baker, “New vegetable oil based transformer fluid: Development and verification,” *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Annual Report*, vol. 1, pp. 308–312, 2000, doi: 10.1109/CEIDP.2000.885288.
- [4] J. M. Castro-Meneses, G. A. Gómez-Ramírez, and O. Núñez-Mata, “Índice de estimación de la vida residual en transformadores eléctricos de potencia basado en condición,” *Revista Tecnología en Marcha*, Sep. 2022, doi: 10.18845/TM.V35I4.5776.
- [5] B. S. Chiriboga Valencia, “Diseño de una plataforma digital para detección y diagnóstico de fallas incipientes o avanzadas para transformadores de potencia, basado en el análisis de gases disueltos (DGA),” 2022, Accessed: Aug. 06, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22610>
- [6] W. Quitiaquez *et al.*, “Análisis Comparativo entre el Aceite Mineral y el Aceite Vegetal Utilizados como Dieléctricos y Refrigerantes para Transformadores de Potencia,” *Revista Técnica “energía,”* vol. 16, no. 1, pp. 79-87 pp., Jul. 2019, doi: 10.37116/REVISTAENERGIA.V16.N1.2019.338.
- [7] G. Aponte, W. Herrera, C. González, and J. Pleite, “Implementación de un Modelo de un Transformador Eléctrico para el Análisis de su Respuesta en Frecuencia,”

- Información tecnológica*, vol. 22, no. 4, pp. 5–72, 2011, doi: 10.4067/S0718-07642011000400008.
- [8] C. Q. Su, “A new fuzzy logic method for transformer incipient fault diagnosis,” *2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE 2016*, pp. 324–327, Nov. 2016, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2016.7737704.
- [9] X. Wang, C. Tang, B. Huang, J. Hao, and G. Chen, “Review of Research Progress on the Electrical Properties and Modification of Mineral Insulating Oils Used in Power Transformers,” *Energies 2018, Vol. 11, Page 487*, vol. 11, no. 3, p. 487, Feb. 2018, doi: 10.3390/EN11030487.
- [10] I. Rondón, Calanche, and F. Rojas, “Metodología para estimar la vida útil del autotransformador AT-4, 700 MVA de la subestación Guayana ‘B’ debido a sobrecargas,” pp. 1–11, 2013.
- [11] International Electrotechnical Commission, “IEC 60076-11:2021 Transformadores de potencia.” Accessed: Jul. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0065516>
- [12] B. A. Adaramola, B. Akindade Adaramola, and D. Danjuma Chirpyen, “Experimental investigation of insulation resistance for turbo generator digital protection,” *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, vol. 2020, no. 02, pp. 30–037, 2020, doi: 10.30574/gjeta.
- [13] J. D. Zorrilla Henao, A. Céspedes Fernández, D. F. García Gómez, J. D. Zorrilla Henao, A. Céspedes Fernández, and D. F. García Gómez, “Técnicas para el diagnóstico de transformadores de potencia: Una revisión crítica,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 28, no. 2, pp. 184–203, Jun. 2020, doi: 10.4067/S0718-33052020000200184.
- [14] O. Adalberto and A. Ponce, “Análisis de respuesta en frecuencia para el diagnóstico de un transformador de potencia,” 2018, Accessed: Jul. 23, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69831>
- [15] A. D. Muñoz Pérez, *Metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) aplicada a transformadores de potencia* /. USAC, 2018.

- [16] J. Song, “Actual Measurement and Analysis of Power Transformer Dynamic Stability Diagnosis by Low Voltage Reactance Method Based on Short Circuit Test Check,” *2020 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science, TOCS 2020*, pp. 104–108, Dec. 2020, doi: 10.1109/TOCS50858.2020.9339613.
- [17] E. Mechkov, “Application of infrared thermography technique in transformers maintenance in distribution network,” *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2017 - Proceedings*, pp. 354–357, Jun. 2017, doi: 10.1109/ELMA.2017.7955462.
- [18] “C57.106-2015 - IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment - Redline,” 2016.
- [19] “C57.106-2015 - IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment,” 2016.
- [20] L. Hamrick, “Dissolved Gas Analysis for Transformers,” 2009, Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: www.netaworld.org
- [21] D. Zhou *et al.*, “Examining acceptable dissolved gas analysis level of in-service transformers,” *ICHVE 2012 - 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, pp. 612–616, 2012, doi: 10.1109/ICHVE.2012.6357050.
- [22] “C57.104-2019 - IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers,” 2019.
- [23] S. Souahlia, K. Bacha, and A. Chaari, “SVM-based decision for power transformers fault diagnosis using Rogers and Doernenburg ratios DGA,” *2013 10th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2013*, 2013, doi: 10.1109/SSD.2013.6564073.
- [24] I. B. M. Taha, A. Hoballah, and S. S. M. Ghoneim, “Optimal ratio limits of rogers’ four-ratios and IEC 60599 code methods using particle swarm optimization fuzzy-logic approach,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 1, pp. 222–230, Feb. 2020, doi: 10.1109/TDEI.2019.008395.

- [25] P. Kudłacik, “Performance evaluation of Baldwin’s fuzzy reasoning for large knowledge bases,” *Journal of Medical Informatics & Technologies*, vol. 20, no. null, pp. 29–38, 2012.
- [26] J. M. Mendel, “Fuzzy Sets and Fuzzy Logic,” *Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems*, pp. 25–99, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-51370-6_2.
- [27] M. León *et al.*, “Aplicación de lógica difusa y algoritmos genéticos para clasificación de tratamientos contra enfermedades neoplásicas malignas,” *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, vol. 35, no. 2, pp. 36–41, 2016, Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-02642016000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [28] P. Venkata Subba Reddy, “Generalized fuzzy logic for incomplete information,” *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2013, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2013.6622305.
- [29] E. P. Dadios and E. P. Dadios, “Fuzzy Logic - Algorithms, Techniques and Implementations,” *Fuzzy Logic - Algorithms, Techniques and Implementations*, Mar. 2012, doi: 10.5772/2663.
- [30] J. P. Lata Cando, “Análisis del estado funcional de transformadores de potencia con voltaje de funcionamiento de hasta 500kV mediante el uso de lógica difusa,” 2022, Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22517>
- [31] D. Guzmán and V. M. Castaño, “La lógica difusa en ingeniería: principios, aplicaciones y futuro,” *Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 24, no. 2, pp. 87–107, 2006, Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/cienciaytecnologia/article/view/2640>
- [32] “Fuzzy Logic Toolbox - MATLAB.” Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html>
- [33] S. Genc and S. Karagol, “Fuzzy Logic Application in DGA Methods to Classify Fault Type in Power Transformer,” *HORA 2020 - 2nd International Congress on*

Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, Proceedings, Jun. 2020, doi: 10.1109/HORA49412.2020.9152896.

- [34] “C57.104-2019 - IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers,” 2019.
- [35] N. Poonnoy, C. Suwanasri, and T. Suwanasri, “Fuzzy Logic Approach to Dissolved Gas Analysis for Power Transformer Failure Index and Fault Identification,” *Energies 2021, Vol. 14, Page 36*, vol. 14, no. 1, p. 36, Dec. 2020, doi: 10.3390/EN14010036.