



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales No Renovables

Maestría en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Cálculo del Índice de Salud de los Transformadores de Potencia de hasta 69 kV
mediante lógica difusa

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

AUTOR:

Ing. Jorge Isaac Peralta Córdova

DIRECTORA:

Ing. Marianela del Cisne Carrión González Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2022

Certificación

Loja, 03 de octubre del 2022

Ing. Marianela del Cisne Carrión González Mg. Sc.

DIRECTORA DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Cálculo del Índice de Salud de los Transformadores de Potencia de hasta 69 kV mediante lógica difusa**, previo a la obtención del título **de Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia**, de la autoría del estudiante **Jorge Isaac Peralta Córdova, con cedula de identidad N° 1105166068**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Ing. Marianela del Cisne Carrión González Mg. Sc.

DIRECTORA DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, Jorge Isaac Peralta Córdova, declaro ser autor del Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula de Identidad: 1105166068

Fecha: 03/10/2022

Correo electrónico: joper2991@gmail.com

Teléfono: 072546667

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica de texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Jorge Isaac Peralta Córdova** declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Cálculo del Índice de Salud de los Transformadores de Potencia de hasta 69 kV mediante lógica difusa**, como requisito para optar el título de **Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los tres días del mes de octubre del dos mil veintidós.

Firma:

Cédula de Identidad: 1105166068

Dirección: Fleming y Hegel (Loja)

Correo electrónico: joper2991@gmail.com

Teléfono: 072546667

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Directora de Trabajo de Titulación: Ing. Marianela del Cisne Carrión González Mg. Sc.

Dedicatoria

Dedico el presente trabajo a mis padres, mis hermanos y mis sobrinas; las personas más importantes de mi vida, por su constante cariño y apoyo, por compartir mi felicidad en los buenos momentos y por ser mi fortaleza en los malos.

A mis abuelos, cuyo espíritu nunca me ha abandonado, por el tiempo que compartieron conmigo, por las enseñanzas y la indeleble huella que dejaron en mí.

A mis amigos, compañeros y a todas quienes han contribuido de manera directa o indirecta en la obtención de este logro personal, por brindarme su colaboración en los momentos difíciles.

Jorge Isaac Peralta Córdova

Agradecimiento

Al culminar el presente Trabajo de Titulación quiero agradecer a Dios, quién me ha proporcionado los dones necesarios para lograr este objetivo y cuya guía ha forjado mi camino.

Mi eterna e imperecedera gratitud a la Universidad Nacional de Loja, en especial a la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables y al programa de Maestría en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia, a sus autoridades, personal docente y administrativo; por permitirme continuar con mi formación profesional.

A mi familia, por su sacrificio, por siempre brindarme su apoyo incondicional en todos los proyectos en los que he acometido.

A la Ing. Marianela del Cisne Carrión González Mg. Sc. y al PhD. Jorge Enrique Carrión González, por su dedicación y acertada dirección en el desarrollo del presente trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a mis amigos y a todas las personas que han estado presentes durante este proceso, esto es por y para Ustedes, no lo hubiera logrado sin su ayuda.

¡¡¡Gracias totales!!!

Jorge Isaac Peralta Córdova

Índice de contenidos

Portada.....	i
Certificación	ii
Autoría.....	iii
Carta de autorización.	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos.....	vii
Índice de Tablas.....	x
Índice de Figuras	xi
Índice de Anexos.....	xii
1. Título... ..	1
2. Resumen.....	2
2.1 Abstract.....	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	6
4.1. Capítulo I.....	6
4.1.1. Transformador	6
4.1.2. Índice de salud del transformador	6
4.1.3. Lógica difusa	9
4.1.3.1. Variables lingüísticas.....	13
4.1.3.2. Reglas difusas.....	14
4.1.3.3. Operaciones con conjuntos difusos	14
4.1.3.4. Etapas de un modelo difuso.....	16
4.1.3.4.1. Fusificación	16

4.1.3.4.2. Evaluación a partir de reglas difusas	16
4.1.3.4.3. Defusificación.....	17
4.1.4. Pruebas de diagnóstico al aceite dieléctrico del transformador de potencia	19
4.1.4.1. Rigidez dieléctrica	20
4.1.4.2. Factor de disipación.....	21
4.1.4.3. Humedad en el aceite del transformador	21
4.1.4.4. Número de acidez o neutralización	22
4.1.4.5. Análisis de gases disueltos	23
4.1.4.6. Análisis de contenido de furanos y grado de polimerización.....	25
4.2. Capítulo II.....	28
4.2.1. Formulación de las funciones de membresía.....	28
4.2.1.1. Salida (HI)	28
4.2.1.2. Contenido de humedad.....	29
4.2.1.3. Número de acidez.....	30
4.2.1.4. Rigidez dieléctrica	31
4.2.1.5. Grado de Polimerización	32
4.2.1.6. Contenido total de gases disueltos.....	33
4.2.1.7. Factor de disipación.....	34
4.2.2. Formulación de las reglas difusas.....	35
4.2.3. Formulación del modelo difuso.....	36
4.2.4. Metodología para la determinación del índice de salud de transformadores de potencia de hasta 69 kV sumergidos en aceite.....	39
4.2.4.1. Cálculo del HI de una flota de TP's	41
5. Metodología	44
Área de Estudio	44

Procedimiento.....	44
Procesamiento y análisis de datos	45
Métodos	45
Método deductivo.....	45
Método analítico cuantitativo	45
Técnicas.....	45
Técnica documental.....	45
6. Resultados	46
7. Discusión	49
8. Conclusiones	50
9. Recomendaciones	51
10. Bibliografía	52
11. Anexos	55

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de funciones de membresía con sus respectivas definiciones matemáticas	12
Tabla 2. Valores aceptables de ruptura dieléctrica para líquidos aislantes nuevos y en servicio, por nivel de voltaje	20
Tabla 3. Valores límite de factor de disipación para aceite nuevo	21
Tabla 4. Nivel aceptable de humedad en aceites minerales según el voltaje de funcionamiento.	22
Tabla 5. Nivel aceptable de acidez en aceites minerales según el voltaje de funcionamiento ...	23
Tabla 6. Gases totales disueltos en el aceite en partes por millón (ppm)	24
Tabla 7. Fin de vida del papel aislante en función del grado de polimerización y contenido de 2-FAL	27
Tabla 8. Valores que definen las funciones de membresía para la salida del modelo-HI	28
Tabla 9. Valores que definen las funciones de membresía para contenido de humedad.....	29
Tabla 10. Valores que definen las funciones de membresía para número de acidez.....	30
Tabla 11. Valores que definen las funciones de membresía para la rigidez dieléctrica	31
Tabla 12. Valores que definen las funciones de membresía para el grado de polimerización ...	33
Tabla 13. Valores que definen las funciones de membresía para el total de gases disueltos	34
Tabla 14. Valores que definen las funciones de membresía para el factor de disipación	35
Tabla 15. Base de datos de resultados de las pruebas de diagnóstico del aceite dieléctrico de transformadores de potencia	37
Tabla 16. Valores de índice de salud tomados del estudio de referencia y calculados	38
Tabla 17. Valores de las variables de la flota de transformadores de potencia a ser ingresados en el modelo difuso	43
Tabla 18: Cantidad de TP's por cada estado de salud	47

Índice de Figuras

Figura 1. Comparativa gráfica entre la teoría clásica y la teoría difusa	10
Figura 2. Funciones de membresía para la variable temperatura	11
Figura 3. Elementos e una función de membresía	11
Figura 4. Resultados de las operaciones de Intersección (AND), unión (OR) y complemento (NOT) para lógica Booleana y lógica difusa	15
Figura 5. Ilustración de las etapas del método de inferencia difuso Mamdani	18
Figura 6. Funciones de membresía para la salida del modelo - HI.....	29
Figura 7. Funciones de membresía para contenido de agua	30
Figura 8. Funciones de membresía para número de acidez	31
Figura 9. Funciones de membresía para la rigidez dieléctrica.....	32
Figura 10. Funciones de membresía para grado de polimerización	33
Figura 11. Funciones de membresía para total de gases combustibles.....	34
Figura 12. Funciones de membresía para el factor de disipación	35
Figura 13. Modelo de inferencia difusa desarrollado en software de uso especializado.....	36
Figura 14. Diagrama de flujo que define de la metodología propuesta	40
Figura 15. Cálculo del índice de salud del transformador de potencia número 4	43
Figura 16. Operacionalización de variables en el modelo	44
Figura 17. Variación del HI calculado en comparación con los valores HI proporcionados	46

Índice de Anexos

Anexo 1. Reglas de inferencia difusa	55
Anexo 2. Resultados de las pruebas de diagnóstico practicadas a una flota de 10 TP's	60
Anexo 3. Certificado de traducción de resumen.....	61

1. Título

**Cálculo del Índice de Salud de los transformadores de potencia de hasta 69 kV
mediante lógica difusa**

2. Resumen

El presente trabajo busca proponer una metodología de análisis mediante lógica difusa que permita evaluar el índice de salud (HI) de los transformadores de potencia (TP) sumergidos en aceite con tensión nominal de hasta 69 kV, empleando variables que son comúnmente obtenidas a partir de las pruebas de diagnóstico practicadas al aceite aislante de estas unidades.

Para definir el sistema de inferencia difusa (FIS), se toma como referencia estudios validados previamente, criterios expertos y las normativas IEEE aplicables a la calidad del aceite mineral en el transformador. Se definen de esta manera las reglas difusas y las respectivas funciones de membresía para cada variable de entrada y salida, luego se modela el sistema en un software de uso especializado, para optimizar el proceso de cálculo.

Se realiza una evaluación comparativa entre los valores de HI calculados mediante el modelo propuesto y los obtenidos en el estudio de referencia. Los resultados muestran un elevado porcentaje de coincidencia en cuanto a la valoración lingüística.

Una vez validado el modelo, se utiliza los resultados de las pruebas de diagnóstico practicadas una flota de 10 transformadores de potencia pertenecientes a una empresa distribuidora del país para determinar el HI respectivo de cada unidad. Los resultados de la evaluación muestran que 9 de las 10 unidades se encuentran en un estado de salud al menos “bueno”, por lo que no son necesarias tareas específicas de mantenimiento.

Palabras claves:

Transformador de potencia, índice de salud, lógica difusa, aceite dieléctrico.

2.1 Abstract

The following study looks for propose a fuzzy logic analysis methodology that allows evaluating the health index (HI) of oil immersed power transformers (TP) rated of up to 69 kV, using common variables obtained from power transformer insulating oil diagnostic tests.

To define the fuzzy inference system (FIS), previously validated studies are taken as a reference, added to expert criteria and IEEE regulations related to power transformer mineral oil quality. In this way, the fuzzy rules and the membership functions for each input and output variable are defined, then the system is modeled into a specialized use software to optimize calculation procedure.

A comparative evaluation is carried out between the proposed model calculated health index and those obtained through reference study. Results show a high coincidence in terms of linguistic assessment.

Once the model has been validated, the diagnostic test results carried out on a fleet of 10 power transformers belonging to a domestic distribution company, are taken to determine the HI of each unit. The evaluation results show that 9 out of 10 units are in a health status at least “good”, so, specific maintenance tasks are not required.

Keywords:

Power transformer, health index, fuzzy logic, dielectric oil.

3. Introducción

El transformador de potencia se constituye en uno de los activos de mayor importancia en la cadena de suministro de energía eléctrica, este es el encargado de interconectar las etapas de generación - transmisión y transmisión - distribución, además se constituye en uno de los activos con mayor costo en una subestación de energía.

El tiempo que toma reemplazar un transformador de potencia puede resultar ser demasiado prolongado, lo cual implica tiempos de desconexión insostenibles tanto para los usuarios como para la empresa suministradora de servicio, por lo que se precisa de técnicas y metodologías eficaces que permitan determinar la condición real de la unidad y que faciliten la gestión de activos en cuanto a la operación y el mantenimiento. Una de estas herramientas que es ampliamente usada es el denominado “índice de salud”.

En el presente trabajo se propone una metodología de cálculo del HI a través de lógica difusa, mismo que ha sido formulado en base a seis variables obtenidas de los análisis de estado del aceite y papel aislante del transformador: humedad, acidez, rigidez dieléctrica (BDV), factor de disipación (DF), análisis total de gases disueltos (TDCG) y grado de polimerización (PD), calculado a partir del contenido de furanos. El sistema se modela en un software de uso especializado con la finalidad de optimizar el proceso de cálculo.

El trabajo está estructurado en dos capítulos, en el primero se realiza una recopilación bibliográfica sucinta respecto a transformadores, índice de salud, lógica difusa y pruebas de diagnóstico practicadas al aceite del transformador de potencia; en el segundo capítulo se formulan las funciones de membresía y las reglas expertas para definir el sistema difuso, se plantea la metodología para el cálculo del HI y, empleando esta como herramienta de cálculo, se determina los valores de HI de una flota de 10 TP's.

De manera subsecuentemente, se presentan los resultados alcanzados que responden a los objetivos específicos planteados, las conclusiones y recomendaciones derivadas del presente Trabajo de Titulación.

Objetivos

Objetivo general

Elaborar una metodología para calcular el índice de salud de los transformadores de potencia de hasta 69 kV empleando lógica difusa.

Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo en un software especializado para determinar el Índice de Salud de Transformadores de Potencia de hasta 69 kV.
- Determinar el Índice de Salud de transformadores reales, mediante los datos obtenidos de las pruebas físico/químicas practicadas al aceite dieléctrico.

4. Marco teórico

4.1. Capítulo I

4.1.1. Transformador

Los sistemas eléctricos modernos incluyen una gran cantidad de puntos de generación y consumo, interconexiones dentro del mismo sistema o con sistemas aledaños, así como la transmisión a través de largas distancias. Con el pasar de los años, la complejidad de los mismos se ha incrementado considerablemente, llevando a la necesidad de operar con varios voltajes a nivel de transmisión y distribución. Es aquí donde el transformador adquiere relevancia, pues es el elemento que permite realizar la transición entre los diferentes niveles de tensión.

Un transformador se puede definir como una máquina eléctrica estática empleada en sistemas de energía eléctrica con la finalidad de aumentar / disminuir la tensión con fines de transporte y distribución de energía, utilizando para ello el principio de inducción electromagnética. Un transformador puede tener dos o más devanados sobre un núcleo ferromagnético (González Vergara, 2009), (CIGRE, 2010).

Los transformadores ubicados entre las etapas de generación y distribución, son los denominados transformadores de potencia, que generalmente tienen una capacidad nominal de varios cientos de kVA.

Los transformadores de potencia pueden ser del tipo elevador si se busca incrementar el nivel de voltaje con fines de transmisión, o del tipo reductor, empleados para alimentar circuitos de distribución (Harlow, 2007).

En el caso de fallas que impliquen desconexión del TP, la empresa comercializadora experimenta pérdidas económicas considerables. Además, los transformadores de potencia se constituyen en el bien con el costo más elevado de los equipos de las subestaciones llegando a casi el 60% de la inversión total (Azmi et al., 2017; Naderian et al., 2008)

4.1.2. Índice de salud del transformador

El índice de salud (HI) es un valor numérico que puede ser usado para evaluar el estado de un TP, este permite clasificar las unidades según el riesgo de falla y la prioridad de intervención. Este valor es calculado tomando como base los resultados más representativos de las pruebas de diagnóstico, las inspecciones visuales y de campo, las observaciones operativas, registros operativos e históricos. El número de parámetros considerados varían en la literatura técnica, a

líneas generales, emplear un mayor número de variables entrega valores más precisos de del índice de salud(Gorgan et al., 2010; Naderian et al., 2008).

El HI no proporciona información del estado operativo de una parte o componente específico del transformador con fines de reparación, este en cambio es un valor cuantitativo que representa el nivel de degradación a largo plazo del bien. De esta manera, el HI es un indicador de la vida útil remanente del transformador.

Conocer el estado de salud real del transformador es de importancia, puesto que permite planificar adecuadamente la gestión de activos: determinar las unidades que requieren reparaciones, reemplazos, repotenciaciones y el tiempo estimado para efectuar mencionadas tareas; así como las tareas de mantenimiento y la toma de decisiones de manera oportuna (Abu-Elanien et al., 2012).

El valor numérico del HI puede variar en un rango de cero (unidades nuevas en un excelente estado a salud) a uno (unidades en mal estado, dañadas que han llegado al final de su de su vida útil)(Abu-Elanien et al., 2012; Cerón et al., 2015).

El funcionamiento del transformador conlleva a un deterioro normal a lo largo de su vida útil, este se refleja en la pérdida de las características dieléctricas de los materiales aislantes en su interior, estos se degradan y se acumulan progresivamente en el aceite en forma de pequeñas concentraciones de impurezas de agua, monóxido de carbono, dióxido de carbono, furanos, entre otros.

Los datos obtenidos de las pruebas practicadas al aceite dieléctrico de los transformadores de potencia proporcionan información de las propiedades físico - químicas y dieléctricas del aceite, a través de estas es posible obtener la rigidez dieléctrica, furanos disueltos, número de acidez, humedad, factor de disipación, color, tensión interfacial y concentraciones de gases disueltos. Gracias a estos datos es posible determinar la presencia de ciertas fallas específicas al interior del elemento, por ejemplo, descargas parciales, arcos, chispas, sobrecalentamiento, etc. (Ortiz et al., 2016).

El cálculo del HI, por lo general se realiza en base a "puntuaciones" y "ponderaciones", diseñados para tomar en cuenta las condiciones de campo, los resultados de la inspección, los resultados de las pruebas de laboratorio, etc. Las variables de entrada y las "puntuaciones" dependen del criterio del autor, es por esto que para una misma condición el índice de salud puede

variar. Los valores preliminares se combinan para formar el HI final, que indica la condición general del transformador.

Para calcular el valor del índice de salud, es necesario definir los límites en base a las normas aplicables para cada parámetro. La expresión comúnmente empleada para determinar el HI de cada parámetro es la ecuación 1.

$$HI_{cada_parametro} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

Donde:

n: Número de parámetros utilizados

Si: Puntuación de evaluación para un parámetro, que puede variar de 1 a 6.

Wi: Factor de ponderación o peso específico asignado al parámetro, que puede tomar valores de 1 a 5, dependiendo de la importancia del parámetro.

Para encontrar el valor global del índice de salud de los TP, se emplea la ecuación 2 (Hernanda et al., 2014).

$$HI = X\% \frac{\sum_{j=1}^n K_j HIF_j}{\sum_{j=1}^n 4K_j} + Y\% \frac{\sum_{j=n+1}^z K_j HIF_j}{\sum_{j=n+1}^z 4K_j} \quad (2)$$

Donde:

X%: Peso porcentual asignado para el transformador

Y%: Peso porcentual asignado para el LTC

HIF_j: Índice de salud para cada parámetro “j”

K_j: Peso específico correspondiente al parámetro “j”

j: Cada uno de los parámetros de diagnóstico utilizado para el cálculo del índice de salud.

El valor del HI final, resulta de la multiplicación del factor de índice de salud de cada parámetro (HIF_j) y el peso específico correspondiente de cada parámetro (K_j) dividido por la puntuación máxima. Un valor de 0 indica la descomposición completa del transformador y 100 muestra las condiciones adecuadas de salud.

El uso de las expresiones matemáticas 1 y 2, requiere de una cantidad considerable de parámetros para evaluar las condiciones del transformador, lo cual puede resultar ser poco práctico en casos reales(Hernanda et al., 2014).

4.1.3. Lógica difusa

El proceso de toma de decisiones a partir de información ambigua resulta ser un procedimiento común para el pensamiento humano, este se realiza a través de la observación del entorno, formulación y uso de reglas lógicas y deducción lógica con la consecuente toma de decisión.

La teoría clásica de conjuntos se fundamenta en la definición y delimitación clara sin contemplar ambigüedades, los elementos del universo pueden o no ser miembros de un conjunto determinado. Existe un límite bastante preciso y claro que define a cada conjunto, de esta manera se puede hacer una distinción entre un miembro y un no miembro para cualquier conjunto, no es posible definir una categoría intermedia.

En este sentido, la teoría de conjuntos no contempla la posibilidad que un elemento pertenezca y no a un conjunto determinado al mismo tiempo. Esto puede resultar en una desventaja al tratar con problemas de aplicación del mundo real, donde pueden presentarse casos donde los elementos pertenecen parcialmente a uno o más conjuntos definidos y donde la lógica booleana es demasiado estricta para definir la pertenencia de los elementos cuyos límites no están claramente definidos.

La teoría de conjuntos difusos, hace referencia a elementos y conjuntos sin límites claramente definidos. En este escenario, se habla de grado de pertenencia de un elemento a un conjunto. Es decir, la teoría de conjuntos difusos considera pertenencias parciales(Chen et al., 2001).

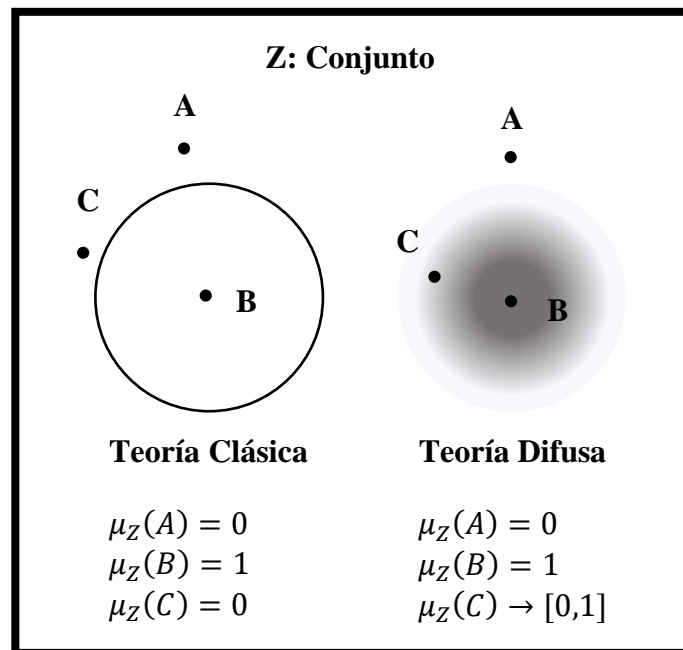
La lógica difusa se relaciona con la manera en cómo se percibe el entorno: la velocidad de un cuerpo, la altura de una persona, la temperatura de un cuerpo; suelen ser valorados mediante adjetivos lingüísticos: mucho, poco, bastante, etc.; esto hace que la formulación de premisas adquiera un carácter ambiguo que depende directamente de la percepción del observador. Las calificaciones: rápido, lento, alto o bajo; son categorías asignadas por un observador y pueden variar de acuerdo al criterio de cada persona.

Al hablar de grado de pertenencia, si un elemento pertenece completamente a un conjunto de límites definidos tiene un valor de 1 o de 0 si dicho elemento es completamente ajeno a un conjunto. De esta manera, los elementos que pertenecen parcialmente a un conjunto tienen un grado de pertenencia que puede variar entre la pertenencia total (1) y la no pertenencia en absoluto (0), pudiendo tomar cualquier valor intermedio entre estos límites. Los conjuntos borrosos deben ser asociados con valores lingüísticos, definidos por etiquetas de carácter verbal.

En la teoría clásica de conjuntos, la pertenencia o no de una variable x a un conjunto Z definido, se puede describir de la siguiente manera: si $x \in Z$ entonces $\mu_Z(x)=1$, caso contrario $\mu_Z(x)=0$. Por su parte, un conjunto difuso que permite una pertenencia parcial, el valor $\mu_Z(x)$ puede tomar cualquier valor dentro de un dominio de $[0,1]$. Como podemos ver en la figura 1.

Figura 1.

Comparativa gráfica entre la teoría clásica y la teoría difusa



Fuente: El autor

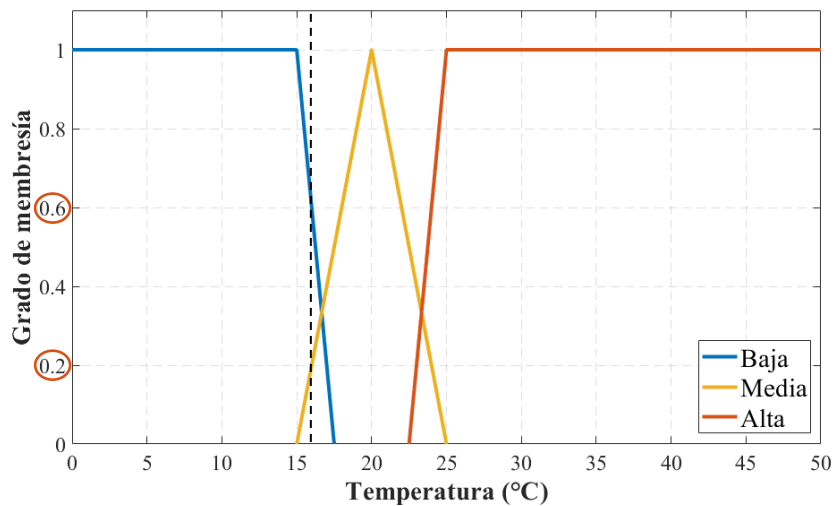
Es posible representar el grado de pertenencia mediante una función continua también denominada función de pertenencia. Aquí el grado de pertenencia viene dado por el porcentaje de cumplimiento de la premisa para cada una de las variables lingüísticas pertenecientes a un mismo contexto, así por ejemplo para el caso de la temperatura, podríamos definir las siguientes

categorías: baja, media, alta; que representan las posibles categorías que puede tomar la variable. La figura 2 muestra las funciones de pertenencia para el caso de la temperatura, mientras que la figura 3 muestra los elementos que componen una función de membresía.

Para una temperatura de 16°C, tenemos un grado de pertenencia del 60 % para la categoría frío y un 20% para la categoría moderado, el grado de pertenencia puede tomar valores de entre 0 y 1. Esta medida de temperatura ha sido evaluada con un grado de pertenencia específico para dos funciones de pertenencia: baja y media.

Figura 2.

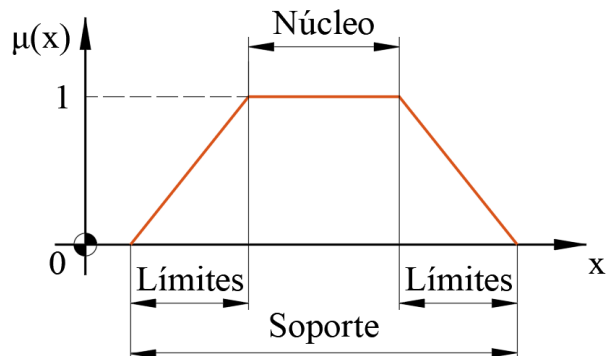
Funciones de membresía para la variable temperatura



Fuente: El autor

Figura 3.

Elementos que componen una función de membresía



Fuente: (Ross, 2009)

El *núcleo* de una función de pertenencia para un conjunto difuso, se define como la región del universo que se caracteriza por la pertenencia total y completo al conjunto. Es decir, el núcleo comprende aquellos elementos x del universo tales que $\mu_A(x) = 1$.

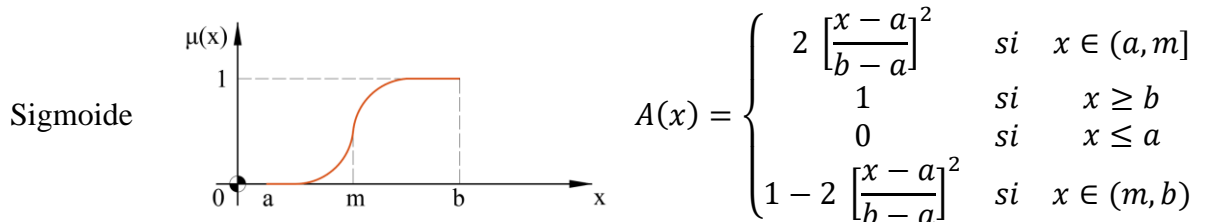
El *soporte* de una función de pertenencia para algún conjunto difuso se define como la región del universo que se caracteriza por tener un grado de pertenencia diferente de cero. Es decir, el soporte comprende aquellos elementos x del universo tales que $\mu_A(x) > 0$

Los *límites* de una función de pertenencia para un conjunto difuso se definen como la región del universo que contiene elementos que tienen una pertenencia distinta de cero, pero no una pertenencia completa. Es decir, los límites comprenden aquellos elementos x del universo tales que $0 < \mu_A(x) < 1$ (Ross, 2009).

Las formas de los conjuntos difusos representados en la figura 2, son de cierta manera, los más comunes que se encuentran en la práctica. No obstante, existen variedad de formas en las que se puede definir las funciones de membresía: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal, gamma, pi, campana; siendo las más comunes las dos primeras. Las representaciones y definiciones matemáticas de algunos tipos de funciones de membresía se representan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Tipos de funciones de membresía con sus respectivas definiciones matemáticas		
Tipo de función	Gráfico	Definición matemática
Triangular		$A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{m-a} & \text{si } x \in (a, m] \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{si } x \in (m, b) \\ 0 & \text{si } x \notin (a, b) \end{cases}$
Trapezoidal		$A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } x \in (a, b) \\ 1 & \text{si } x \in [b, c] \\ 0 & \text{si } (x \leq a) \vee (x \geq d) \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } x \in (c, d) \end{cases}$



Fuente. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications, publicada en 1995.

Como se ha definido previamente, un conjunto difuso permite representar conceptos ambiguos expresados en lenguaje verbal, estas representaciones dependen no solo del concepto sino también del contexto en el que son definidas, por ejemplo, alta temperatura tiene cierta concepción si la relacionamos con el clima y una concepción completamente diferente si se relaciona con procesos de fusión nuclear(Klir & Yuan, 1995).

El uso de una forma específica de función de membresía depende de la aplicación y del criterio del experto. Además, estas pueden ser asimétricas o funciones de pertenencia que solo aumentan o solo disminuyen.

4.1.3.1. Variables lingüísticas

Las variables lingüísticas son fundamentales para cualquier sistema difuso, estas permiten describir en un mismo contexto diferentes categorías subjetivas. Los términos lingüísticos empleados, que son por lo general adjetivos, representan los valores que puede tomar una variable.

Una variable lingüística se puede definir como aquella cuyos valores son palabras u oraciones en un lenguaje natural o artificial. De esta forma, una variable lingüística permite representar un elemento que no se puede definir en base a términos numéricos(Zadeh, 1975).

El análisis difuso considera el uso de variables del tipo lingüístico en lugar de valores numéricos, en este sentido, el análisis difuso puede considerarse como una metodología de cálculo cuyos valores son palabras en lugar de números. Aunque el uso de palabras representa una precisión menor respecto al uso de variables numéricas, emplear este tipo de variables permite acercarse a la reproducción de patrones de pensamiento humano y manejar un margen de tolerancia a la imprecisión(MathWorks, s. f.-b).

4.1.3.2. Reglas difusas

En el campo de la inteligencia artificial (inteligencia de máquina), existen diversas formas de representar el conocimiento. Quizá una de las formas más comunes a través de expresiones de lenguaje natural del tipo: *SI premisa (antecedente), ENTONCES conclusión (consecuente)*.

El tipo de expresión es comúnmente conocida como expresiones del tipo IF-THEN, que permiten inferir un hecho o conclusión (consecuente) a partir de premisas (hipótesis o antecedente). Esta forma de razonamiento es de fácil comprensión debido al contexto lingüístico empleado, puesto que está expresado en nuestro propio lenguaje de comunicación, no obstante, resulta demasiado estricto al requerir que el antecedente se cumpla para validar al consecuente.

Para que el modelo difuso funcione es necesario definir un conjunto de reglas que son las encargadas de relacionar a los diferentes conjuntos y sus valores difusos.

Las reglas difusas son proposiciones que permiten manifestar el conocimiento mediante expresiones que relacionan los antecedentes y consecuentes. Un modelo difuso requiere la formulación de varias reglas que se agrupan formando una base, la misma que define el comportamiento del controlador difuso.

Al emplear el concepto de proposición difusa y conectores lingüísticos (“y”, “o” y “no”), es posible formular reglas de mayor complejidad que permitan relacionar las entradas con las salidas. Cualquier estructura de reglas puede descomponerse en reglas simples para facilitar el análisis.

La lógica difusa es flexible en cuanto a las premisas al permitir obtener un consecuente de mayor peso específico cuanto más alto sea el valor del antecedente. Las reglas difusas se ejecutan de manera parcial y el consecuente es verdadero en cierto nivel.

Los sistemas basados en análisis por lógica difusa resultan de utilidad para modelar sistemas complejos, ya que estos pueden ser comprendidos por la inteligencia humana al emplear variables lingüísticas como antecedentes y consecuentes. Es posible representar estas variables lingüísticas mediante conjuntos borrosos y conectores lógicos(Ross, 2009).

4.1.3.3. Operaciones con conjuntos difusos

Es posible aplicar ciertos operadores lógicos a los conjuntos difusos para realizar operaciones entre ellos. Estas operaciones son necesarias en la evaluación de los antecedentes de las reglas difusas(Ross, 2009).

A continuación, mediante las ecuaciones 3, 4 y 5; definimos tres operaciones básicas que podemos aplicar a los conjuntos difusos. Los resultados gráficos de estas operaciones se presentan en la figura 4.

Intersección:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3)$$

Unión:

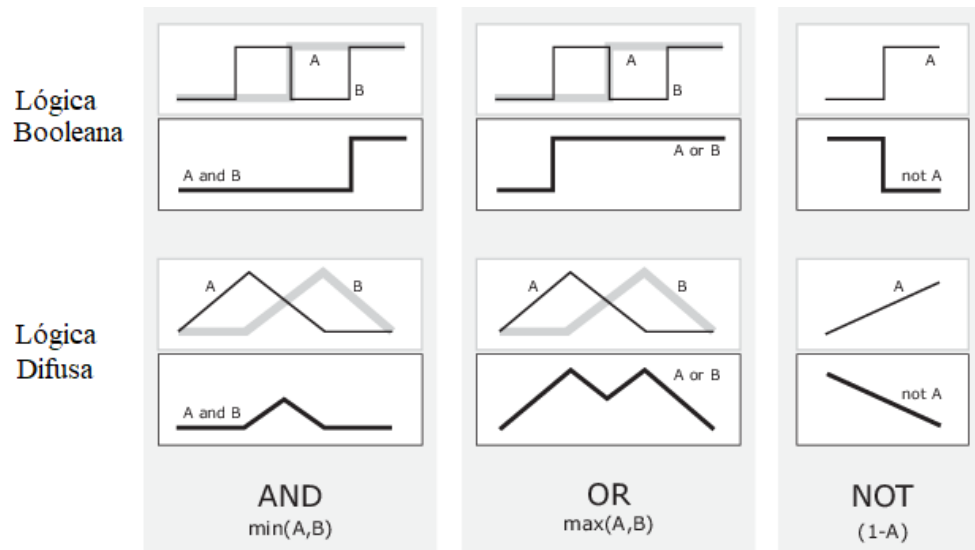
$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4)$$

Complemento:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (5)$$

Figura 4.

Resultados de las operaciones de Intersección (AND), unión (OR) y complemento (NOT) para lógica Booleana y lógica difusa



Fuente: (MathWorks, s. f.-b)

La parte superior de la figura muestra el resultado correspondiente a las operaciones realizadas con conjuntos booleanos, mientras que la parte inferior muestra el resultado de aplicar las mismas reglas a conjuntos difusos.

4.1.3.4. Etapas de un modelo difuso

La metodología de trabajo de un modelo que emplea lógica difusa se compone de tres etapas.

4.1.3.4.1. Fusificación

Esta etapa consiste en calcular el grado de pertenencia que tiene una entrada a una o varias funciones de pertenencia, de esta manera migramos los valores de las entradas a valores difusos.

La función de pertenencia o función de membresía, se puede definir como el conjunto difuso modelado a partir de variables lingüísticas. El grado de pertenencia es el nivel en el cual una variable es compatible con una función de membresía.

Las entradas que son valores numéricos limitados por el universo de cada variable, son evaluadas para las diferentes funciones de pertenencia. La entrada es comparada con su respectiva función de pertenencia para obtener un equivalente difuso de acuerdo al grado de pertenencia.

Disponemos de varios métodos para los asignar los valores de pertenencia a las variables difusas, se puede hacer por procesos de simple intuición, empleo de algoritmos, procedimientos lógicos o empleo de criterios expertos(Hooda & Raich, 2017).

4.1.3.4.2. Evaluación a partir de reglas difusas

Una vez las entradas han sido fusificadas, se aplica las reglas difusas del tipo lingüístico que han sido previamente definidas. Estas reglas deben ser redactadas empleando las expresiones lingüísticas de las funciones de membresía y se constituyen en sentencias condicionales que describen la respuesta del modelo ante varias entradas difusas.

Los sistemas de inferencia combinan uno o varios conjuntos difusos de entrada asociadas a través de afirmaciones del tipo SI-ENTONCES y conectores lógicos and, or, not, etc.

Existe dos tipos de sistemas de inferencia difusa comúnmente empleados: Mamdani y Takagi-Sugeno. En un sistema de inferencia por el método de Mamdani, la salida de cada regla es un conjunto borroso, al evaluar las premisas obtenemos tantos conjuntos difusos como reglas, luego se agrupan los conjuntos resultantes para obtener una salida global del sistema.

Dado que los sistemas Mamdani se formulan con reglas más fáciles de entender, se adaptan bien a las aplicaciones de sistemas expertos donde las reglas se crean a partir del conocimiento experto humano(MathWorks, s. f.-a).

Una regla de inferencia difusa por el método de Mamdani, se estructura de la siguiente manera: *SI* x_1 is A *Y* x_2 is B *Y* x_3 is C *ENTONCES* u_1 is D, u_2 is E

Donde:

x_1 , x_2 y x_3 : Variables de entrada.

A, B y C: Funciones de membresía definidas en términos lingüísticos.

u_1 y u_2 : Variables de salida.

D y E: Funciones de membresía de salida definidas en términos lingüísticos.

Y: Operador lógico AND.

4.1.3.4.3. Defusificación

Durante la primera etapa del proceso de análisis difuso se realiza una migración de valores reales a datos difusos para luego aplicar las reglas de análisis. Es en este punto necesario expresar los resultados del análisis en términos no difusos (cuantitativos). Es decir, en este paso convertimos un valor difuso en un número real.

Existen varios métodos de defusificación siendo el método del centroide el más ampliamente usado, que se basa en determinar el centro de gravedad del conjunto de salida formado por las contribuciones parciales de todas las reglas de pertenencia difusa válidas, el valor obtenido es el equivalente de la abscisa del centro de gravedad. Para determinar el centroide se toma como referencia la ecuación 6.

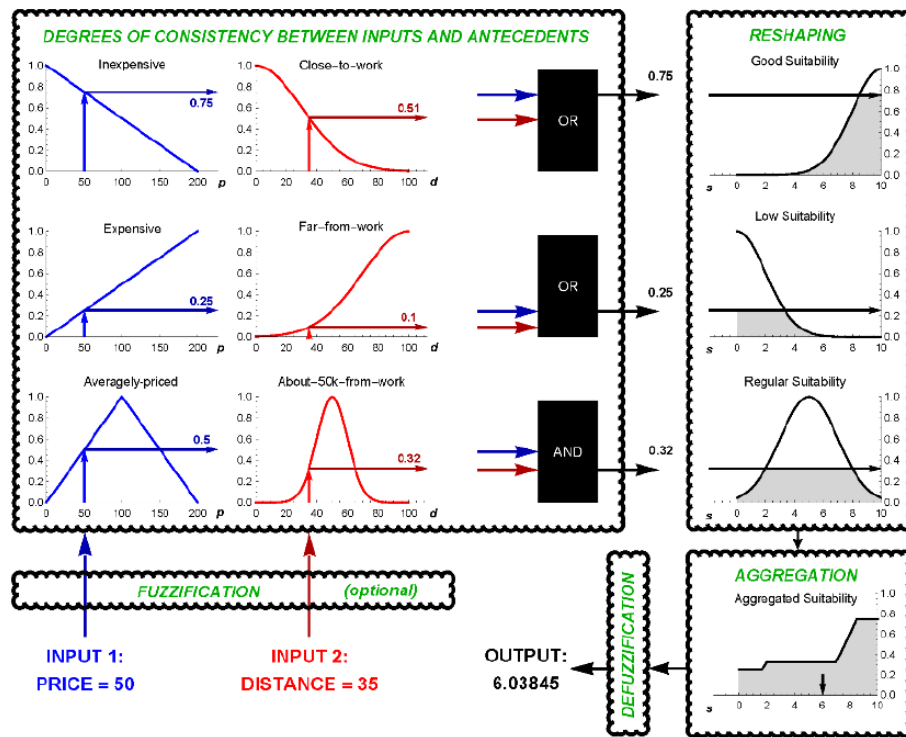
$$Centroide(x) = \int \frac{\mu_A(x) x dx}{\mu_A(x)} \quad (6)$$

Para aplicar el método del centroide, cada función de pertenencia de salida es cortada en el nivel indicado por su respectiva salida difusa, luego todas las funciones de pertenencia que fueron cortadas se combinan y se calcula su centro de gravedad, el cual representa el valor en el eje x de la función de membresía de salida (Hooda & Raich, 2017).

La figura 5 muestra de manera gráfica las etapas de un modelo difuso aplicado al modelo tomado de (Izquierdo et al., 2015).

Figura 5.

Ilustración de las etapas del método de inferencia difuso Mamdani.



Fuente: (Izquierdo et al., 2015)

A manera de ejemplo, supongamos que se desea implementar un modelo de inferencia difuso para seleccionar la casa adecuada en base a dos entradas: el precio de la casa y la distancia desde la casa hasta el lugar de trabajo.

Se tiene las siguientes reglas difusas

- SI (la casa es económica o está cerca del trabajo), ENTONCES la conveniencia es buena.
- SI (la casa es costosa o está lejos del trabajo), ENTONCES la conveniencia es baja.
- SI (la casa tiene un precio promedio Y está ubicada a aproximadamente 50 km del trabajo), ENTONCES la conveniencia es Regular.

La conveniencia se mide como una puntuación que oscila entre 0 (la más baja) y 10 (la más alta).

Durante la etapa de fusificación, los valores de las entradas ingresan al modelo difuso. En este caso los valores de 50 y 35 son los datos de las variables precio y distancia, respectivamente.

Luego se evalúa el grado de pertenencia de la entrada con un conjunto difuso específico, es decir se determina hasta qué punto se cumple el antecedente de cada regla para las entradas dadas.

Para la regla 1 que tiene como antecedente: “La casa es económica o cerca del trabajo”. El conector lógico en este ejemplo es O, es decir una operación de unión de conjuntos, por ello se aplica la ecuación 4.

Evaluando la regla 1, tenemos:

$$O[\mu_{\text{barato}}(50), \mu_{\text{cerca al trabajo}}(35)] = O[0.75, 0.51] = \mathbf{max}[0.75, 0.51] = 0.75$$

Como resultado de esta evaluación tenemos un número, este proceso se repite para todas las reglas involucradas.

El consecuente de la primera regla es “conveniencia buena”, que es en sí una función de membresía. El valor de 0.75 obtenido en el paso anterior, trunca a mencionada función de membresía.

Se procede a realizar una suma de todas las funciones truncadas y se aplica el proceso de defusificación, que consiste en determinar a partir de la ecuación 4, el centroide de la figura resultante (6.03845).

4.1.4. Pruebas de diagnóstico al aceite dielectrico del transformador de potencia

La condición interna real del TP es una variable de importancia para tomar decisiones respecto a la operación y el mantenimiento de una unidad. Un adecuado programa de mantenimiento de transformadores debe considerar una minuciosa inspección de rutina realizada por profesionales especializados en el mantenimiento de estas unidades.

Atención especial merece el aceite dieléctrico ya que éste proporciona aislamiento, refrigeración y coadyuva a extinguir los arcos que puedan presentarse dentro de la unidad. Los gases que se producen por la degradación del aceite dieléctrico y la celulosa del papel se disuelven en el aceite, es por ello que una observación adecuada de la composición del aceite proporciona valiosa información sobre la salud del transformador.

Los análisis físico - químicos practicados al TP, son pruebas de rutina que proporcionan información referente al sistema de aislamiento de la unidad. Como resultado de estas pruebas es posible determinar la pureza, calidad y las condiciones químicas mecánicas del aislamiento, así

como datos específicos que contribuyan a detectar la presencia de fallas internas(Bureau of reclamation, 2000).

4.1.4.1. Rigidez dieléctrica

Esta prueba permite determinar el nivel de voltaje al cual el aceite del TP sufre una pérdida completa de sus características dieléctricas. Una cantidad elevada de contaminantes en el aceite como agua y partículas de óxido ocasiona la pérdida de la capacidad dieléctrica del aceite. (Cerón et al., 2015).

El voltaje de ruptura dieléctrica indica la capacidad que tiene el aceite aislante para soportar esfuerzos eléctricos sin fallar. No obstante, una capacidad dieléctrica elevada no indica la ausencia de contaminantes(Bureau of reclamation, 2003).

El método recomendado para determinar la rigidez dieléctrica o voltaje de ruptura (BDV) del líquido aislante lo define la norma ASTM D1816, que determina el uso de electrodos de cabeza esférica del tipo Verband Deutscher Elektroechner (VDE) en su celda de prueba («IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers», 2009). La tabla 2 muestra los valores aceptables de rigidez dieléctrica definidos por la IEEE.

Tabla 2.

Valores aceptables de ruptura dieléctrica para líquidos aislantes nuevos y en servicio, por nivel de voltaje			
Estado del aceite mineral	Voltaje de operación [kV]	BDV mínimo (kV)	
		1 mm	2 mm
Equipo nuevo	≤ 69	25	45
	$> 69 < 230$	30	52
En operación	≤ 69	23	40
	$> 69 < 230$	28	47

Fuente. Datos tomados de IEEE Std C57.106-2015, publicada el 23/03/2016.

La humedad presente en el aceite en combinación con oxígeno y calor destruirá el aislamiento mucho antes que la prueba de rigidez dieléctrica del aceite proporcione algún indicio de futuras fallas en el equipo, tampoco indica la presencia de ácidos o lodos(Bureau of reclamation, 2003).

4.1.4.2. Factor de disipación

La prueba de factor de disipación (DF), se realiza de acuerdo a la normativa (ASTM 924) y es empleada para determinar las pérdidas dieléctricas en forma de calor que se producen en el líquido aislante cuando están sometidos a un campo eléctrico alterno. Un DF bajo indica bajas pérdidas dieléctricas en el aceite.

La medida del DF es útil para determinar la calidad de la muestra de aceite, así como la presencia de contaminantes como el exceso de agua, la presencia de material particulado o materiales iónicos en la muestra.

Si la muestra presenta niveles elevados de factor de disipación, los contaminantes pueden concentrarse en los devanados, lo que dificulta la limpieza del transformador. Un factor de disipación bastante alto puede ser ocasionado por la presencia de agua libre, condición bastante peligrosa para el funcionamiento de un transformador.

Es necesario identificar las causas de un factor de disipación elevado, algunas de las posibles causas son: oxidación, agua libre, partículas húmedas, contaminación e incompatibilidad de materiales.

Los valores de porcentaje de DF recomendados para diferentes categorías de líquidos aislantes nuevos y envejecidos en servicio se muestran en la Tabla 3 («IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment», 1992, p. 15).

Tabla 3.

Valores límite de factor de disipación para aceite nuevo		
Tipo de test	Factor de disipación máximo (%)	
	<69 kV	69-230 kV
25°C	0,15	0,1
100°C	1.5	1

Fuente. Datos tomados de IEEE Std C57.106-1991, publicada el 06/05/1992.

4.1.4.3. Humedad en el aceite del transformador

La humedad está presente en cualquier transformador, la mayor parte de la misma se concentra en el papel aislante, puesto que el agua tiene mayor afinidad con el papel aislante que con el aceite dieléctrico, es decir el papel actúa como un sumidero de humedad que absorbe el

agua disuelta en el aceite. La vida útil del transformador viene definida por vida útil del papel, esta se reduce de manera considerable ante la presencia de humedad y oxígeno.

Ante los cambios de carga y por consiguiente de temperatura, el agua migra a la parte más fría del transformador, por lo general, este punto se ubica en el tercio inferior del aislamiento del devanado. Es por esto que la concentración de humedad en el aceite aislante, no proporciona información completa del nivel de humedad de todo el sistema de aislamiento (Bureau of reclamation, 2003).

La humedad en presencia de oxígeno es extremadamente peligrosa para el aislamiento del transformador, dado que la rigidez dieléctrica del papel y del líquido aislante se reducen ante la presencia de humedad, es por esto que conocer y controlar la cantidad de humedad presente en el transformador es de suma importancia.

La Tabla 4 muestra los límites aceptables de humedad para los líquidos aislantes, de acuerdo al análisis de Karl Fischer (ASTM D1533) y de acuerdo a lo expresado en la normativa IEEE C57.152 («IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors», 2013, p. 152).

Tabla 4.

Nivel aceptable de humedad en aceites minerales según el voltaje de funcionamiento		
Estado del aceite mineral aislante	Voltaje de funcionamiento (kV)	Contenido de humedad máxima (mg/kg)
Equipo nuevo	≤ 69	20
	$> 69 < 230$	10
En servicio	≤ 69	35
	$> 69 < 230$	25

Fuente. Datos tomados de IEEE Std C57.152-2013, publicada el 23/01/2013

4.1.4.4. Número de acidez o neutralización

La prueba del índice de acidez se realiza de acuerdo a la normativa (ASTM D974), esta mide el número de acidez (neutralización), expresada como la cantidad de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesario para neutralizar el ácido en 1 gramo (g) de aceite de transformador. El número de acidez determina la degradación ácida en líquido aislante.

Cuanto mayor sea el índice de acidez, el aceite dieléctrico es más ácido. En unidades nuevas, el aceite aislante contiene trazas de constituyentes ácidos, a medida que el aceite se

degrada el número de ácido aumenta. Un aislante líquido con un alto índice de acidez indica una contaminación de materiales como barniz, pintura u otros materiales(Bureau of reclamation, 2003).

La acidez en un TP es ocasionada por la oxidación del aislamiento y el aceite a medida que este envejece, los ácidos atacan directamente los metales dentro del tanque formando lodos y a la celulosa del papel acelerando la degradación del aislamiento.

La Tabla 5 muestra los límites máximos sugeridos para la humedad en los líquidos aislantes(«IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors», 2013).

Tabla 5.

Nivel aceptable de acidez en aceites minerales según el voltaje de funcionamiento		
Estado del aceite mineral aislante	Voltaje de funcionamiento (kV)	Índice máximo de acidez (mg KOH/g)
Equipo nuevo	-	0,015
En servicio	≤ 69	0,2
	$> 69 < 230$	0,15

Fuente. Datos tomados de IEEE Std C57.152-2013, publicada el 23/01/2013

4.1.4.5. Análisis de gases disueltos

Los gases disueltos en el aceite dieléctrico del transformador son un indicador claro que permite monitorear el deterioro del aislamiento de la unidad y, por ende, el estado interno de la unidad.

Para llevar a cabo el análisis de gases disueltos, se toma una muestra del aceite dieléctrico del transformador, esta muestra es enviada a un laboratorio especializado para evaluar la composición de componentes disueltos en el líquido mediante una cromatografía de gases. La composición de los gases es una herramienta de utilidad para caracterizar los tipos de fallas internas, mediante diversas técnicas de análisis: las relaciones de Rogers, triángulo de Duval, gases clave, etc.(Cerón et al., 2015).

Los datos obtenidos gracias a este análisis proporcionan información que permite determinar el grado de deterioro del aislamiento y el aceite dieléctrico, el sobrecalentamiento de los elementos internos, la presencia de las descargas parciales y arcos.

La descomposición del aceite genera gases como el acetileno (C₂H₂), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), etileno (C₂H₄) y etano (C₂H₆), mientras que el CO y CO₂ se producen por el deterioro de la celulosa del papel (Cerón et al., 2015).

El estado del aceite refleja la salud del transformador. Los resultados pueden ser analizados de manera individual y total, en base a las normas IEC e IEEE (Bureau of reclamation, 2003).

Para calcular el volumen total de gases disueltos en el aceite aislante, en partes por millón, se emplea la ecuación 7.

$$TDCG = FG \quad (7)$$

Donde:

FG: Suma de H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂ y CO [microlitros/litro (ppm)]

TDCG: Volumen total de gas combustible disuelto [(ppm)].

Dentro del análisis de gases disueltos resulta de mayor utilidad evaluar el aumento repentino de gases, en lugar del volumen total de gas, puesto que la mayor parte de gases indican fallas internas no atribuibles a la normal degradación. Ejemplo de ello es la presencia de un arco interno, de ser el caso es necesario retirar inmediatamente de servicio al transformador (Bureau of reclamation, 2000).

Determinar si un transformador está funcionando dentro de sus parámetros normales es una tarea difícil de realizar si no se dispone el histórico de análisis practicados a la unidad. El IEEE ha desarrollado una guía que permite clasificar a los transformadores en cuatro categorías, dependiendo de los gases individuales y concentración total de gases, determinados mediante la cromatografía de gases. El criterio de categorización por gases clave y la concentración total de gases se expone en la tabla 6.

Tabla 6.

Gases totales disueltos en el aceite en partes por millón (ppm)	
Estado	TDCG*
Condición 1	720
Condición 2	721-1920
Condición 3	1921-4630
Condición 4	>4630

** No se considera al CO₂ al no ser un gas combustible*

Fuente. Datos tomados de IEEE Std C57.104-2008, publicada el 02/02/2009

Las 4 condiciones propuestas por la IEEE, se definen a continuación:

- **Condición 1.** El transformador funciona satisfactoriamente, en caso de que uno de los gases exceda los niveles especificados debe ser analizado.
- **Condición 2.** Concentración de gases mayor a la normal, en caso de que uno de los gases exceda los niveles especificados debe ser analizado.
- **Condición 3.** Alto nivel de descomposición, en caso de que uno de los gases exceda los niveles especificados debe ser analizado. Tomar acciones correctivas
- **Condición 4.** Nivel excesivo de descomposición, si la unidad sigue operando puede resultar en falla del transformador.

Los valores propuestos por la IEEE en la tabla 6, pueden resultar conservadores. Existen casos en los que un transformador en condición 4 puede operar sin problemas, siempre que los gases no aumenten o aumenten a una tasa muy baja. Si el TDCG y los gases individuales aumentan considerablemente (>30 [ppm/día]), la unidad debe desenergizarse al alcanzar los valores de condición 4, puesto que este valor elevado es producto de una falla activa.

4.1.4.6. Análisis de contenido de furanos y grado de polimerización

El contenido de 2-furaldehído (2-FAL) es uno de los factores más importantes en la evaluación de la salud del transformador, ya que permite evaluar directamente la salud del aislamiento (papel). El compuesto 2-FAL representa del 95% al 98% de la cantidad total de furanos disueltos en el aceite (Medina et al., 2022).

Los furanos son una familia de compuestos orgánicos que se originan a partir de la descomposición del aislamiento de papel dieléctrico. Esta degradación se produce por la oxidación, la hidrólisis y la pirólisis, y es acelerada debido a la temperatura, humedad y la presencia de agentes químicos. La presencia de estos agentes propicia la liberación de furanos al aceite.

El contenido de furanos se obtiene a partir de las pruebas que se practican al aceite del transformador, siendo el componente más importante de análisis el 2-furfuraldehído. El análisis de furanos resulta particularmente útil para determinar la vida útil remanente de un TP.

El aceite dieléctrico con ausencia de furanos, o en niveles inferiores a 100 partes por billón (ppb) se encuentra en un buen estado de salud. Cuando existen daños en el aislamiento del papel,

los niveles de furanos pueden llegar a ser muy superiores a los niveles normales. Si estos superan las 250 ppb es necesario realizar la regeneración al aceite (Bureau of reclamation, 2003).

El grado de polimerización (PD) representa la cantidad de monómeros presentes en la celulosa del papel aislante e indica la rigidez mecánica del mismo. Durante la fabricación del papel el PD puede alcanzar valores de 1000 o superiores, valor que se reduce de manera sostenida con los años de servicio de la unidad. Se considera que el transformador ha llegado al fin de su vida útil cuando el valor de PD es inferior a 200 (Medina et al., 2022).

Estudios han determinado la existencia de una relación inversa de proporcionalidad entre el PD y el contenido de furanos, este criterio es aceptado para papel no térmicamente mejorado (no - TUP). Para el caso de papel térmicamente mejorado (TUP) no existe consensos respecto a esta relación. No obstante, se ha podido determinar que los transformadores que emplean papel TUP producen un menor número de furanos en comparación con los que emplean papel no -TUP, es por ello que la cantidad de furanos podría no representar de manera fidedigna al estado real del papel.

Una manera de solventar este inconveniente es considerar el grado de PD equivalente en lugar del contenido de furanos, de esta manera tenemos un valor real de la rigidez mecánica del aislamiento interno del TP. La prueba del grado de polimerización del papel requiere de muestras de papel del interior la unidad. Esto puede resultar ser una desventaja puesto que se requiere desenergizar el TP para la toma de muestras respectiva.

Si no se dispone del grado de polimerización para la estimación del valor de PD se recomienda emplear la ecuación de Chendong (ecuación 8), en caso disponer del contenido de furanos.

$$PD = \frac{1.51 - \log_{10}(Fur)}{0.0035} \quad (8)$$

Donde:

PD: Grado de polimerización del papel.

Fur: Contenido de furanos del aceite [partes por millón (ppm)].

La tabla 7 muestra el fin de vida del papel aislante en función del grado de polimerización y el contenido de 2-FAL, la interpretación es tomada de la referencia (Bureau of reclamation,

2003) en base al grado de polimerización, mientras que el contenido de furanos 2-FAL es calculado en base a la ecuación 8.

Tabla 7.

Fin de vida del papel aislante en función del grado de polimerización y contenido de 2-FAL			
Contenido de 2-FAL [ppm]	DP	% vida remanente	Interpretación
0.050	800	100	Degradación normal
0.110	700	90	
0.240	610	80	
0.450	530	70	Degradación Acelerada
0.790	460	60	
1.290	400	50	
1.930	350	40	Zona de Alerta
2.360	325	35	
2.770	305	30	
3.250	285	25	Alto riesgo de falla
3.820	265	20	
4.490	245	15	
5.070	230	10	Fin de la vida confiable
5.720	215	5	
6.460	200	0	

Fuente. El autor

4.2. Capítulo II

4.2.1. Formulación de las funciones de membresía

Como primer paso definimos las funciones de membresía para las diferentes entradas y salida, considerando que el análisis está enfocado en los transformadores de potencia de hasta 69 kV sumergidos en aceite.

El modelo difuso propuesto es desarrollado tomando como base los resultados de las pruebas de diagnóstico practicadas al aceite dieléctrico: cantidad de gases totales disueltos, rigidez dieléctrica, el grado de polimerización calculado en base a la cantidad de furanos disueltos; a más de otros datos obtenidos a partir de las pruebas de diagnóstico de calidad del aceite.

Las funciones de membresía son formuladas en base a las normativas IEEE y al modelo difuso propuesto por Abu-Elanien et. al.(Abu-Elanien et al., 2012) .

4.2.1.1. Salida (HI)

Las funciones de membresía para la salida son elaboradas en base al modelo difuso tomado como referencia, puesto que los resultados obtenidos serán comparados con mencionado modelo. El autor propone 5 categorías del índice de salud: muy buena, buena, moderada, mala y muy mala. Las funciones de membresía se pueden observar en la figura 6 y están definidos en la tabla 8.

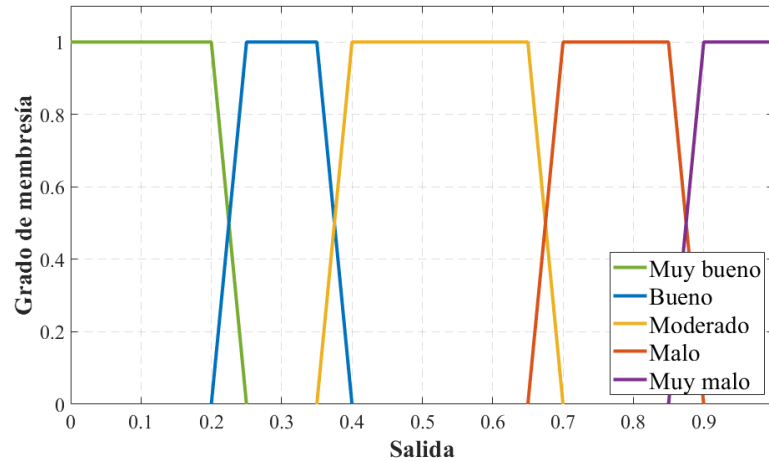
Tabla 8.

Valores que definen las funciones de membresía para la salida del modelo -HI		
Grado de impacto	Set de soporte	Núcleo
Muy bueno	[0-0.25]	[0-0.2]
Bueno	[0.2-0.4]	[0.25-0.35]
Moderado	[0.35-0.7]	[0.4-0.65]
Malo	[0.65-0.9]	[0.7-0.85]
Muy malo	[0.85-1]	[0.9-1]

Fuente. El autor

Figura 6.

Funciones de membresía para la salida del modelo -HI



Fuente: El autor

4.2.1.2. Contenido de humedad

De acuerdo al criterio de Abu-Elanien et. al.(Abu-Elanien et al., 2012); las funciones de membresía para el contenido de agua en el aceite se dividen en tres categorías lingüísticas: bueno, moderado y malo. Los límites son fijados principalmente a partir de las norma IEEE C57.106 2006(«IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment», 2006, p. 106). Los límites aceptables para contenido de humedad son de 35 ppm para un equipo en servicio y 20 ppm para un equipo nuevo. Las funciones de membresía para contenido de humedad se pueden observar en la figura 7 y sus valores numéricos se definen en la tabla 9.

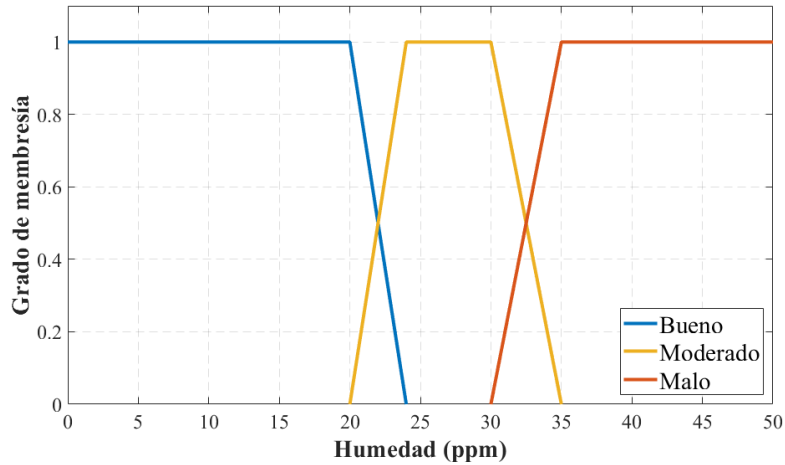
Tabla 9.

Valores que definen las funciones de membresía para contenido de humedad		
Grado de impacto	Set de soporte (ppm)	Núcleo (ppm)
Bueno	[0-24]	[0-20]
Moderado	[20-35]	[24-30]
Malo	[30-50]	[35-50]

Fuente. El autor

Figura 7.

Funciones de membresía para contenido de agua



Fuente: El autor

4.2.1.3. Número de acidez

Considerando las recomendaciones presentadas en la norma IEEE C57.106 2006, y el criterio de (Naderian et al., 2008), se formulan tres categorías para las funciones de membresía: bueno, moderado y malo. La función de membresía para el número de acidez se puede ver en la figura 8 y los valores numéricos que definen las mismas se presentan en la tabla 10.

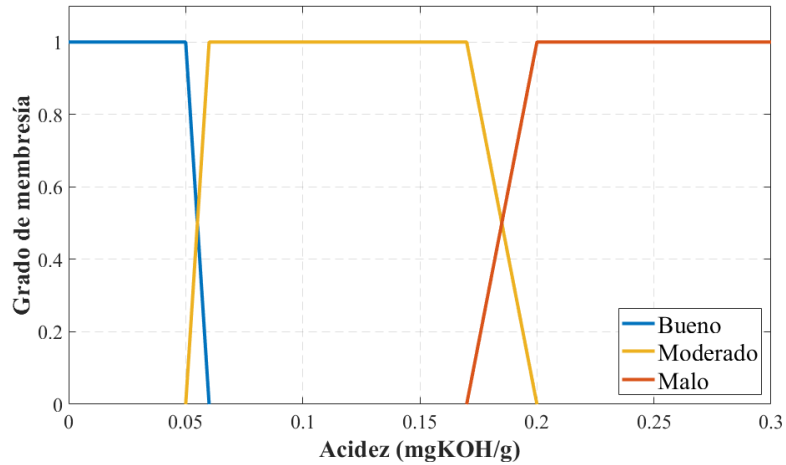
Tabla 10.

Valores que definen las funciones de membresía para número de acidez		
Grado de impacto	Set de soporte (mg KOH/g)	Núcleo (mg KOH/g)
Bueno	[0-0.06]	[0-0.05]
Moderado	[0.05-0.2]	[0.06-0.17]
Malo	[0.17-0.3]	[0.2-0.3]

Fuente. El autor

Figura 8.

Funciones de membresía para número de acidez



Fuente: Autor

4.2.1.4. Rigidez dieléctrica

Las funciones de membresía para la rigidez dieléctrica se dividen en buena, moderada y mala. Se toman los datos proporcionados por la norma IEEE C57-104 para las pruebas realizadas con una separación de 1 mm, 28 kV para aceite mineral en operación y 30 kV para aceite de un equipo nuevo («IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers», 2009, p. 104). La figura 9 es la representación gráfica de las funciones de membresía para la rigidez dieléctrica y los valores que las definen se muestran en la tabla 11.

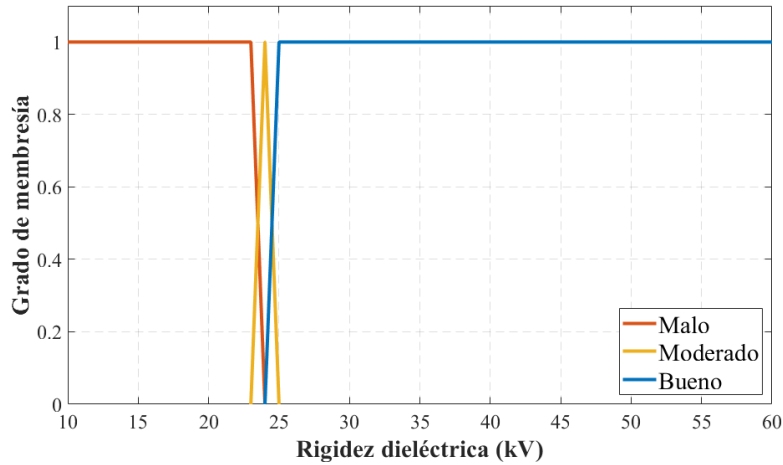
Tabla 11.

Valores que definen las funciones de membresía para la rigidez dieléctrica		
Grado de impacto	Set de soporte (kV)	Núcleo (kV)
Bueno	[0-24]	[0-20]
Moderado	[23-25]	[23-25]
Malo	[25-100]	[24-100]

Fuente. El autor

Figura 9.

Funciones de membresía para la rigidez dieléctrica



Fuente: El autor

4.2.1.5. Grado de polimerización

El grado de polimerización del papel proporciona una medida de la degradación de la celulosa del papel aislante del transformador. Algunos estudios han determinado cierto grado de correlación entre el contenido de furano en el aceite y el correspondiente grado de polimerización del aislamiento. Se han formulado algunas ecuaciones, que permiten estimar el PD del aislamiento a partir del contenido de furano. La ecuación de Chendong (ecuación 8) puede ser empleada indistintamente para transformadores con mezclas de papel kraft y aislamiento mejorado térmicamente («IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers», 2009, p. 140).

Se ha definido 5 funciones de membresía para el grado de polimerización: buena, moderada baja, moderada alta, mala o muy mala. Investigaciones recientes muestran que la degradación de papel térmicamente mejorado no produce la misma cantidad de furanos en comparación con el papel no térmicamente mejorado.

Abu-Elanien (Abu-Elanien et al., 2012) propone los siguientes límites para las funciones de membresía en función del contenido de 2-furaldeído para papel no térmicamente mejorado: papel en buenas condiciones para valores superiores a 0.13 ppm, moderada baja (0.13 ppm a 1.2 ppm), moderada alta (0.8 ppm a 3.55 ppm), malo (2,8 ppm a 7,3 ppm) y en muy mal estado si el contenido es superior a 7.3 ppm. En base a estos valores y a la ecuación de Chendong se formula

la función de membresía para el grado de polimerización. Las funciones de membresía para el grado de polimerización se muestran en la figura 10 y se definen en la tabla 12.

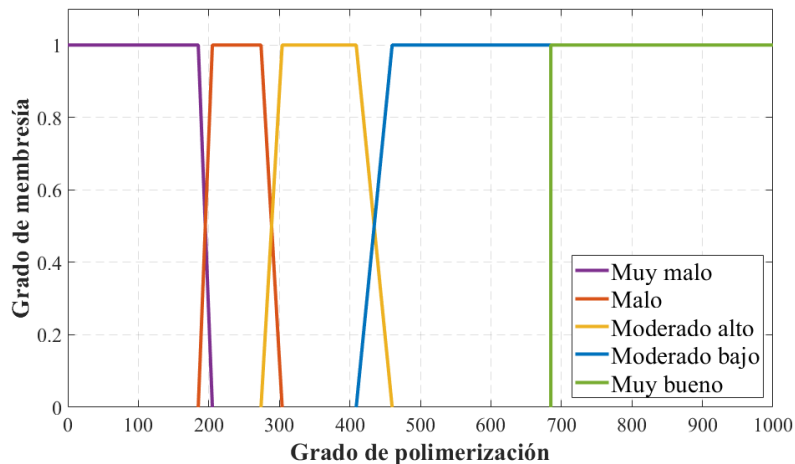
Tabla 12.

Valores que definen las funciones de membresía para el grado de polimerización		
Grado de impacto	Set de soporte	Núcleo
Bueno	[685-1000]	[685-1000]
Moderado bajo	[409-685]	[460-685]
Moderado alto	[274-460]	[304-409]
Malo	[185-304]	[205-274]
Muy malo	[0-205]	[0-185]

Fuente. El autor

Figura 10.

Funciones de membresía para grado de polimerización



Fuente: El autor

4.2.1.6. Contenido total de gases disueltos

De acuerdo al criterio expuesto por Lata(Lata et al., 2016), los límites de aceptación de TDCG son de 720 ppm para la normativa IEEE, hasta 300 ppm para Abu Elanien (Abu-Elanien et al., 2012) y de 560-1250 ppm para la IEC. Se definen tres funciones de membresía: bueno para valores inferiores a 330 ppm, moderado para un TDCG de 330 -1110 ppm y malo para un TDCG

superior a 1110 ppm. Las funciones de membresía para el contenido total de gases disueltos se muestran en la figura 11 y sus valores numéricos se presentan en la tabla 13.

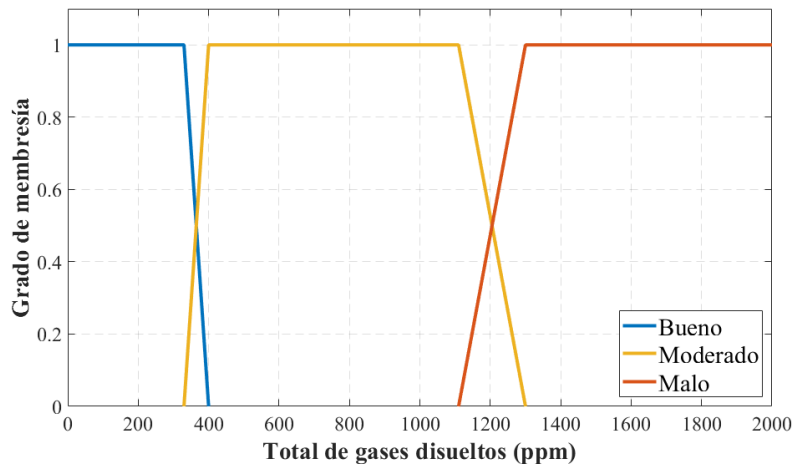
Tabla 13.

Valores que definen las funciones de membresía para el total de gases disueltos		
Grado de impacto	Set de soporte (ppm)	Núcleo (ppm)
Bueno	[0-400]	[0-330]
Moderado	[330-1300]	[400-1110]
Malo	[1110-2000]	[1300-2000]

Fuente. El autor.

Figura 11.

Funciones de membresía para el total de gases combustibles.



Fuente: El autor

4.2.1.7. Factor de disipación

Las funciones de membresía que definen el estado del aceite respecto al factor de disipación son bueno, moderado y malo, como se pueden ver en la figura 12. Para determinar los límites de cada función de pertenencia se toma los límites expuestos en la norma IEEE C57.106-1991 y se muestran en la tabla 14. El nivel bueno llega hasta 0.1%, el nivel moderado hasta 1%.

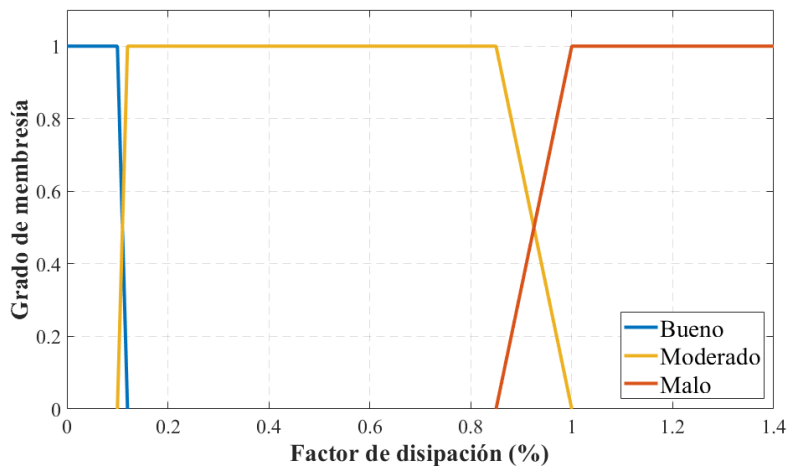
Tabla 14.

Valores que definen las funciones de membresía para el factor de disipación		
Grado de impacto	Set de soporte (%)	Núcleo (%)
Bueno	[0-0.12]	[0-0.1]
Moderado	[0.1-1]	[0.12-0.85]
Malo	[0.85-1.4]	[1-1.4]

Fuente. El autor

Figura 12.

Funciones de membresía para el factor de disipación



Fuente: El Autor

4.2.2. Formulación de las reglas difusas

Las reglas de inferencia difusa se formulan en base al criterio experto de Abu -Elanien et. al.(Abu-Elanien et al., 2012), y de acuerdo a lo propuesto por Medina et. al. (Medina et al., 2022). Las 33 reglas expertas han sido ajustadas para emplear la entrada "grado de polimerización" en lugar del "contenido de furano" en el mismo modelo difuso.

Estas reglas expertas otorgan un mayor peso específico al contenido de furanos 2-FAL, seguido por el total de gases combustibles disueltos TDCG, mientras que los factores restantes se encuentran en un tercer nivel de importancia para determinar el índice de salud.

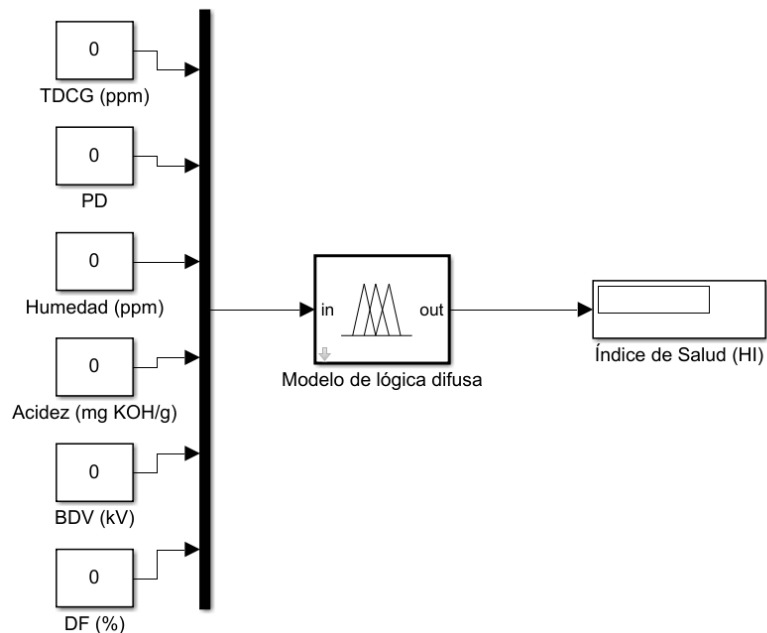
Las reglas expertas empleadas en el modelo propuesto se presentan en el ANEXO 1.

4.2.3. Formulación del modelo difuso

Se emplea un software de uso especializado para modelar el sistema de inferencia difuso, creamos las variables de entrada y salida; y se ingresa las funciones de membresía y las reglas difusas previamente definidas en este capítulo. En la figura 13 se presenta el sistema de inferencia difusa modelado en el software.

Figura 13.

Modelo de inferencia difusa desarrollado en software de uso especializado



Fuente: El autor

Para verificar la validez del modelo propuesto tomamos los resultados de las pruebas de diagnóstico publicadas en el trabajo de Abu-Elanien et. al. (Abu-Elanien et al., 2012). El criterio experto del autor propone el uso seis variables y el método de inferencia Mamdani, que permite crear un sistema de control mediante la síntesis de un conjunto de reglas lingüísticas.

La tabla 15 muestra la base de datos de las pruebas de diagnóstico practicadas a los transformadores de potencia, la columna PD representa el grado de polimerización calculado en base al contenido de furanos y a la ecuación 8.

Tabla 15.

Base de datos de resultados de las pruebas de diagnóstico del aceite dieléctrico de transformadores de potencia							
N°	Humedad (ppm)	Acidez (mgKOH/g)	BDV (kV)	FD (%)	TDCG (ppm)	2 - FAL	PD
1	21.7	0.024	32.5	0.075	483	0.86	450.14
2	26.9	0.098	40.5	0.894	254	0.65	484.88
3	14.5	0.033	58	0.14	78	0.26	598.58
4	21.2	0.226	48.7	0.424	215	5.53	219.22
5	10	0.01	75	0.111	126	0.06	780.53
6	15.5	0.075	71	0.143	38	0.53	510.21
7	16.8	0.167	70.1	0.255	149	0.78	462.26
8	15	0.092	67.8	0.211	28	0.69	477.47
9	17	0.035	62.7	0.113	9	0.21	625.08
10	30	0.088	37.6	0.353	197	0.31	576.75
11	16.2	0.181	25.5	0.201	35	8.76	162.14
12	15	0.155	37.5	0.182	53	7.29	184.93
13	16.8	0.115	25.6	0.174	78	9.6	150.78
14	15	0.21	57.2	0.22	53	6.69	195.59
15	27.6	0.089	30.4	0.128	336	5.12	228.78
16	23.5	0.106	45.8	0.207	30	0.24	608.51
17	24.8	0.012	29.9	0.068	504	1.68	367.05
18	23.6	0.07	39.2	0.203	22	0.5	517.44
19	30.5	0.073	28.7	67	30	15.7	89.74
20	18.4	0.063	64.5	0.243	69	0.15	666.83
21	21.1	0.019	28.4	0.025	144	0.02	916.85
22	8.1	0.01	66.9	0.042	71	0.05	803.15
23	19.6	0.216	41.1	0.264	48	7.54	180.75
24	6	0.01	67.6	0.126	427	0.08	744.83
25	18.4	0.152	37.2	0.299	81	1.14	415.17
26	11.1	0.032	67.2	0.089	119	0.04	830.84
27	21.5	0.147	60.8	0.938	168	0.92	441.77
28	7.5	0.16	70.1	0.448	10	0.06	780.53
29	13	0.091	51.6	0.369	8	0.32	572.81
30	35.7	0.229	41.1	0.639	24	1.07	423.03

Fuente. Calculation of a health index for oil-immersed transformers rated under 69 kV using fuzzy logic, publicada el 04/10/2012.

Como primer paso el método de Mamdani convierte los valores numéricos de cada variable en expresiones lingüísticas, empleando los conjuntos correspondientes con sus funciones de pertenencia respectivas.

Una vez definidas las variables a través de expresiones lingüísticas, operan las reglas de inferencia difusa. Para cada una de las reglas activas, el o los valores ingresados truncan la función de membresía resultante (salida) para todos los antecedentes. La unión de todas las funciones de membresía truncadas forma la función de membresía final agregada.

Finalmente se aplica un proceso de defusificación mediante el método del centroide para encontrar un valor numérico que representa el HI.

La tabla 15 contiene la información correspondiente a los resultados de las pruebas de diagnóstico practicadas a 30 TP's, estos datos incluyen la humedad, acidez, rigidez dieléctrica, factor de disipación, total de gases combustibles y cantidad de furaldehídos (2-FAL), el grado de polimerización es calculado a partir de último empleando la ecuación de Chendong.

La tabla 16 contiene 3 valores de HI diferentes, el índice de salud calculado mediante el modelo propuesto por Abu-Elanien et. al. (Abu-Elanien et al., 2012) el segundo índice es tomado del mismo estudio y ha sido proporcionado por AMHA, una empresa consultora especializada en gestión de activos y evaluación de salud de los transformadores de potencia, el tercer valor de HI es el calculado a partir del modelo propuesto en el presente trabajo.

Tabla 16.

Valores de índice de salud tomados del estudio de referencia y calculados				
HI 1 modelo fuzzy Abu-Elanien	HI 2 proporcionado por AMHA	HI 3 modelo fuzzy propuesto	Variación del HI 3 respecto a HI 1 (%)	Variación del HI 3 respecto a HI 2 (%)
0.36 B	0.377 B	0.3761 B	4.47%	-0.24%
0.3 B	0.334 B	0.3 B	0.00%	-10.18%
0.3 B	0.29 B	0.3 B	0.00%	3.45%
0.78 MA	0.7 MA	0.775 MA	-0.64%	10.71%
0.2 MB	0.102 B	0.2002 MB	0.10%	96.27%
0.3 B	0.274 B	0.3 B	0.00%	9.49%
0.3 B	0.316 B	0.3 B	0.00%	-5.06%
0.3 B	0.29 B	0.3 B	0.00%	3.45%
0.22 MB	0.226 B	0.2192 MB	-0.36%	-3.01%
0.3 B	0.316 B	0.3 B	0.00%	-5.06%
0.94 MM	1 MA	0.9392 MM	-0.09%	-6.08%
0.93 MM	0.931 MA	0.9392 MM	0.99%	0.88%
0.94 MM	1 MA	0.9392 MM	-0.09%	-6.08%
0.83 MA	0.916 MA	0.8295 MA	-0.06%	-9.44%

0.78 MA	0.732 MA	0.775 MA	-0.64%	5.87%
0.3 B	0.354 B	0.3 B	0.00%	-15.25%
0.53 M	0.45 M	0.525 M	-0.94%	16.67%
0.3 B	0.291 B	0.3 B	0.00%	3.09%
0.94 MM	1 MA	0.9392 MM	-0.09%	-6.08%
0.3 B	0.347 B	0.3 B	0.00%	-13.54%
0.15 MB	0.414 M	0.153 MB	2.00%	-63.04%
0.11 MB	0.241 B	0.1104 MB	0.36%	-54.19%
0.94 MM	0.953 MA	0.9392 MM	-0.09%	-1.45%
0.3 B	0.368 B	0.3 B	0.00%	-18.48%
0.51 M	0.45 M	0.5095 M	-0.10%	13.22%
0.11 MB	0.072 B	0.1104 MB	0.36%	53.33%
0.42 M	0.371 B	0.4201 M	0.02%	13.23%
0.3 B	0.225 B	0.3 B	0.00%	33.33%
0.3 B	0.241 B	0.3 B	0.00%	24.48%
0.48 M	0.45 M	0.4877 M	1.60%	8.38%
Promedio			0.23%	2.62%

Fuente. El autor

Cada uno de los valores del HI cuentan con su respectiva categoría lingüística que indica la pertenencia a las funciones de membresía de salida, definidas en la figura 6.

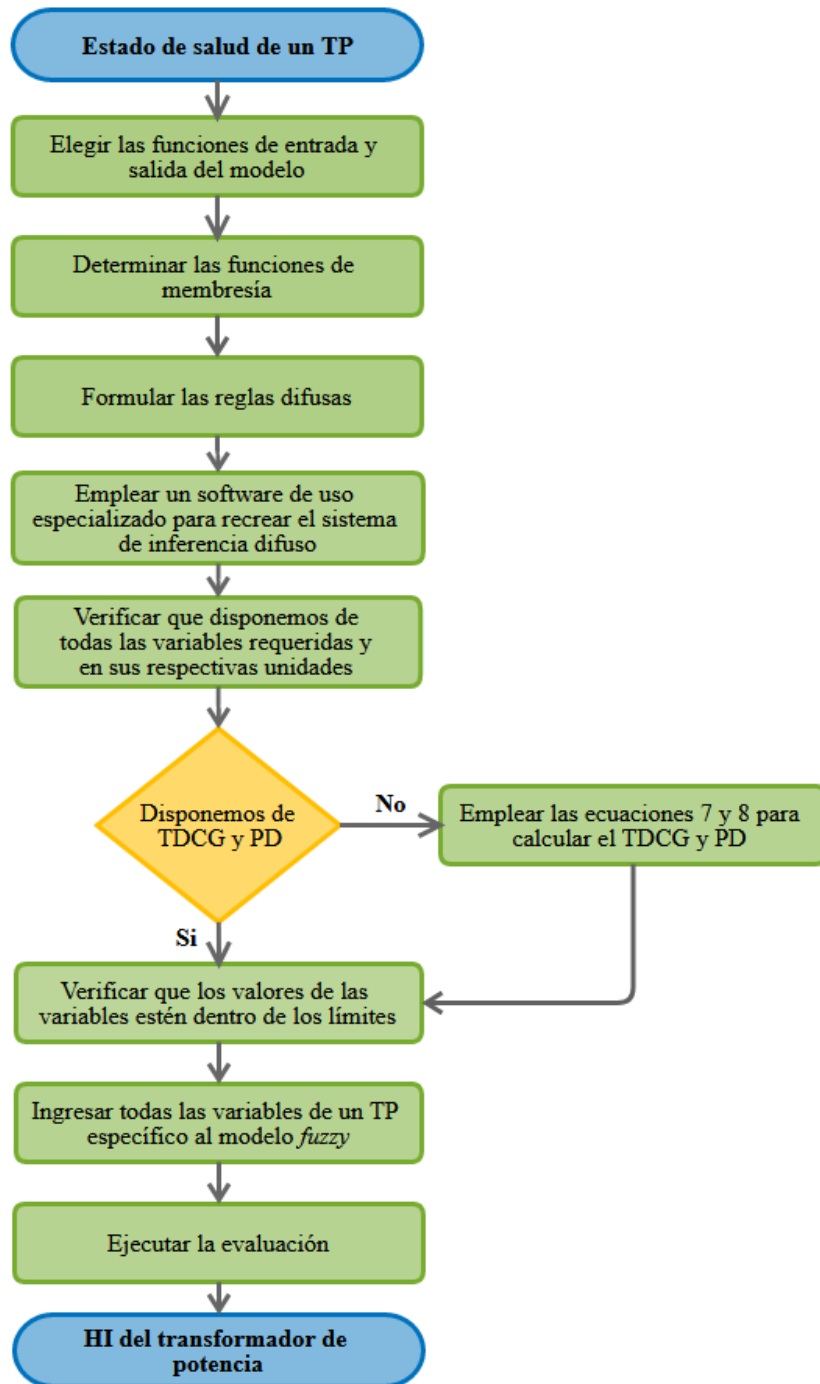
Es importante señalar que la implementación del modelo de lógica difusa para la determinación del índice de salud requirió de la creación de 5 categorías de condición de salud: muy buena (MB), buena (B), moderada (M), mala (MA) y muy mala (MM); de acuerdo al criterio experto. Para el HI 2 proporcionado, se consideran tres categorías: buena (B), moderada (M) y mala (MA).

4.2.4. Metodología para la determinación del índice de salud de transformadores de potencia de hasta 69 kV sumergidos en aceite.

En base a lo expuesto previamente, se propone el siguiente procedimiento para calcular el HI de un TP de hasta 69 kV sumergido en aceite, mediante lógica difusa. La figura 14 presenta la metodología propuesta en forma de un diagrama de flujo.

Figura 14.

Diagrama de flujo que define la metodología propuesta



Fuente: El autor

1. Elegir de las variables de entrada y salida el modelo.
2. Determinar las funciones de membresía para cada variable, esto en base a criterios expertos y las normativas aplicables.
3. Formular las reglas difusas en base a criterios expertos.
4. Emplear un software de uso especializado para recrear el sistema de inferencia difuso.
5. Verificar la disponibilidad de los valores de todas las variables necesarias para aplicar el modelo propuesto. Además, es necesario comprobar que las variables se especifiquen en las unidades requeridas por el modelo.

En el caso que se proporcione los valores de la cantidad de gases disueltos especificados por tipo y el valor del 2-FAL, aplicamos las ecuaciones 7 y 8 para determinar el TDCG y PD, respectivamente.

6. Verificar que los valores de las variables a ingresarse en el modelo estén dentro de los límites definidos.
7. Ingresar todas las variables de un TP específico al modelo difuso.
8. Ejecutar la evaluación.

4.2.4.1. Cálculo del HI de una flota de TP's

Una vez se dispone del modelo de análisis difuso en el software de uso especializado, se procede a realizar el cálculo del HI.

La Tabla disponible en el anexo 2 contiene los datos de las pruebas de rutina practicadas una flota de 10 transformadores de potencia en el año 2020, estos datos son reales y han sido proporcionados por una empresa distribuidora de energía eléctrica nacional.

Se dispone de las siguientes variables: contenido de agua, BDV, número de acidez, cantidad de gases combustibles disueltos (expresado tanto por componentes individuales como totales), 2-FAL y DF.

El TDCG en el aceite es un dato proporcionado por la empresa distribuidora por ello se lo toma directamente de la tabla. En el caso que la composición de gases combustibles se presente de manera individual se aplica la ecuación 7 para determinar la composición total. Como ejemplo, tomamos los datos del transformador 4.

$$TDCG = FG$$

$$TDCG_4 = 3.2 + 6.5 + 15.7 + 76.9 + 2.2$$

$$TDCG_4 = 104.5 \text{ ppm}$$

El valor total proporcionado en la tabla es de 105 ppm.

Los valores que presentan la simbología de menor que (<) no son considerados en la sumatoria, puesto que su composición es tan baja que no influye de manera significativa en el resultado.

En base a la ecuación 8 se calcula el PD del papel. La empresa distribuidora proporciona el valor de 2-FAL en partes por billón (ppb) por ello se realiza la conversión a ppm considerando que 1000 ppb equivale a 1 ppm. Para el transformador 4 tenemos.

$$PD = \frac{1.51 - \log_{10}(Fur)}{0.0035}$$
$$PD_4 = \frac{1.51 - \log_{10}(0.0655)}{0.0035} = 769.64$$

Una vez calculados los valores requeridos, se verifica que cada una de las variables estén dentro de los límites definidos por el modelo: TDCG [0-2000], PD [0-1000], contenido de humedad [0-50], número de neutralización [0-0.3], BDV [0-100], factor de disipación [0-1.4].

En el caso que los valores de las variables estén por fuera de los límites, debe asignarse el valor más bajo si la variable es inferior al valor mínimo y el valor más alto si la variable es superior al valor máximo. Para el Transformador 1, por ejemplo, el grado de polimerización calculado es de 1070.45, puesto que el valor máximo de esta variable es de 1000, le asignamos un valor de 1000. Se repite este procedimiento con todos los datos a ingresarse en el modelo.

Los valores a ser ingresados al modelo difuso se presentan en la tabla 17. Se procede a ingresar todas las variables de una unidad específica en el modelo de análisis difuso y se determina el HI de cada unidad, los resultados obtenidos se presentan en la misma tabla. En la figura 11 se presenta el cálculo del HI para los datos del transformador número 4 a través del FIS modelado en el software de uso especializado.

Tabla 17.

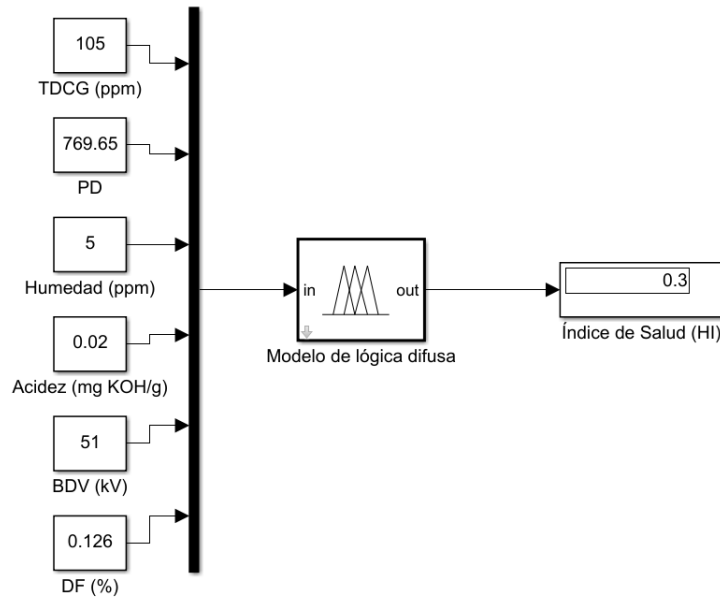
Valores de las variables de la flota de transformadores de potencia a ser ingresados en el modelo difuso

N°	TDCG (ppm)	Grado de Polimerización	Contenido de agua (ppm)	Numero de acidez (mgKOH /g)	Rigidez dieléctrica (kV)	Factor de disipación (%)	HI calculado
1	30	1070.45	15	0.02	51	0.04	0.1104
2	110	999.19	8	0.02	51	0.052	0.1104
3	-	-	-	-	-	-	-
4	105	769.65	5	0.02	51	0.126	0.3
5	249	1000	7	0.02	51	0.032	0.1104
6	169	1000	7	0.02	48	0.073	0.1104
7	134	1000	13	0.02	51	0.04	0.1104
8	25	591.85	18	0.07	41	0.16	0.3
9	112	1000	8	0.02	51	0.041	0.1104
10	267	1000	11	0.02	50	0.041	0.1104

Fuente. El autor

Figura 15.

Cálculo del índice de salud del transformador de potencia número 4.



Fuente: El autor

5. Metodología

Área de Estudio

La línea de investigación del presente trabajo está enfocada en la supervisión y control de los Sistemas Eléctricos de Potencia.

Procedimiento

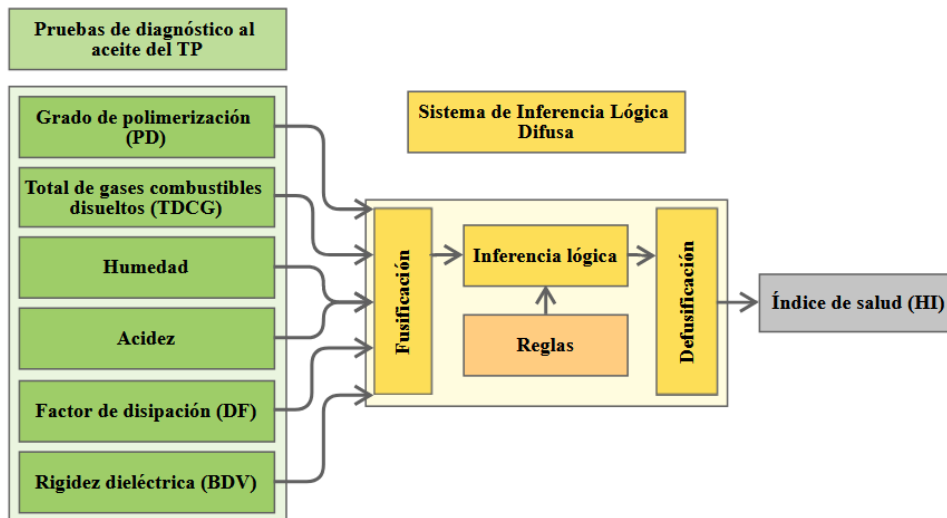
El presente documento se enmarca en una investigación aplicada, con un enfoque cuantitativo experimental basado en simulaciones y cálculos.

Se emplean criterios expertos y valores proporcionados por las normativas IEEE para la definir las funciones de membresía y las reglas difusas. Una vez definidas, se emplea un software de uso especializado para recrear el modelo de inferencia difusa.

Los valores empleados para verificar la validez del modelo propuesto son tomados de la base de datos proporcionada por Abu-Elanien et. al. (Abu-Elanien et al., 2012). Los datos de las variables: TDCG, BDV, acidez, humedad, rigidez dieléctrica y DP (calculado en base a 2-FAL) son ingresados al software, el cual es el encargado de realizar el proceso de fusificación, inferencia a través de las reglas difusas, defusificación y finalmente proporciona el valor final que representa el índice de salud del transformador de potencia. En la figura 16 se muestra la manera en cómo operan las variables de entrada y salida.

Figura 16.

Operacionalización de variables en el modelo



Fuente: El autor

Los resultados obtenidos por el modelo propuesto se comparan con los valores calculados en el trabajo de Abu-Elanien et. al., a través de un análisis estadístico simple.

Una vez verificada la validez del FIS propuesto, se toma los resultados de las pruebas de diagnóstico practicadas a una flota de 10 transformadores de potencia y se calcula el HI de las unidades.

Procesamiento y análisis de datos

En el presente Trabajo de Titulación se utilizaron los siguientes métodos:

Métodos

Método deductivo

Este método permite aplicar a un caso específico los principios de análisis definidos para casos de estudio generales. El uso de este permitió emplear criterios generales en base a estudios realizados por otros autores y que son similares al presente.

Método analítico cuantitativo

El método analítico cuantitativo que permite evaluar datos numéricos de investigaciones previas obtenidos por otros investigadores, con el fin de omitir la toma de muestras. Este permitió realizar un análisis comparativo entre los valores obtenidos por el modelo propuesto y los entregados por otros autores.

Técnicas

Técnica documental

Empleada para recopilar información referente a la temática analizada con el fin de fundamentar el estudio de los fenómenos y procesos.

6. Resultados

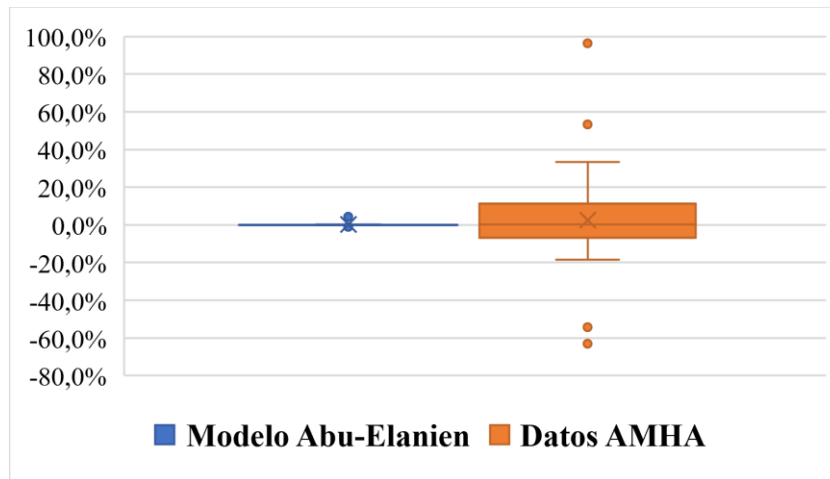
Una vez definido el sistema de inferencia difusa, se realiza un análisis comparativo entre los resultados calculados mediante el modelo propuesto y los tomados del estudio de Abu-Elanien et. al.

El HI calculado (HI 3) en comparación con el HI 1, presenta una variación máxima de 4.47% y mínima de -0.64%, con un promedio total del 0.23%. En el segundo escenario, al realizar una comparativa con el HI 2 la variación máxima es de 96.27%, la mínima de -63.04%, con un promedio de 2.62 %.

Como se aprecia en la figura 17 el modelo propuesto entrega valores muy cercanos respecto al HI 1, mientras que en comparación con el HI 2 se presenta una mayor dispersión de datos.

Figura 17.

Variación del HI calculado en comparación con los valores HI proporcionados.



Fuente: El autor

En cuanto a la valoración lingüística, no se observa cambio alguno en cuanto a la categorización de los transformadores mediante el HI 1 y HI 3. Para el caso del HI 2, se puede agrupar las categorías muy buena y buena; y muy mala y mala; del modelo propuesto en dos únicas categorías, con el fin de que el HI 2 y el HI 3 tengan el mismo número de categorías de condición de salud. Abu-Elanien et. al. (Abu-Elanien et al., 2012) menciona que es posible agrupar las categorías de esta manera puesto que las acciones de gestión de mantenimiento son iguales

para los transformadores que caen dentro de estas categorías específicas. De esta manera podemos observar cambios en la valoración lingüística en los transformadores 21 y 27, los cuales pasan de categoría moderada a buena y buena a moderada, respectivamente. Esto implica que las categorías lingüísticas proporcionadas por AMHA y las obtenidas mediante el modelo propuesto coinciden para 28 de los 30 transformadores, es decir en un 93.33%.

Una vez verificada la validez del sistema de inferencia difuso propuesto, se proceda a calcular los valores del HI de la flota de 10 TP aplicando la metodología propuesta en el presente trabajo y los datos proporcionados por la empresa distribuidora, los resultados del HI calculado se muestran en la Tabla 17.

La flota TP's analizado muestra que, de las 10 unidades, 7 tienen un índice de salud de 0.1104, equivalente lingüístico muy bueno, 2 unidades tienen un HI de 0.3 equivalente lingüístico bueno. No se dispone de los datos de la unidad número 3, por ello no es posible calcular el HI. Los datos obtenidos se resumen en la tabla 18.

Tabla 18.

Cantidad de TP's por cada estado de salud	
Estado de salud	Cantidad
Muy bueno	7
Bueno	2
Moderado	0
Malo	0
Muy malo	0
No es posible determinar	1
Total	10

Fuente. El autor

No se dispone de la fecha de instalación de los transformadores, no obstante, la totalidad de los mismos se encuentran al menos en buen estado, por lo cual se puede inferir que son relativamente nuevos. Para estas unidades no se precisa acciones correctivas específicas adicionales al mantenimiento periódico.

En el caso que se disponga de la edad de los equipos es recomendable que se analice a los transformadores nuevos con una condición de salud moderada para descubrir posibles fallas que puedan acelerar el envejecimiento.

Los transformadores que están en la condición muy mala deben ser rápidamente reemplazados, puesto que pueden fallar en poco tiempo. Los transformadores en mal estado tienen una probabilidad elevada de fallar, pero en un mayor tiempo, para estos se recomienda la sustitución en un futuro próximo.

Para los transformadores en condición de salud moderada se recomiendan que las pruebas se repitan con una periodicidad adecuada para determinar la evolución de su estado, para ello se pueden emplear análisis específicos como triángulo de Duval o análisis de gases clave en busca de posibles fallas internas.

7. Discusión

Con la finalidad de cumplir con el objetivo general del Trabajo de Titulación se plantea una metodología para para calcular el índice de salud de transformadores de potencia de hasta 69 kV sumergidos en aceite, empleando variables tomadas de las pruebas de rutina practicadas al aceite dieléctrico del equipo, a excepción del grado de polimerización, el cual es determinado a partir de una expresión experimental que lo relaciona con el contenido de 2-FAL. Se emplea un software de uso específico para desarrollar el modelo que cuenta con 6 variables de entrada y 80 reglas de inferencia difusa.

Existe un elevado porcentaje de coincidencia entre los valores del HI calculados con el sistema propuesto y los tomados como referencia, por esto resulta ser conveniente emplear el grado de polimerización del papel aislante como variable de entrada en lugar del contenido de furanos disueltos en el aceite.

Debido a la diferencia existente entre el número categorías del sistema difuso propuesto y las presentadas por AMHA, fue necesario agrupar las mismas con la finalidad de realizar una evaluación más equitativa con igual número de categorías para ambos HI. De esta manera se cuenta con tres categorías de salud para cada modelo, resultando en una evaluación lingüística de coincidencia casi total.

Los resultados muestran que la definición de las funciones de membresía y reglas expertas para el sistema planteado fueron las adecuadas, puesto que estos coinciden con el criterio de Abu-Elanien et. al. En este sentido, el grado de polimerización del papel y el total de gases combustibles disueltos tienen un mayor peso específico en el sistema difuso.

En base a los resultados, se puede inferir que las variables de entrada y salida, las funciones de membresía y las reglas difusas propuestas en el presente trabajo; han sido adecuadamente seleccionadas y formuladas y por ende los resultados obtenidos para la flota de 10 transformadores de potencia, pueden tomarse como válidos.

8. Conclusiones

Mediante el uso de lógica difusa aplicada a través de un software de uso especializado, fue posible desarrollar un sistema de inferencia difuso que permite calcular el índice de salud para transformadores de hasta 69 kV sumergidos en aceite. Se emplean como variables de entrada los datos obtenidos de las pruebas de diagnóstico aplicado al aceite dieléctrico del TP: La acidez, humedad, el factor de disipación, BDV, TDCG y el grado de polimerización, este último calculado a través de la ecuación de Chendong y al contenido de furanos. Las 80 reglas de inferencia han sido formuladas a través de criterios expertos. La validación de la metodología propuesta, llevada a cabo a través del análisis comparativo entre los valores de HI calculados, los resultados del modelo difuso tomado como base y los datos obtenidos a través de la empresa AMHA; muestran un promedio de variación del 0.23% y 2.62%, respectivamente, en cuanto al valor numérico del HI; y un porcentaje de coincidencia respecto a la valoración lingüística del 100% y 93.33%.

La degradación del papel aislante representa en gran medida el estado del transformador. Para transformadores manufacturados con papel no térmicamente mejorado, el nivel de furanos en el aceite permite determinar el estado del papel, no obstante, en los papeles térmicamente mejorados, no se ha logrado consensos entre los niveles de compuestos furánicos y la degradación de la celulosa. En estos casos es aconsejable emplear el grado de polimerización del papel.

Mediante un sistema de inferencia difusa se realizó el cálculo del HI para la flota de 10 TP's, tomando los valores proporcionados por la empresa distribuidora. Los resultados muestran que el 70 % de las unidades tiene un estado de salud muy bueno y el 20 % un estado bueno. En bases a estos resultados, para estas unidades no se requiere un tratamiento especializado adicional al mantenimiento de rutina.

9. Recomendaciones

El modelo de análisis mediante lógica difusa propuesto emplea únicamente los resultados obtenidos a partir de las pruebas de diagnóstico practicadas al aceite del TP. Ampliar y diversificar el número de variables de entrada podría mejorar la precisión para el cálculo del HI. Sin embargo, es necesario formular adecuadamente las reglas difusas para que estas incluyan las variables a ingresarse en el modelo y que estas no produzcan ambigüedades.

La ecuación de Chendong, proporciona un valor aproximado del grado de polimerización del papel en base al contenido de furanos disueltos en el aceite, no obstante, la cantidad de furanos liberados depende si el papel aislante es o no térmicamente mejorado. Por ello es recomendable determinar el grado de polimerización en base a pruebas de campo en lugar de calcularlo a partir de expresiones matemáticas.

Se recomienda aplicar la metodología para el cálculo del HI a una flota más grande de transformadores, incluyendo a aquellas unidades que han operado durante largo tiempo y las que presentan fallas incipientes, para verificar el estado de salud de las unidades y si estas se encuentran dentro de las categorías: regular, mala y muy mala.

La empresa distribuidora que proporcionó la base de datos de la flota de 10 TP's, no dispone de los valores del HI de las unidades en base a ninguna metodología de cálculo, por ello es recomendable que se evalúe el estado de salud de los transformadores, ya sea a través de la metodología propuesta en el presente trabajo o cualquier metodología que se estime conveniente. Los resultados obtenidos pueden resultar ser de utilidad para la gestión de activos de la empresa.

10. Bibliografía

- Abu-Elanien, A. E., Salama, M. M. A., & Ibrahim, M. (2012). Calculation of a health index for oil-immersed transformers rated under 69 kV using fuzzy logic. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4), 2029-2036.
- Azmi, A., Jasni, J., Azis, N., & Kadir, M. Z. A. A. (2017). Evolution of transformer health index in the form of mathematical equation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 687-700. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.094>
- Bureau of reclamation. (2000). *Transformer maintenance*. United States Department of the interior: Bureau of Reclamation. https://www.usbr.gov/power/data/fist/fist3_30/fist3_30.pdf
- Bureau of reclamation. (2003). *Transformer diagnostics*. United States Department of the interior: Bureau of Reclamation. https://www.usbr.gov/power/data/fist/fist3_31/fist3-31.pdf
- Cerón, A., Echeverry, D. F., Aponte, G., & Romero, A. (2015). Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos en Aceite Mineral con Voltajes entre 69kV y 230kV usando Lógica Difusa. *información tecnológica*, 26, 107-116.
- Chen, Guanrong ., Author, Pham, Trung Tat ., Author, & Boustany, NM ., Reviewer. (2001). Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems. *Applied Mechanics Reviews*, 54(6), B102-B103. <https://doi.org/10.1115/1.1421114>
- CIGRE. (2010). *Transimission Asset Risk Management A422," ed, 2010*.
- González Vergara, A. (2009). *Estudio de la acoplabilidad de transformadores de potencia* [B.S. thesis].
- Gorgan, B., Notingher, P., Badicu, L.-V., & Gabriel, T. (2010). Calculation of power transformers health indexes. *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series*.
- Harlow, J. H. (2007). *Electric Power Engineering Handbook: Electric power transformer engineering* (Second). Taylor & Francis.
- Hernanda, I. G. N. S., Mulyana, A. C., Asfani, D. A., Negara, I. M. Y., & Fahmi, D. (2014). Application of health index method for transformer condition assessment. *TENCON 2014*

- 2014 IEEE Region 10 Conference, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/TENCON.2014.7022433>
- Hooda, D. S., & Raich, V. (2017). *Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control: An Introduction*. Alpha Science International, Limited.
- IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. (1992). *IEEE Std C57.106-1991*, 1-32. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1992.101092>
- IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. (2006). *IEEE Std C57.106-2006 (Revision of IEEE Std C57.106-2002)*, 1-36.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2006.371041>
- IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors. (2013). *IEEE Std C57.152-2013*, 1-121.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6544533>
- IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers. (2009). *IEEE Std C57.104-2008 (Revision of IEEE Std C57.104-1991)*, 1-36.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.4776518>
- Izquierdo, L., Oлару, D., Izquierdo, S., Purchase, S., & Soutar, G. (2015). Fuzzy Logic for Social Simulation Using NetLogo. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18, 1.
<https://doi.org/10.18564/jasss.2885>
- Klir, G. J., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice Hall PTR.
- Lata, J. P., Medina, R. D., Borja, W. P., & Morales, D. X. (2016). Transformer common test description for condition management. *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2016.7778472>
- MathWorks. (s. f.-a). *Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems*. MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink - MATLAB & Simulink.
<https://la.mathworks.com/help/fuzzy/types-of-fuzzy-inference-systems.html>
- MathWorks. (s. f.-b). *What Is Fuzzy Logic? - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina*. MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink - MATLAB & Simulink. <https://la.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-fuzzy-logic.html>

- Medina, R. D., Zaldivar, D. A., Romero, A. A., Zuñiga, J., & Mombello, E. E. (2022). A fuzzy inference-based approach for estimating power transformers risk index. *Electric Power Systems Research*, 209, 108004. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108004>
- Naderian, A., Cress, S., Piercy, R., Wang, F., & Service, J. (2008). An Approach to Determine the Health Index of Power Transformers. *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 192-196. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570308>
- Ortiz, F., Fernandez, I., Ortiz, A., Renedo, C. J., Delgado, F., & Fernandez, C. (2016). Health indexes for power transformers: A case study. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 32(5), 7-17. <https://doi.org/10.1109/MEI.2016.7552372>
- Ross, T. J. (2009). *Fuzzy Logic with Engineering Applications* (Third). Wiley.
- Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*, 8(3), 199-249. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5)

11. Anexos

Anexo 1. Reglas de inferencia difusa

1. Si (grado_polimerizacion es muy_malo) entonces (indice_salud es muy_malo)
2. Si (TDCG es no_malo) and (grado_polimerizacion es malo) entonces (indice_salud es malo)
3. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es malo) entonces (indice_salud es muy_malo)
4. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es moderado_alto) entonces (indice_salud es malo)
5. Si (TDCG es no_malo) and (grado_polimerizacion es moderado_alto) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es malo)
6. Si (TDCG es no_malo) and (grado_polimerizacion es moderado_alto) and (Humedad es malo) entonces (indice_salud es malo)
7. Si (TDCG es no_malo) and (grado_polimerizacion es moderado_alto) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es malo)
8. Si (TDCG es no_malo) and (grado_polimerizacion es moderado_alto) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es malo)
9. Si (TDCG es no_malo) and (grado_polimerizacion es moderado_alto) and (Humedad es no_malo) entonces (indice_salud es moderado)
10. Si (TDCG es no_malo) and (grado_polimerizacion es moderado_alto) and (Humedad es no_malo) and (Rigidez es no_malo) entonces (indice_salud es moderado)
11. Si (TDCG es no_malo) and (grado_polimerizacion es moderado_alto) and (Humedad es no_malo) entonces (indice_salud es moderado)
12. Si (TDCG es no_malo) and (grado_polimerizacion es moderado_alto) and (Rigidez es no_malo) entonces (indice_salud es moderado)
13. Si (TDCG es no_malo) and (grado_polimerizacion es moderado_alto) and (Rigidez es no_malo) entonces (indice_salud es moderado)
14. Si (TDCG es no_malo) and (grado_polimerizacion es moderado_alto) entonces (indice_salud es moderado)
15. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es no_malo) entonces (indice_salud es moderado)
16. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es no_malo) entonces (indice_salud es moderado)

17. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es moderado)
18. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es moderado)
19. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es no malo) entonces (indice_salud es moderado)
20. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es no malo) entonces (indice_salud es moderado)
21. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es moderado)
22. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es moderado)
23. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) entonces (indice_salud es moderado)
24. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es bueno) entonces (indice_salud es moderado)
25. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es moderado)
26. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es moderado)
27. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es malo)
28. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es malo) entonces (indice_salud es malo)
29. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es malo)
30. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es malo) entonces (indice_salud es malo)
31. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es malo)
32. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es malo)
33. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es malo)

34. Si (TDCG es malo) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es malo)
35. Si (TDCG es moderado) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es malo) entonces (indice_salud es moderado)
36. Si (TDCG es moderado) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) entonces (indice_salud es moderado)
37. Si (TDCG es moderado) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
38. Si (TDCG es moderado) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) entonces (indice_salud es moderado)
39. Si (TDCG es moderado) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es malo) entonces (indice_salud es moderado)
40. Si (TDCG es moderado) and (grado_polimerizacion es bueno) entonces (indice_salud es moderado)
41. Si (TDCG es moderado) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
42. Si (TDCG es moderado) and (grado_polimerizacion es bueno) entonces (indice_salud es moderado)
43. Si (TDCG es moderado) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
44. Si (TDCG es moderado) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
45. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
46. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es moderado)
47. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
48. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
49. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
50. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)

51. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
52. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
53. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no bueno) entonces (indice_salud es bueno)
54. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no bueno) entonces (indice_salud es bueno)
55. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
56. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
57. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es no bueno) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
58. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es no bueno) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
59. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
60. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
61. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
62. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
63. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
64. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
65. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
66. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
67. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)

68. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
69. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
70. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
71. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
72. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
73. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
74. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
75. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
76. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es no malo) and (Rigidez es no malo) entonces (indice_salud es bueno)
77. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es moderado_bajo) and (Humedad es bueno) and (Rigidez es bueno) entonces (indice_salud es muy_bueno)
78. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es bueno) and (Rigidez es bueno) entonces (indice_salud es muy_bueno)
79. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es malo) and (Rigidez es malo) entonces (indice_salud es moderado)
80. Si (TDCG es bueno) and (grado_polimerizacion es bueno) and (Humedad es malo) entonces (indice_salud es moderado)

Anexo 2. Resultados de las pruebas de diagnóstico practicadas a una flota de 10 TP's

N°	Potencia nominal [MVA]	Voltaje nominal [kV]	Contenido de agua (ppm)	Rigidez dieléctrica (kV)	Número de acidez (mgKOH /g)	Gases combustibles (ppm)								2-FAL (ppb)	Factor de disipación (%)
						CO2	C2H2	C2H4	C2H6	CH4	CO	H2	Total		
1	10	69/13.8	15	51	0.02	512	<0.3	0,4	<1	0.3	28.8	<0.6	30	<5.8	0.04
2	10	69/13.8	8	51	0.02	471	<0.3	<0.4	<1	0.8	108	1.5	110	10.3	0.052
3	5	69/13.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	10	69/13.8	5	51	0.02	431.5	<0.3	3.2	6.5	15.7	76.9	2.2	105	65.5	0.126
5	5	69/13.8	7	51	0.02	1035.5	<0.3	6.4	6.6	23.2	186	27.2	249	<5.8	0.032
6	10	69/13.8	7	48	0.02	749.7	<0.3	<0.4	<1	1.7	167	0.8	169	6.9	0.073
7	10	69/13.8	13	51	0.02	491.8	<0.3	<0.4	<1	<0.2	133	<0.6	134	6.1	0.04
8	5	69/13.8	18	41	0.07	393.4	<0.3	1.2	<1	<0.2	22.8	1.1	25	274.5	0.16
9	10	69/13.8	8	51	0.02	457.5	<0.3	0.4	<1	0.7	110	1.3	112	8	0.041
10	5	69/13.8	11	50	0.02	2298.6	<0.3	13.2	<1	1.3	252	1.2	267	6.2	0.041

Anexo 3. Certificado de traducción de resumen

Loja, 20 de septiembre del 2022.

Jorge Isaac Peralta Córdova, portador del documento de identidad N°**1105166068**, poseedor del **NIVEL INTERMEDIO B2-INGLÉS**, certificado **SETEC N° MDT-OC-193617**.

Por medio de la presente tengo a bien **CERTIFICAR**:

Que he realizado la traducción al idioma inglés del resumen derivado del Trabajo de Titulación: **Cálculo del Índice de Salud de los Transformadores de Potencia de hasta 69 kV mediante lógica difusa**, de autoría de la Sr. Jorge Isaac Peralta Córdova, portador de la cédula de identidad N° 1105166068.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, a su vez autorizo al interesado a hacer el uso del presente para los fines que considere pertinentes.

Jorge Isaac Peralta Córdova

SETEC N° MDT-OC-193617