



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

**“EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA LÓGICA DIFUSA Y
EL MÉTODO DE SUMAS PONDERADAS PARA EL CÁLCULO
DEL ÍNDICE DE RIESGO EN TRANSFORMADORES DE
POTENCIA”**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA.**

AUTORES:

Carlos Stalin Oña Espinoza
Ronald Omar Orozco Asitimbay

TUTOR:

Ing. Mg. Jefferson Alberto Porras Reyes

LATACUNGA - ECUADOR

Agosto, 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Latacunga, 07 de agosto de 2025

Yo **Carlos Stalin Oña Espinoza** y **Ronald Omar Orozco Asitimbay**, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“Evaluación comparativa de la lógica difusa y el método de las sumas ponderadas para el cálculo del índice de riesgo en transformadores de potencia”**, siendo el Ing. Mg. Jefferson Alberto Porras Reyes tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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



.....
Carlos Stalin Oña Espinoza

C.I. 175132569-5



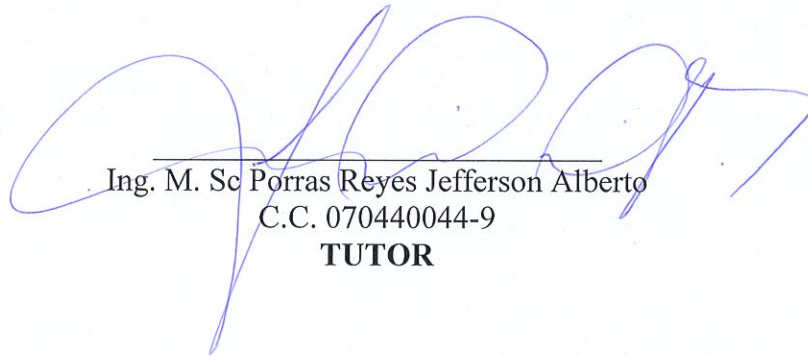
.....
Ronald Omar Orozco Asitimbay

C.I. 1600837627

Latacunga, agosto del 2025

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor de la Propuesta Tecnológica sobre el título: **“EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA LÓGICA DIFUSA Y EL MÉTODO DE SUMAS PONDERADAS PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA”**, propuesto por los estudiantes **Carlos Stalin Oña Espinoza** y **Ronald Omar Orozco Asitimbay** de la Carrera de Electromecánica considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. M. Sc Porras Reyes Jefferson Alberto
C.C. 070440044-9
TUTOR

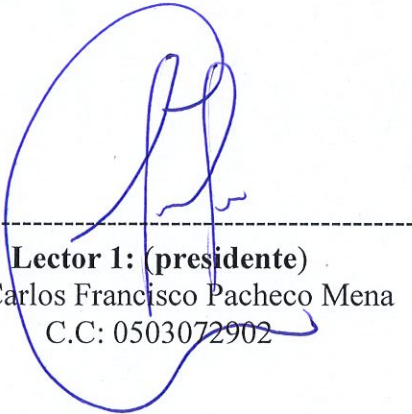
Latacunga, agosto del 2025

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

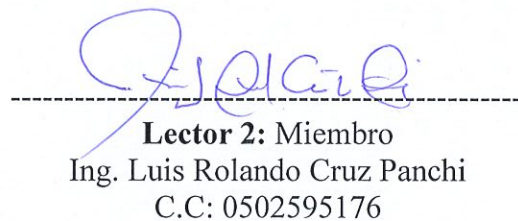
Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de la Propuesta Tecnológica con el Título **“EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA LÓGICA DIFUSA Y EL MÉTODO DE SUMAS PONDERADAS PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA”**, propuesto por los estudiantes Carlos Stalin Oña Espinoza con número de cédula N°1751325695 y Ronald Omar Orozco Asitimbay con número de cédula N°1600837627 de la Carrera de Electromecánica, me permito indicar que los estudiantes han concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, además de validar el funcionamiento de la propuesta, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad Propuesta Tecnológica en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

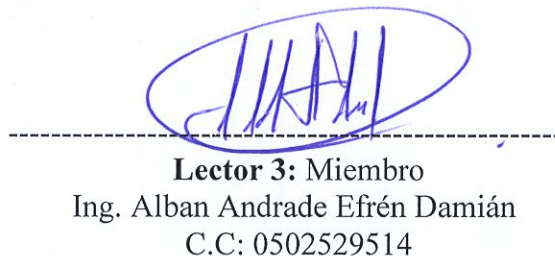
Atentamente,



Lector 1: (presidente)
Ing. Carlos Francisco Pacheco Mena
C.C: 0503072902



Lector 2: Miembro
Ing. Luis Rolando Cruz Panchi
C.C: 0502595176



Lector 3: Miembro
Ing. Alban Andrade Efrén Damián
C.C: 0502529514

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fortaleza, sabiduría y perseverancia para culminar este proyecto, agradezco a mi tutor de tesis por su orientación experta y paciencia durante este proceso investigativo, sus conocimientos y sugerencias fueron esenciales para dar forma al proyecto y ampliar mi comprensión del tema. También agradezco a mi familia por su apoyo emocional e incondicional, quienes fueron mi fuente de fortaleza durante las largas horas de estudio y dedicación. A mi madre, Lucia Espinoza, por su respaldo en mi proceso académico y en especial a mi esposa Doris Peñafiel por ser el pilar fundamental en esta etapa de mi vida. Finalmente, reconozco y agradezco a todas las personas que de alguna manera contribuyeron a este proyecto, dejando una marca significativa en este trabajo.

Stalin Oña

DEDICATORIA

A la mujer que ha sido mi faro inagotable de amor, sabiduría y fortaleza, mi madre. A ti, que, con paciencia infinita y ternura incansable, has sido mi guía en los momentos de desafío y mi fuente inagotable de inspiración. A mi querida esposa que es el pilar fundamental de mi vida, este proyecto no es solo el resultado de años de esfuerzo sino también de tu paciencia, comprensión y amor incondicional. Gracias por haber sido mi compañera en cada noche de desvelos, por animarme cuando dudaba y por celebrar conmigo cada pequeño avance Eres mi motivación más grande, el corazón que late detrás de cada logro y la razón por la que sigo adelante incluso en los días más difíciles. Este título también es suyo, porque sin su apoyo, nada de esto habría sido posible. Con todo mi amor y agradecimiento.

Stalin Oña

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS

TÍTULO: “EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA LÓGICA DIFUSA Y EL MÉTODO DE LAS SUMAS PONDERADAS PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA.”

Autor: Carlos Stalin Oña Espinoza

RESUMEN

La presente propuesta tecnológica aborda el desarrollo de dos metodologías para calcular el índice de riesgo de una flota de 4 transformadores de potencia, 3 de estas unidades son de 30 MVA y 1 de 15 MVA, de los cuales se disponen los datos de placa, las pruebas realizadas a estos activos como: la rigidez dieléctrica, el contenido de humedad en el aceite, el factor de disipación, el análisis de gases disueltos, la acidez, el grado de polimerización y los indicadores respecto a la afectación a la calidad del suministro eléctrico y la seguridad del entorno de estos activos. Las metodologías propuestas para determinar este índice son la lógica difusa y el método de las sumas ponderadas, con el objetivo de realizar una evaluación comparativa. Para realizar el cálculo del índice de riesgo con la lógica difusa se utilizó la herramienta Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB, la cual permitió desarrollar un sistema de inferencia difuso que utiliza como variables de entrada el índice de salud y el factor de consecuencia, los cuales fueron calculados con la misma herramienta, mientras que para el método de las sumas ponderadas se desarrolló un sistema basado en puntajes y pesos de ponderación los cuales fueron asignados de acuerdo al nivel de importancia de las pruebas realizadas a los transformadores de potencia y sus indicadores de consecuencia a la falla, para realizar este sistema se utilizó la herramienta Excel. Al final de este proyecto se presenta una comparación de los procedimientos utilizados para evaluar el índice de riesgo mediante una tabla comparativa. Al comparar los resultados obtenidos del índice de riesgo se evidenció que existe un error del 25,33 % entre ambas metodologías, los valores de referencia utilizados para calcular el error, fueron los de la lógica difusa ya que estos resultados se apegan más al estado real de los transformadores de potencia que fueron estudiados en este proyecto.

Palabras clave: Lógica difusa, sumas ponderadas, transformador de potencia, índice de riesgo.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

Author: Carlos Stalin Oña Espinoza

TITLE: “COMPARATIVE EVALUATION OF FUZZY LOGIC AND THE WEIGHTED SUM METHOD FOR CALCULATING THE RISK INDEX IN POWER TRANSFORMERS”

ABSTRACT

This technological proposal addresses the development of two methodologies for calculating the risk index of a fleet of four power transformers, three of which are 30 MVA and one is 15 MVA, for which the following data is available: nameplate data, tests performed on these assets such as dielectric strength, moisture content in the oil, dissipation factor, dissolved gas analysis, acidity, degree of polymerization, and indicators regarding the impact on the quality of the power supply and the safety of the environment surrounding these assets. The methodologies proposed to determine this index are fuzzy logic and the weighted sum method, with the aim of performing a comparative evaluation. To calculate the risk index using fuzzy logic, the MATLAB Fuzzy Logic Toolbox was used, which allowed the development of a fuzzy inference system that uses the health index and the consequence factor as input variables, which were calculated with the same tool. While for the weighted sums method, a system was developed based on scores and weightings, which were assigned according to the level of importance of the tests performed on the power transformers and their failure consequence indicators. Excel was used to develop this system. At the end of this project, a comparison of the procedures used to evaluate the risk index is presented in a comparative table. When comparing the results obtained from the risk index, it was evident that there is a 25.33% error between the two methodologies. The reference values used to calculate the error were those of fuzzy logic, as these results are more in line with the actual state of the power transformers studied in this project.

Keywords: Fuzzy logic, weighted sums, power transformer, risk index

AVAL DE TRADUCCIÓN


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

La traducción del resumen al idioma inglés del proyecto de la propuesta tecnológica, cuyo título versa: **"EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA LÓGICA DIFUSA Y EL MÉTODO DE LAS SUMAS PONDERADAS PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA"** presentado por: **Oña Espinoza Carlos Stalin y Orozco Asitimbay Ronald Omar**, egresados de la Carrera de: **INGENIERÍA ELECTROMECAICA**, de la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

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

Latacunga, 08 de agosto del 2025

Atentamente,



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CI: 0502666514



**CENTRO
DE IDIOMAS**

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO

1.	INFORMACIÓN GENERAL	7
2.	INTRODUCCIÓN.....	8
2.1	SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	9
2.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	10
2.3	OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	10
2.4	BENEFICIARIOS	11
2.5	JUSTIFICACIÓN.....	11
2.6	OBJETIVOS.....	12
2.6.1	Objetivo general	12
2.6.2	Objetivos específicos.....	12
2.7	SISTEMA DE TAREAS	13
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	14
3.1	ANTECEDENTES	14
3.2	GESTIÓN DE ACTIVOS	14
3.3	GESTIÓN DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA	15
3.4	TRANSFORMADOR DE POTENCIA	15
3.5	FALLAS DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA	18
3.5.1	Tipos de fallas en los transformadores de potencia.....	18
3.5.2	Estadísticas de falla	19
3.5.3	Normas utilizadas para las pruebas de los transformadores de potencia.....	19
3.6	LÓGICA DIFUSA	20
3.6.1	Conjuntos de inferencia difusa	20
3.6.2	Funciones de pertenencia	20
3.6.3	Sistema de inferencia difuso.....	21

3.6.4	Fuzzificación y Defuzzificación.....	21
3.6.5	Reglas de inferencia	22
3.6.6	Dispositivo de inferencia difuso.....	22
3.6.7	Métodos de Defuzzificación.....	22
3.6.8	Fuzzy logic toolbox	23
3.7	SUMAS PONDERADAS	23
3.8	ÍNDICE DE SALUD	26
3.8.1	VARIABLES DE ENTRADA PARA EL ÍNDICE DE SALUD	27
3.9	FACTOR DE CONSECUENCIA	32
3.9.1	VARIABLES DE ENTRADA PARA EL FACTOR DE CONSECUENCIA	33
3.10	EL ÍNDICE DE RIESGO.....	36
3.11	ERROR PROMEDIO.....	38
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	40
4.1	VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN.....	40
4.1.1	VARIABLES INDEPENDIENTES.....	40
4.1.2	VARIABLES INDEPENDIENTES.....	40
4.2	DIAGRAMA DE FLUJO.....	41
4.3	DATOS DE ENTRADA	42
4.4	CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO CON LÓGICA DIFUSA.....	43
4.5	CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO CON SUMAS PONDERADAS	53
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	59
5.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO.....	59
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
7.	REFERENCIAS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Principales fallas funcionales en transformadores de potencia [8]	19
Figura 3.2 Funciones de membresía más habituales: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana y (d) sigmoideal.....	21
Figura 3.3 Sistema propuesto de inferencia difuso.....	21
Figura 3.4 Interfaz gráfica de Fuzzy logic toolbox	23
Figura 3.5 Plano de la probabilidad de falla vs el factor de consecuencia	37
Figura 4.1 Esquema del sistema de inferencia difusa para el cálculo del índice de riesgo de transformadores de potencia.....	44
Figura 4.2 Esquema del sistema de inferencia difusa para el cálculo del índice de salud	44
Figura 4.3 Esquema del sistema de inferencia difusa para el cálculo del factor de consecuencia	45
Figura 4.4 Interfaz visual de fuzzy logic toolbox.....	46
Figura 4.5 Sistema de inferencia, ingresado las entradas y salida del índice de salud.....	46
Figura 4.6 Sistema de inferencia, ingresado las entradas y salida del factor de consecuencia	47
Figura 4.7 Sistema de inferencia, ingresado las entradas y salida del índice de riesgo	47
Figura 4.8 Selección de operadores lógicos	48
Figura 4.9 Funciones de membresía creadas por defecto.....	49
Figura 4.10 Reemplazo de función de membresía por defecto	49
Figura 4.11 Ventana del editor de reglas.....	50
Figura 4.12 Reglas de inferencia para el índice de salud	50

Figura 4.13 Reglas de inferencia para el factor de consecuencia	51
Figura 4.14 Reglas de inferencia para el índice de riesgo	51
Figura 4.15 Entorno visual de las reglas de inferencia.....	52
Figura 4.16 Ingreso de los valores de entrada de los TP	52
Figura A 1 Función de membresía para la evaluación del índice de salud	86
Figura A 2 Función de membresía de la rigidez dieléctrica	86
Figura A 3 Función de membresía para el contenido de humedad	87
Figura A 4 Función de membresía para el factor de disipación	87
Figura A 5 Función de membresía para la acidez	87
Figura A 6 Función de membresía para el análisis de gases disueltos	88
Figura A 7 Función de membresía para el grado de polimerización.....	88
Figura A 8 Función d membresía para el factor de consecuencia	88
Figura A 9 Función de membresía para la sobrecarga a otros equipos	89
Figura A 10 Función de membresía para la potencia desconectada.....	89
Figura A 11 Función de membresía para las cargas sensibles.....	89
Figura A 12 Función de membresía para el volumen de aceite.....	90
Figura A 13 Función de membresía para la proximidad a otras construcciones	90
Figura A 14 Función de membresía para las penalizaciones.....	90
Figura A 15 Función de membresía para el índice de riesgo	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Campos de la ciencia y tecnología UNESCO	7
Tabla 2.1 Campos de ciencias tecnológicas de la UNESCO.....	10
Tabla 2.2 Descripción del sistema de tareas.....	13
Tabla 3.1 Valores aceptables de ruptura eléctrica tomados de [16]	28
Tabla 3.2 Valores límite del factor de disipación tomados de [16]......	28
Tabla 3.3 Valores de los límites aceptables de humedad tomados de [17].	29
Tabla 3.4 Valores de acidez aceptable en aceites minerales tomados de [17].	30
Tabla 3.5 Valores de los gases totales en el aceite en (ppm) tomados de [19]......	31
Tabla 3.6 Nivel de sobrecarga a otros equipos	33
Tabla 3.7 Nivel de potencia desconectada.....	33
Tabla 3.8 Nivel de cargas sensibles.....	34
Tabla 3.9 Nivel del volumen de aceite	34
Tabla 3.10 Nivel de proximidad a otras construcciones.....	35
Tabla 3.11 Nivel de penalizaciones	35
Tabla 4.1 Datos de entrada de los transformadores de potencia en estudio	42
Tabla 4.2 Variables utilizadas para el cálculo del índice de salud	42
Tabla 4.3 Variables utilizadas para el cálculo del factor de consecuencia.....	43
Tabla 4.4 Escala del índice de salud.....	53
Tabla 4.5 Puntajes y pesos de las variables utilizadas en el cálculo del índice de salud.....	54
Tabla 4.6 Rangos para evaluar el factor de consecuencia	55

Tabla 4.7 Puntajes y pesos de las variables utilizadas en el cálculo del factor de consecuencia	56
Tabla 4.8 Rangos de los niveles de riesgo.....	57
Tabla 4.9 Puntajes y pesos de las variables utilizadas en el cálculo del índice de riesgo	58
Tabla 5.1 Resultados obtenidos del índice de salud	59
Tabla 5.2 Resultados obtenidos del factor de consecuencia.....	60
Tabla 5.3 Resultados obtenidos del índice de riesgo.....	61
Tabla 5.4 Resultados del índice de salud calculado con sumas ponderadas	62
Tabla 5.5 Resultados del factor de consecuencia calculado con sumas ponderadas	62
Tabla 5.6 Resultado del índice de riesgo calculado con sumas ponderadas	63
Tabla 5.7 Resultados del índice de salud calculado mediante las 2 metodologías propuestas.	63
Tabla 5.8 Resultados del factor de consecuencia calculado mediante las 2 metodologías propuestas.	64
Tabla 5.9 Resultados del Índice de riesgo calculado con las 2 metodologías propuestas en el proyecto	65
Tabla 5.10 Error relativo de las metodologías propuestas.....	66

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: “Evaluación comparativa de la lógica difusa y el método de las sumas ponderadas para el cálculo del índice riesgo en transformadores de potencia.”

Modalidad de Titulación:

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

Carrera: Ingeniería Electromecánica

Proyecto de investigación vinculado: Modelo de gestión de activos en sistemas electromecánicos en el sector multisectorial de la provincia de Cotopaxi

Equipo de Trabajo: Oña Espinoza Carlos Stalin

Área de Conocimiento: En la tabla 1 se detalla el código de los campos de la ciencia y tecnología pertenecientes a la UNESCO, de la cual se trabajará en el área 07 correspondientes a Ingeniería industria y construcción, el cual integra el campo 071 de ingeniería y profesiones afines y se enfoca principalmente en el código 0713 electricidad y energía.

Tabla 1.1 Campos de la ciencia y tecnología UNESCO

07 Ingeniería, industria y construcción	071 Ingeniería y profesiones afines	0711 Ingeniería y procesos químicos
		0712 Tecnología de protección del medio ambiente
		0713 Electricidad y energía

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

Sublíneas de investigación de la Carrera: Integración de fuentes de energía renovable y eficiencia energética mediante tecnologías de reducción de consumo en la industria.

2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad como resultado del crecimiento continuo de la sociedad, los sistemas eléctricos enfrentan una creciente demanda de confiabilidad y eficiencia, lo que hace que la gestión del estado de los transformadores de potencia sea una prioridad en el sector energético, la mala administración de estos activos dentro de una empresa de este sector puede ser desastrosa, no solo en su funcionamiento como organización, sino también para el servicio que ofrecen a los usuarios. El transformador de potencia es uno de los componentes principales de las subestaciones en los sistemas eléctricos de potencia y representan una costosa inversión, alcanzando hasta el 60 % del costo total [1].

Los beneficios para un administrador de saber el estado de la vida útil de un transformador de potencia pueden ser: la disminución de los costos que implican adquirir una nueva unidad, el mantenimiento para el activo, así como el aumento en la solidez de la operación en donde la unidad se encuentra en funcionamiento. La vida útil esperada de un transformador está determinada principalmente por su sistema de aislamiento, relacionado con el tipo de materiales dieléctricos utilizados y cómo fue fabricado [2]. Tradicionalmente, estos equipos están diseñados para operar entre 20 y 35 años; sin embargo, con un mantenimiento adecuado, algunos han superado los 40 años de servicio. Con relación a este contexto es necesario implementar programas de mantenimiento basados en la condición real del transformador y utilizar metodologías de evaluación adecuadas para optimizar la vida útil de estos equipos.

Este proyecto abarca tres fases, la primera es el cálculo del índice de riesgo para una flota de 4 transformadores de potencia con la aplicación de la metodología de las sumas ponderadas mediante el uso de Excel, la segunda fase del proyecto se basa en el cálculo del índice de riesgo aplicando la metodología de la lógica difusa con el software de programación MATLAB mediante el uso de la técnica de Mamdani FIS, cabe recalcar que para calcular el índice de riesgo es necesario obtener el índice de salud y el factor de consecuencia de los TP y la última fase de este proyecto se enfoca en agrupar los resultados obtenidos para realizar un análisis comparativo de las dos metodologías antes mencionadas.

El proyecto no solo busca demostrar las ventajas que tiene el uso de metodologías para el cálculo del índice de riesgo, sino que también pretende establecer un modelo que pueda ser adaptado otros campos del sector eléctrico, donde la eficiencia debe ser la prioridad para la

sostenibilidad del sistema.

2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

La gestión de activos de transformadores de potencia enfrenta desafíos críticos que impactan la confiabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos. Según estudios de CIGRE más del 60% de los transformadores en operación a nivel mundial tienen más de 25 años de antigüedad, lo que incrementa significativamente el riesgo de fallos debido al envejecimiento de materiales aislantes y degradación del aceite dieléctrico.

Los transformadores de potencia son elementos claves en la red de transmisión y distribución de un sistema eléctrico y su correcto funcionamiento es fundamental para mantener el suministro de energía estable. Sin embargo, factores como el envejecimiento de los equipos, sobrecargas, condiciones ambientales adversas provocan fallos en el transformador los cuales pueden comprometer su operatividad y reducir su vida útil. De acuerdo con el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), los fallos en transformadores de potencia constituyen la causa de aproximadamente el 30% de las interrupciones no planificadas en los sistemas de transmisión y distribución, estas interrupciones están asociadas a los costos que pueden generar estos eventos, la cifra varía en función de la criticidad del activo y el tiempo de indisponibilidad.

Una compañía de electricidad se puede preparar para solucionar este tipo de fallas o eventos, sólo si cuenta con una metodología que le permita gestionar sus activos de manera óptima, es decir, si puede tomar las decisiones correctas en el momento adecuado [3]. Durante la administración de una flota de transformadores hay que analizar los riesgos asociados a cada activo del sistema eléctrico, dado este enfoque, hay que estimar el nivel de riesgo para cada unidad. Al momento de considerar el riesgo, se puede implementar una clasificación de acuerdo a su condición, lo que permite planificar acciones a mediano y largo plazo.

En Ecuador, muchas empresas del sector energético no cuentan con metodologías adecuadas para evaluar el estado real de riesgo de sus transformadores, lo que genera riesgos de fallas inesperadas y costos elevados por reposición o reparación. Basado en este contexto, es necesario implementar programas de mantenimiento que se basen en el índice de riesgo de cada unidad que muestra la condición real del transformador y utilizar metodologías de evaluación eficientes para optimizar su vida útil y prevenir fallas catastróficas.

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La falta del desarrollo de metodologías para el cálculo adecuado del índice de riesgo en transformadores de potencia, genera mucha presión sobre las empresas del sector eléctrico dada la criticidad y altos costos de mantenimiento o reemplazo de estos activos, lo que compromete en decisiones de gestión incrementando fallas catastróficas e interrupciones operativas.

2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

Objeto de Investigación:

Índice de riesgo en transformadores de potencia.

Campo de Acción:

En la tabla 2 se detalla el código de los campos de la ciencia y tecnología pertenecientes a la UNESCO, de la cual se trabajará en el área 33 correspondientes a ciencias tecnológicas, el cual integra el campo 3306 de ingeniería y tecnologías eléctricas y se enfoca principalmente en el código 3306.02 aplicaciones eléctricas.

Tabla 2.1 Campos de ciencias tecnológicas de la UNESCO

33 ciencias tecnológicas	3306 ingeniería y tecnologías eléctricas	3306.02 Aplicaciones eléctricas
		3306.05 Conductores aislados
		3306.09 Transmisión y distribución

2.4 BENEFICIARIOS

Directos

Empresas de distribución y transmisión eléctrica, gestores de activos eléctricos

Indirectos

Fabricantes de transformadores eléctricos, desarrolladores de tecnología de monitoreo y software de gestión de activos.

2.5 JUSTIFICACIÓN

Este estudio se centra en el área eléctrica, específicamente en el análisis de los transformadores de potencia, ya que este tema es uno de los más importantes en la gestión de activos eléctricos, este enfoque ha sido clave en la formación profesional de varios ingenieros. El desarrollar este proyecto es una oportunidad para profundizar en el uso de diferentes metodologías que funcionan para evaluar el nivel de riesgo en el que se encuentran los transformadores de potencia.

La evaluación del índice de riesgo en transformadores de potencia mediante el uso de la lógica difusa y el método de las sumas ponderadas ha sido explorada muy poco en el ámbito nacional, por lo que este proyecto servirá de guía para comprender estas dos metodologías y profundizar en su análisis. Este estudio requiere de un amplio conocimiento que detalle cómo está compuesto el transformador de potencia, sus partes, el tipo de fallas que se pueden generar, las consecuencias de dichas fallas, el estado en que se encuentra el transformador, para obtener una evaluación precisa.

Este trabajo busca proporcionar una guía teórica y práctica que facilite la aplicación de las metodologías en estudio tanto en el ámbito académico como en el laboral. La evaluación del índice de riesgo permitirá establecer el estado del equipo dentro de la gestión de activos de las empresas del sector eléctrico facilitando la toma de decisiones sobre un posible mantenimiento o reemplazar el activo definitivamente.

Esta investigación aportará un amplio conocimiento sobre la comparación entre dos métodos de cálculo del índice de riesgo, lo que servirá como referencia para futuras investigaciones y aplicaciones en subestaciones de servicio eléctrico.

2.6 OBJETIVOS

2.6.1 Objetivo general

Realizar una evaluación comparativa sobre el cálculo del índice de riesgo en transformadores de potencia mediante el uso de la lógica difusa y el método de las sumas ponderadas con el fin de establecer recomendaciones metodológicas que optimicen la gestión del riesgo en estos activos.

2.6.2 Objetivos específicos

- Recopilar información técnica y metodológica sobre transformadores de potencia, lógica difusa y el método de sumas ponderadas mediante la revisión de literatura especializada, normas técnicas y estudios de caso con el fin de fundamentar la evaluación multicriterio del activo.
- Desarrollar una metodología cuantitativa y cualitativa a través de un sistema de inferencia difuso y el método de las sumas ponderadas para determinar el índice de riesgo de los transformadores de potencia.
- Evaluar los resultados del índice de riesgo generados por las metodologías propuestas mediante un análisis comparativo, con el fin de estimar su implementación en la gestión de transformadores de potencia.

2.7 SISTEMA DE TAREAS

Tabla 2.2 Descripción del sistema de tareas

Objetivos específicos	Actividades	Resultados esperados	Técnicas, medios e instrumentos
Recopilar información técnica y metodológica sobre transformadores de potencia, lógica difusa y el método de sumas ponderadas mediante la revisión de literatura especializada, normas técnicas y estudios de caso con el fin de fundamentar la evaluación multicriterio del activo.	Investigación sobre las normativas que rigen el estado en el que se encuentran los transformadores de potencia y de las metodologías de la lógica difusa y sumas ponderadas. Recolección y análisis de los datos obtenidos de los transformadores de potencia que se van a utilizar	Guía de información para el uso de las metodologías en el cálculo del índice de riesgo Base de datos de las pruebas y parámetros de los transformadores de potencia.	Investigación bibliográfica Libros Artículos científicos Normativa
Desarrollar una metodología cuantitativa y cualitativa a través de un sistema de inferencia difuso y el método de las sumas ponderadas para determinar el índice de riesgo de los transformadores de potencia.	Elaboración del modelo FIS en el software Matlab para la aplicación de la lógica difusa. Implementación del software Excel para la aplicación de las sumas ponderadas.	Modelo FIS del cálculo del índice de riesgo Cálculo del índice de riesgo	Software Matlab Software Excel Metodología de lógica difusa Metodología de sumas ponderadas
Evaluar los resultados del índice de riesgo generados por las metodologías propuestas mediante un análisis comparativo, con el fin de estimar su implementación en la gestión de transformadores de potencia.	Revisión de los resultados obtenidos mediante el uso de las metodologías propuestas en el proyecto. Realización de un análisis comparativo de los resultados obtenidos en el cálculo del índice de riesgo usando la lógica difusa y las sumas ponderadas.	Tabla con los valores obtenidos Evaluación del método más apropiado para el cálculo del índice de riesgo en transformadores de potencia.	Análisis de resultados Comparación de metodologías.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 ANTECEDENTES

A lo largo del tiempo las compañías de electricidad se han enfrentado a desafíos clave en la gestión de los transformadores de potencia como: la sobrecarga de estos activos más allá de su capacidad designada, la disminución del gasto en mantenimientos y la necesidad de inversiones más restrictivas. Ante estos desafíos, las compañías eléctricas están adoptando enfoques utilizados por inversores y aseguradoras, centrados en garantizar la integridad de los activos y mitigar posibles riesgos, esto en vista del gran número de transformadores de potencia en el mundo que se acercan al final de su vida útil [4].

Una compañía eléctrica estará preparada para abordar los retos planteados, sólo si cuenta con una metodología para la gestión óptima de sus activos, es decir, si puede tomar las decisiones correctas en el momento adecuado [3]. Una gestión eficiente de transformadores de potencia exige un análisis de riesgos de manera individual, asignando a cada unidad un nivel de riesgo según su estado operativo, esta evaluación permite jerarquizarlos y definir planes de mantenimiento sostenibles en el tiempo.

En este estudio se emplean 2 metodologías para determinar el índice de riesgo de una flota de transformadores de potencia tomando en cuenta el estado de salud, el factor de consecuencia e índice de criticidad de estos activos. El índice de riesgo se presenta como una herramienta fundamental para la toma de decisiones efectivas, cuya evaluación depende del método empleado.

3.2 GESTIÓN DE ACTIVOS

La gestión de activos comprende un conjunto de actividades o prácticas mediante las cuales se pueden gestionar eficazmente todos los activos de una empresa. La palabra activo se refiere a un elemento de valor importante para cualquier organización empresarial [5].

En el mundo de la energía manejar bien los activos es fundamental para operar con más eficiencia y mejorar los resultados. un buen sistema de gestión que combine mantenimiento preventivo, decisiones basadas en datos y nuevas tecnologías, permiten a las empresas sacar el máximo provecho de sus equipos y así minimizar posibles riesgos operativos. Esta gestión eficaz no solo impulsa la sostenibilidad a largo plazo, sino que también posiciona a las

organizaciones como líderes en un entorno altamente competitivo [6].

3.3 GESTIÓN DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

En el sector de suministro eléctrico, la gestión de activos se entiende como la programación para alcanzar niveles de excelencia y estabilidad del suministro energético, de forma tal que, a pesar de que, aunque puedan existir riesgos en los activos del sistema eléctrico, en todo momento sean admisibles y controlables. En el caso del sector eléctrico, se analiza principalmente la gestión de los activos que conforman el SEP, siendo el transformador de potencia uno de los activos más relevantes, dado que se trata de un equipo de capital intensivo que puede constituir hasta un 60% de la inversión total en una subestación [5].

Al igual que las personas, los transformadores experimentan un proceso de envejecimiento que impacta directamente en su desempeño y confiabilidad. Con el paso del tiempo, los materiales que los componen como el aislamiento, los núcleos magnéticos y los sistemas de refrigeración se degradan progresivamente debido a factores como estrés térmico, sobrecargas operativas y condiciones ambientales adversas. Como consecuencia, la probabilidad de falla aumenta significativamente a medida que el transformador envejece, elevando los riesgos de interrupciones en el suministro eléctrico y costos asociados a reparaciones o reemplazos.

A lo largo de la vida útil de estos activos se pueden realizar acciones como: adquirirlos, mantenerlos, repararlos, reubicarlos, desecharlos o en cierto punto reemplazarlos. Un 53% de fallas que sufren las unidades de transformación son evitables de acuerdo a lo anterior y con estudios realizados se percibió que antes de que una falla se produzca un transformador produce gases, por lo tanto, la detección temprana puede evitar un futuro problema de salud.

3.4 TRANSFORMADOR DE POTENCIA

El transformador de potencia es un dispositivo estático utilizado para transferir energía eléctrica entre 2 circuitos mediante inducción magnética, generalmente entre circuitos de diferentes voltajes, pero de la misma frecuencia. Su función principal es elevar el voltaje desde el nivel en que se genera hasta un valor mucho más alto para la transmisión, lo que minimiza la pérdida de energía y las caídas de voltaje.

El transformador eléctrico de potencia es la segunda máquina más importante de una planta de generación y es el principal elemento de una subestación eléctrica, tanto por su funcionamiento

como por su operación permanente. Es fundamental que las condiciones de este equipo sean las óptimas para poder darle al sistema la confiabilidad y continuidad máximas que necesita el usuario final.

Componentes principales de un transformador de potencia

- **Tanque principal:** El tanque principal es la carcasa metálica que encierra y protege los componentes del transformador, incluyendo los devanados, el núcleo y muchos otros. También contiene el aceite refrigerante y aislante, y conecta a tierra los diversos circuitos, garantizando así la seguridad y otras propiedades eléctricas [7].
- **Núcleo de acero:** El núcleo es el componente más pesado de un transformador de potencia. Sostiene los devanados y está compuesto por delgadas láminas de acero de menos de un milímetro, apiladas entre sí para formar una estructura sólida [7].
- **Bobinados:** Son vueltas de alambre enrolladas alrededor del núcleo. Los alambres son principalmente de cobre y, en ocasiones, de aluminio. El cobre posee propiedades eléctricas superiores y otras características, lo que lo hace una mejor opción en muchas aplicaciones. El transformador de potencia utiliza dos o más bobina, el devanado primario es el lado de entrada donde se aplica la tensión, y el secundario es el de salida. Los espacios entre espiras se rellenan con material aislante, como papel, los cables individuales también tienen aislamiento de barniz o papel[7].
- **Materiales aislantes:** Los aisladores de transformadores de potencia aíslan eléctricamente secciones y componentes, por ejemplo, separan los devanados del núcleo, las espiras individuales de los devanados de la bobina y otras partes. Los materiales pueden ser sólidos, como el papel y el cartón prensado, o líquidos, como el aceite mineral. El aceite es un mejor aislante en la mayoría de las aplicaciones ya que tiene una mayor vida útil y ofrece mejores propiedades de aislamiento e incluso puede desempeñar una función de refrigeración[7].
- **El sistema de refrigeración:** Este sistema es un mecanismo complejo que ayuda a disipar el calor mediante flujo de aire, aceite mineral y, a veces, agua o ambos. El tipo de medio utilizado depende del tamaño del dispositivo, los transformadores grandes se refrigeran con aceite, mientras que los más pequeños se refrigeran con aire. Un sistema

de aceite sumerge los componentes en aceite mineral y puede utilizar un radiador o tubos de refrigeración estrechos para acelerar la disipación[7].

- **Cambiadores de tomas:** Los cambiadores de tomas son componentes mecánicos que se utilizan en dispositivos con espiras adicionales en los devanados secundarios de alta tensión. Su función es ajustar el número de espiras y regular la tensión de salida al nivel deseado, que puede ser alto o bajo[7].
- **Conservador de aceite:** El conservador es una pequeña pieza cilíndrica ubicada sobre el tanque principal que actúa como depósito de aceite del transformador, proporcionando espacio para la expansión y contracción debido a los cambios de temperatura. También garantiza que el tanque esté siempre lleno y suele tener un respiradero conectado y un indicador de nivel montado en el que muestra el nivel de aceite[7].
- **Bujes:** Son componentes huecos de porcelana o resina epoxi que se ubican sobre el tanque principal, donde el dispositivo suministra la tensión de salida. Aíslan los terminales de alta energía que conectan el dispositivo a un sistema eléctrico externo desde el tanque conectado a tierra[7].
- **Manómetros de aceite, temperatura y presión:** Diversos medidores cumplen la función esencial de monitorear diferentes piezas y operaciones, estos ayudan a garantizar la seguridad y el funcionamiento, alertando a los operadores cuando las mediciones alcanzan niveles peligrosos. Uno de los más críticos es el termómetro, que monitorea la temperatura del aceite y los bobinados para evitar el sobrecalentamiento[7].
- **Relé Buchholz:** Este componente de seguridad activa el circuito de disparo durante una falla y se encuentra convenientemente ubicado en el conservador, este componente de seguridad es utilizado para transformadores refrigerados por aceite. Funcionan detectando fugas de aceite y otras señales de fallo, como un aumento del caudal de aceite y un calor excesivo, para cerrar los contactos y también reacciona a los gases generados por las fallas[7].

3.5 FALLAS DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Las fallas que existen en los transformadores de potencia son indicadores clave para anticipar eventos que podrían dejar el transformador fuera de servicio, para ello es fundamental monitorear las variaciones que existen en los parámetros durante las pruebas de mantenimiento que se realizan ya que una falla en estos activos tiene un impacto significativo, tanto por su alto costo económico como por su relevancia dentro de la red eléctrica.

3.5.1 Tipos de fallas en los transformadores de potencia

- **Fallas funcionales**

Las fallas funcionales ocurren cuando uno o varios de sus elementos no resisten a los esfuerzos térmicos, eléctricos o mecánicos presentes durante su funcionamiento normal o transitoria, lo que hace que el transformador pierda su propiedad de operar correctamente o ya no desempeñe su función establecida.

- **Fallas de aislamiento del aceite y del devanado**

Las fallas más frecuentes en los transformadores de potencia suelen ocurrir en el aislamiento del aceite y los devanados causados por su deterioro progresivo, este desgaste se puede originar por el paso del tiempo, el exceso de calor o sobrecargas eléctricas.

- **Fallas de sobrecarga**

Las fallas por sobrecarga se producen cuando el transformador funciona sobrepasando su capacidad nominal, estos activos están diseñados para funcionar dentro de ciertos límites de carga y sobrepasarlos puede generar daños irreversibles.

- **Fallas por sobrecalentamiento**

El sobrecalentamiento en transformadores de potencia surge cuando su temperatura supera los niveles de operación recomendados, si no se controla a tiempo el sobrecalentamiento puede ocasionar daños de gran importancia o incluso la falla total del activo.

3.5.2 Estadísticas de falla

Dado el sistema complejo que tienen los transformadores de potencia, las posibles fallas pueden tener diversos orígenes, los componentes donde suelen ocurrir fallas en un transformador incluyen: Intercambiador de tomas, vertido de aceite, devanados, núcleo, entre otros. La Figura 3.1 ilustra gráficamente las principales fallas funcionales en transformadores de potencia. Es importante diferenciar entre fallas finales y fallas reparables. Las fallas reparables permiten que el equipo continúe funcionando después de una intervención de mantenimiento, mientras que una falla final es aquella que inhabilita definitivamente la unidad, requiriendo su reemplazo o una reparación exhaustiva.

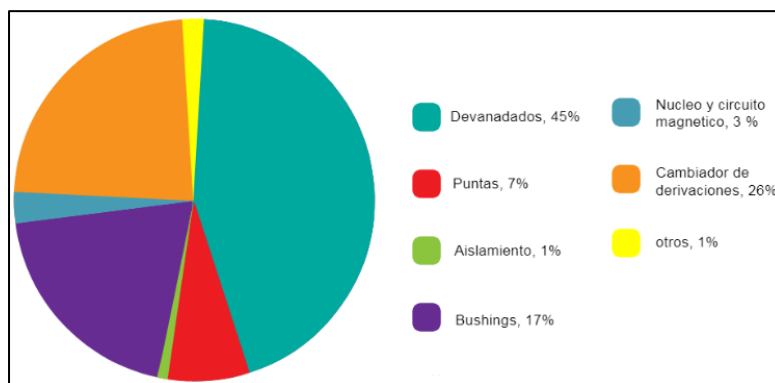


Figura 3.1 Principales fallas funcionales en transformadores de potencia [8]

3.5.3 Normas utilizadas para las pruebas de los transformadores de potencia

Humedad: El ensayo para determinar el contenido de humedad en el aceite se realiza bajo la norma ASTM D1533, este método de prueba es reconocido por su alto grado de sensibilidad con detecciones hasta de 10µg de agua.

Acidez: Para medir la acidez del aceite aislante del transformador se lo debe realizar con ensayos establecidos en la norma ASTM D974.

Rigidez dieléctrica: Se aplica la prueba bajo la norma ASTM D-1816, consiste en sumergir dos electrodos que están separados a 1 mm o 2 mm sobre una pequeña parte de aceite, a esta se le aplica una tensión que empieza desde el nivel más bajo de voltaje y que aumenta 0,5 kV/s hasta que falle el aceite aislante.

Factor de disipación: La energía que se disipa se mide en fracciones porcentuales, cuya prueba se la realiza mediante la norma ASTM D-924.

Análisis de gases disueltos: La prueba para determinar el DGA se analiza la norma ASTM D3612, en donde detalla que este test permite obtener la cantidad de gases específicos generados de un transformador de potencia.

Análisis de furanos: Se realiza mediante una cromatografía líquida de alta resolución siguiendo la norma ASTM D5837, identificando y cuantificando diferentes compuestos furánicos como el 2-furaldehído, 2-acetil furano y 5-metil-2-furfural.

3.6 LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa se estudió por primera vez a mediados de los años 60, en la Universidad de Berkeley (California), por el ingeniero Lotfy A. Zadeh para quien se dio cuenta de lo que él llamó el principio de incompatibilidad: A medida que aumenta la complejidad de un sistema, se reduce nuestra capacidad de ser precisos y de construir instrucciones acerca de su comportamiento, hasta llegar a un umbral más allá del cual la precisión y el significado son características excluyentes [9].

Así, se introduce el concepto de conjunto difuso en donde reside que los elementos en donde construimos nuestro pensamiento humano no son números sino etiquetas lingüísticas, en efecto, esta metodología permite demostrar el conocimiento a través de un lenguaje matemático que se parte de la teoría de los conjuntos difusos.

3.6.1 Conjuntos de inferencia difusa

La lógica difusa introduce el concepto de conjuntos difusos los cuales son sistemas que se basan en reglas de inferencia creadas por expertos, a diferencia de la lógica tradicional estos conjuntos trabajan con grados o funciones de pertenencia para evaluar las condiciones y así generar respuestas aproximadas. Estos conjuntos de inferencia combinan las reglas de inferencia con métodos de inferencia como el de Mamdani, transformando las variables numéricas en lingüísticas.

3.6.2 Funciones de pertenencia

Las funciones de pertenencia o también conocidas como funciones de membresía indican el grado en el que un elemento forma parte de un conjunto específico, estas funciones son una manera de representar conjuntos difusos y constan de tres partes:

- **Núcleo:** Es la zona donde el grado de pertenencia es total.
- **Soporte:** Es la región donde el grado de pertenencia es mayor que 0.
- **Límites:** Son las áreas donde el grado de pertenencia es mayor que 0 pero menor que 1.

Las funciones de membresía comúnmente utilizadas por su eficiencia lógica y su manejabilidad son las funciones: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal. Estas funciones se muestran en la Figura 3.2.

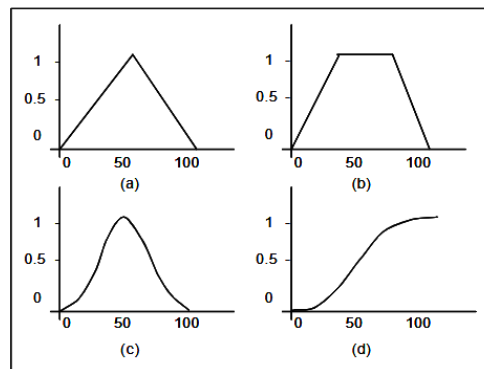


Figura 3.2 Funciones de membresía comúnmente utilizadas: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana y (d) sigmoideal

3.6.3 Sistema de inferencia difuso

Este sistema de inferencia difuso es un mecanismo que se basa en la teoría de los conjuntos difusos ya que puede procesar entre una o varias variables de entrada para obtener un resultado determinado. La figura 3.3 presenta el esquema de este sistema en donde se observan los pasos que hay que seguir para proceder a realizar el análisis.

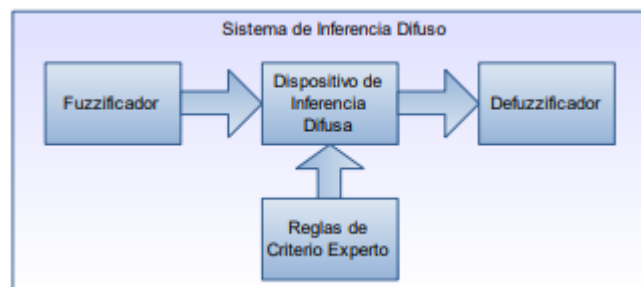


Figura 3.3 Sistema propuesto de inferencia difuso.

3.6.4 Fuzzificación y Defuzzificación

El proceso de Fuzzificación consiste en convertir datos reales numéricos en datos lingüísticos, en este proceso determina el grado de membresía de la entrada a los conjuntos difusos

asociados. Por otra parte, la Defuzzificación consiste realiza el proceso inverso, es decir, convierte un dato lingüístico en un valor numérico real.

3.6.5 Reglas de inferencia

Las reglas de inferencia o reglas de criterio experto forman el conjunto de estado de una o más variables de entrada, que se asocian con un conjunto difuso de salida, para ello se utilizan operadores lógicos como IF, OR y THEN. Estas reglas se construyen a partir de criterios difusos que serían difíciles de evaluar con valores precisos.

3.6.6 Dispositivo de inferencia difuso

Un dispositivo de inferencia difusa interpreta las reglas de criterio experto para generar una variable lingüística de salida basada en los valores actuales de las variables de entrada [10]. Los métodos más utilizados son los siguientes:

- **Mamdani:** Este método emplea reglas de inferencia de tipo IF - THEN (si - entonces) para evaluar entradas lingüísticas y producir respuestas también lingüísticas. La evaluación se realiza utilizando criterios de máximo (OR) y mínimo (AND), según los operadores lógicos presentes en las reglas criterio experto.
- **Sugeno:** Este método es diferente al anterior porque el resultado del análisis no es una marca de lenguaje, sino que es una función de las entradas. Este modelo es un modelo basado en reglas donde las entradas son variables lingüísticas y la salida se expresa como una función lineal de estas variables.

3.6.7 Métodos de Defuzzificación

La Defuzzificación constituye la fase final del proceso, encargada de transformar el resultado difuso obtenido de la inferencia en un valor numérico concreto.

Esta es una etapa esencial en los sistemas Mamdani, ya que la elección del método de Defuzzificación es crucial en el desarrollo de modelos difusos para diversas aplicaciones. Los métodos más comunes y utilizados se muestran a continuación:

- **Método del centroide:** Este método es el más consiste en determinar el centro de gravedad del polígono generado por el dispositivo de inferencia.

- **Método del biselector:** El siguiente método divide el polígono resultante en dos subregiones con áreas iguales.
- **Método del máximo, mínimo:** Este método muestran los valores de máximo y mínimo de los grados de pertenencia más altos del polígono resultante.

3.6.8 Fuzzy logic toolbox

Es una herramienta que posibilita al desarrollador crear programas de inferencia mediante el software de programación MatLab, el cual posibilita simular el funcionamiento de un controlador de carácter difuso.

Para poder utilizar esta herramienta, hay que escribir en la ventana de comandos de MATLAB la palabra fuzzy lo cual arroja como resultado la venta que se muestra en la Figura 3.4, esta es la interfaz gráfica del fuzzy logic toolbox.

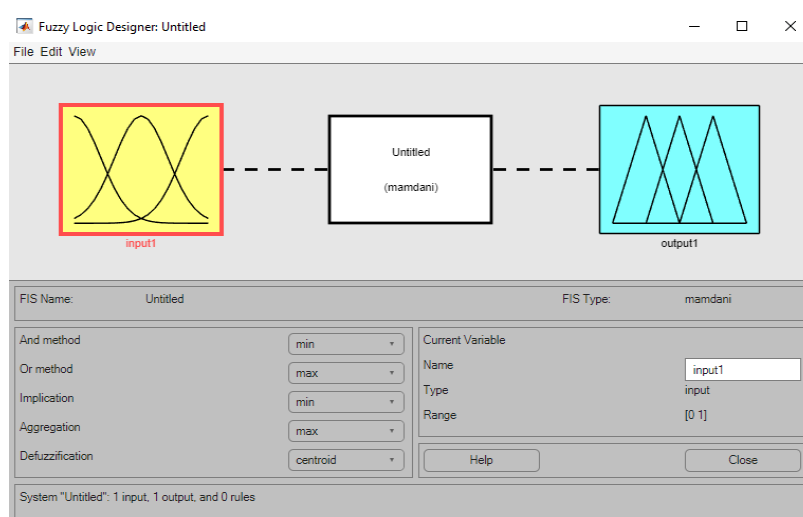


Figura 3.4 Interfaz gráfica de Fuzzy logic toolbox

3.7 SUMAS PONDERADAS

El método de las sumas ponderadas es una herramienta que facilita la toma de decisiones en diversos contextos, ya sea para elegir al mejor candidato para un empleo, seleccionar la inversión más apropiada o decidir un lugar para vacacionar. Este método ofrece un enfoque claro para evaluar y tomar decisiones mediante la combinación de criterios cualitativos y cuantitativos.

El propósito de este método es analizar de manera objetiva las fortalezas y debilidades de distintas opciones, facilitando una toma de decisiones sólidas. El método de las sumas

ponderadas surgió en los años 60, este método se ha aplicado ampliamente en campos como la valoración financiera, la dirección de proyectos y el diseño de productos ya que este método ofrece una toma de decisiones transparente y comprensible mediante la ponderación y evaluación de diversos factores.

Enfoque de las sumas ponderadas

El uso del método de las sumas ponderadas puede variar según el contexto en el cual es utilizado, cada uno con sus beneficios y particularidades una técnica frecuente es la ponderación igualitaria, en donde todos los criterios tienen el mismo peso. Otra alternativa es la ponderación subjetiva, que se basa en las preferencias personales de los expertos, lo que brinda adaptabilidad, pero también riesgos de parcialidad o falta de coherencia.

Sin embargo, el enfoque más recomendable suele ser la ponderación analítica, que establece los pesos mediante procesos estructurados, como el análisis estadístico o consultas a expertos, garantizando mayor rigor.

Este método es considerado como una herramienta valiosa para evaluar opciones y tomar decisiones estratégicas. Al asignar pesos específicos y calcular resultados ponderados, facilita elecciones más objetivas y fundamentadas y aunque existen distintas formas de aplicarlo, la ponderación analítica destaca por la precisión y fiabilidad en su desarrollo.

Tanto en gestión de proyectos, salud u otros ámbitos con decisiones multifactoriales, las sumas ponderadas ayudan a transformar la complejidad en soluciones claras y concisas.

Uso del método de las sumas ponderadas para la evaluación de proyectos

Este método permite a las organizaciones evaluar y jerarquizar proyectos de forma estratégica, considerando los diversos criterios para formular sus decisiones y optimizar el uso de los recursos. A continuación, se muestra el proceso para emplear las sumas ponderadas.

- **Entendimiento del método de la suma ponderada:**

Este método consiste en calcular la puntuación de cada alternativa mediante su multiplicación por distintas ponderaciones asociadas a los criterios. Algunos de los criterios que pueden utilizarse para la toma de decisiones son el coste, tiempo, complejidad, riesgo y alineación estrategia. Cada tipo de organización debe buscar la

calificación ponderada de sus proyectos mediante criterios.

- **Recopilación de datos relevantes:**

Para aplicar el método de las sumas ponderadas, se requiere el acceso a la información lo más fiable y completa posible para cada una de las variables a considerar. Los datos que se necesitan recolectar deben cumplir con todos los criterios importantes y ser de fuentes confiables.

- **Asignación de pesos:**

Después de que las organizaciones asignan pesos o ponderaciones, ellos calculan la puntuación ponderada que obtiene cada proyecto. Lo hacen multiplicando el valor de cada criterio por su peso. Luego, suman los resultados que obtienen de cada uno de los valores ponderados.

- **Puntuaciones ponderadas:**

Al momento de dar ponderaciones, las empresas pueden evaluar la puntuación de cada variable al multiplicar su criterio por la ponderación asignada.

Al utilizar el método de las sumas ponderadas para la evaluación de proyectos, las organizaciones pueden aportar claridad a su proceso y en la toma de decisiones. El uso de este método permite una evaluación integral de los proyectos ya que se basa en múltiples criterios, proporcionando una base cuantitativa para la priorización.

Ventajas y limitaciones

El método de las sumas ponderadas como cualquier método, tiene sus ventajas y limitaciones que es importante considerar. A continuación, exploraremos estos aspectos para comprender mejor el método.

Ventajas

- **Flexibilidad:** Permite dar múltiples pesos a cada variable de acuerdo a su relevancia, lo que permite ajustar el método a contextos específicos.
- **Transparencia:** Proporciona un proceso claro y justificable al asignar pesos específicos

a cada uno de los criterios, los decisores pueden explicar y defender sus elecciones ante las partes interesadas, lo que aumenta la confianza y la credibilidad del proceso.

Limitaciones

- **Subjetividad:** Depende de criterios subjetivos para dar pesos a las variables, diferentes expertos tienen su propia opinión sobre la relevancia de cada variable. Es crucial que la asignación de pesos se base en un análisis riguroso y consenso.
- **Falta de precisión:** No proporciona una medida precisa del rendimiento general de las alternativas al agregar los puntajes puede no reflejar correctamente las interacciones y compensaciones entre criterios. Es mejor complementar con un análisis de sensibilidad para ver lo rígidas que son las decisiones.
- **Incapacidad para relaciones no lineales:** Asume una relación lineal entre las puntuaciones y los pesos, lo que puede no reflejar situaciones reales donde los criterios tienen relaciones no lineales.

3.8 ÍNDICE DE SALUD

El índice de salud (HI) es un indicador que permite evaluar el estado de un transformador de potencia, clasificando dichas unidades de acuerdo con su riesgo de falla y prioridad de intervención con base en un valor numérico. Este valor se calcula a partir de los resultados más relevantes de una serie de pruebas de diagnóstico, inspecciones visuales y de campo. El número de parámetros considerados varía en la literatura técnica, en términos generales, usar un número mayor de variables ofrece valores más precisos del índice de salud [11] y [12].

La condición de salud es un índice que permite evaluar y representar de manera cuantitativa el estado general de un transformador de potencia. La condición de salud se puede determinar a través de un solo indicador, con la intención de determinar su condición operativa y anticipar la ocurrencia de fallos, este índice se obtiene a partir del análisis de parámetros y ensayos del propio transformador. Conocer el estado real del transformador es importante ya que permite llevar a cabo una planificación adecuada de la gestión de activos y con ello se busca determinar las unidades que requieren reparaciones, reemplazos o repotenciaciones, el tiempo estimado para realizar estas tareas, así también, como el mantenimiento y la toma de decisiones a tiempo [13].

Las pruebas que se realizan al aceite dieléctrico de transformadores de potencia generan datos que nos informan sobre las propiedades físico-químicas y las propiedades dieléctricas del aceite. Con esta información se logra determinar si hay ciertas fallas puntuales dentro del elemento, por ejemplo: descargas parciales, arcos, chispas, sobrecalentamiento.[14]

El índice de salud se determina típicamente mediante un sistema de puntuaciones y pesos concebidos para incorporar:

- Las condiciones operativas reales
- Hallazgos de inspecciones in situ
- Datos de análisis de laboratorio
- Entre otros factores relevantes

Aspectos clave del proceso

- **Subjetividad en la evaluación:** Los parámetros de entrada y sus valores asignados dependen directamente del marco metodológico establecido por cada investigador, esta variabilidad conceptual explica por qué equipos con condiciones técnicas similares pueden obtener diferentes valoraciones del índice de salud.
- **Integración de resultados:** Los datos iniciales se sintetizan mediante algoritmos específicos para generar un índice de salud consolidado, que refleja integralmente el estado del transformador.
- **Base normativa:** el cálculo requiere establecer umbrales de referencia estandarizados los cuales deben alinearse con: regulaciones técnicas vigentes, protocolos sectoriales reconocidos, especificaciones del fabricante para cada variable analizada.

3.8.1 Variables de entrada para el índice de salud

A continuación, se detallan las variables que se utilizan para determinar el índice de salud en los transformadores de potencia.

Rigidez dieléctrica

Esta prueba establece el voltaje en el que el aceite del TP se despoja completamente de sus características dieléctricas. El agua y las partículas de óxido, cuando se presentan en grandes cantidades, son contaminantes del aceite y causan una alteración en la capacidad dieléctrica del aceite [15]. En la tabla 3.1 se muestran los rangos admisibles de la rigidez dieléctrica en aceites aislantes nuevos y en operación de acuerdo a su voltaje, mientras que en la Figura A2 del anexo B se puede evidenciar su función de membresía.

Tabla 3.1 Valores aceptables de ruptura eléctrica tomados de [16]

Estado del aceite mineral	Voltaje de operación [kV]	BDV mínimo [kV]	
		1 mm	2 mm
Unidad nueva	≤ 69	25	45
	$>69 < 230$	30	52
Unidad en operación	≤ 69	23	40
	$>69 < 230$	28	47

Factor de disipación

La prueba que permite determinar las pérdidas dieléctricas en forma de calor que se producen en el líquido aislante cuando es sometido a un campo eléctrico alterno se denomina ensayo factor de disipación. Esta herramienta es necesaria para determinar la calidad del aceite, la presencia de elementos contaminantes y la presencia de material particulado o los materiales iónicos de la muestra. Los valores límite del factor de disipación para aceite nuevo se muestran en la tabla 3.2, la función de membresía creada para este parámetro se puede observar en la Figura A3 del anexo B.

Tabla 3.2 Valores límite del factor de disipación tomados de [16].

Tipo de test	(%) Factor de disipación máximo	
	<69 kV	69-230 kV
25°C	0,15	0,1
100°C	1,5	1

Humedad

La presencia de humedad en los transformadores es un fenómeno inevitable, concentrándose principalmente en el papel aislante debido a su mayor afinidad química con el agua en comparación con el aceite dieléctrico. Este comportamiento convierte al papel en un reservorio natural que captura y retiene la humedad dispersa en el fluido aislante.

La combinación de humedad y oxígeno representa un riesgo crítico para el sistema de aislamiento del transformador, ya que ambos factores degradan progresivamente la rigidez dieléctrica tanto del papel aislante como del aceite. Esta reducción en la capacidad de aislamiento puede comprometer la operación segura del equipo, por lo que el monitoreo y gestión precisa de los niveles de humedad interna se convierte en un requisito operacional esencial. La tabla 3.3 muestra los límites aceptables de humedad para los líquidos aislantes, la función de membresía creada para este parámetro se puede observar en la figura A4 del anexo B.

Tabla 3.3 Valores de los límites aceptables de humedad tomados de [17].

Estado del aceite mineral aislante	Voltaje de funcionamiento [kV]	Contenido de humedad máxima (mg/kg)
Unidad nueva	≤ 69	20
	$> 69 < 230$	10
En servicio	≤ 69	35
	$> 69 < 230$	25

Acidez

El grado de acidez muestra el deterioro ácido en el aceite mineral, mientras mayor es el número de acidez, más ácido es el aceite. Para nuevos equipos, el aceite contiene pequeñas cantidades de componentes ácidos y a medida que el líquido aislante se deteriora, el número de ácido va en aumento, la acidez es producida por la oxidación del aislante y del aceite mientras este envejece. Los niveles aceptables de ácido en aceites minerales se muestran en la tabla 3.4, la función de membresía creada para este parámetro se muestra en la figura A5 del anexo B.

Tabla 3.4 Valores de acidez aceptable en aceites minerales tomados de [17].

Estado del aceite mineral aislante	Voltaje de funcionamiento [kV]	Índice máximo de acidez [mg KOH/g]
Unidad nueva	-	0,015
En servicio	≤ 69	0,2
	$> 69 < 230$	0,15

Análisis de gases disueltos

Para realizar este estudio, se extrae una muestra del aceite aislante del transformador, la cual se envía a un laboratorio especializado. Allí, se analiza la concentración de gases disueltos en el fluido mediante técnicas de cromatografía de gases, que permiten identificar y cuantificar los diferentes componentes presentes. La composición de los gases es una herramienta de utilidad para caracterizar el tipo de falla interno, mediante diversas técnicas de análisis las cuales pueden ser: las relaciones de Rogers, triángulo de Duval, gases clave [15].

El estado del aceite indica la salud del transformador y los resultados pueden ser analizados individual y globalmente, según los estándares de la IEC y IEEE [18]. Para saber si un transformador está funcionando en condiciones normales, sería complicado si no se tiene el análisis realizado a la muestra. En la tabla 3.5, se muestra las cuatro categorías que describen la guía creada por la IEEE, las mismas que dependen de los gases individuales y la concentración total de gases. Las 4 condiciones se definen a continuación:

- **Condición 1:** El transformador trabaja de forma satisfactoria.
- **Condición 2:** El transformador presenta una concentración de gases que excede el valor normal.
- **Condición 3:** El transformador presenta un alto nivel de deterioro elevado.
- **Condición 4:** El transformador tiene un nivel excesivo de descomposición, si la unidad sigue operando puede resultar en falla.

La función de membresía creada para este parámetro se muestra en la Figura A6 del anexo B.

Tabla 3.5 Valores de los gases totales en el aceite en (ppm) tomados de [19].

Estado	TDCG
Condición 1	<300
Condición 2	300-560
Condición 3	560-1250
Condición 4	>1250

Análisis de furanos

El contenido de furanos es obtenido a través de las pruebas que se realizan en el aceite del transformador el 2-furfuraldehído es el componente más importante de este análisis. El estudio de furanos es una herramienta valiosa para estimar la vida útil remanente de un transformador de potencia. El contenido de 2-furaldehido (2-FAL) en los aceites de un transformador, es uno de los parámetros más importantes en el diagnóstico de su estado de salud porque permite evaluar la salud del aislamiento del papel. El 2-FAL representa del 95% al 98% de la cantidad total de furanos en el aceite [20]. Se ha determinado, a partir de estudios, que existe una relación inversa de proporcionalidad entre su contenido de furanos y su grado de polimerización, por lo que se puede ver que la presencia de furanos no es un indicativo real del estado de descomposición del papel. Para superar esta limitación, una solución práctica consiste en utilizar el grado de polimerización equivalente en lugar de basarse exclusivamente en los niveles de furanos. Este enfoque proporciona una evaluación precisa de la resistencia mecánica real del aislamiento interno del transformador de potencia. La función de membresía creada para el grado de polimerización se puede observar en la Figura A7 del anexo B.

En el caso de no disponer el dato del grado de polimerización de los transformadores de potencia se puede emplear la ecuación de Chendong (1), si se tiene el valor del contenido de furanos.

$$DP = \frac{1,51 - \log_{10}(2FAL)}{0,0035} \quad (1)$$

Donde:

DP= Grado de polimerización del papel aislante

2FAL= contenido de furanos del aceite [ppm]

En el sistema de inferencia propuesto el índice de salud, trabaja con 5 rangos para sus entradas: bueno, moderado-bajo, moderado-alto, malo y muy malo. De acuerdo a la entrada, se seleccionan entre de 3 a 5 intervalos. El índice de salud se evalúa de acuerdo a 5 posibles estados, los cuales son: muy bueno, bueno, aceptable, malo y muy malo. En la Figura A1 del anexo B se puede observar la función de membresía creada a partir de los mismos.

Las funciones de membresía tanto para la salida, que representa el índice de salud, como para las entradas: rigidez dieléctrica, factor de disipación, humedad en el aceite, acidez, contenido total de gases y grado de polimerización, han sido extraídas directamente de los sistemas de inferencia difusa propuestos en. [13] y [15].

3.9 FACTOR DE CONSECUENCIA

La consecuencia a la falla de un transformador de potencia expresa su efecto sobre la calidad del suministro eléctrico, así como sobre la seguridad del entorno en el que opera. El análisis de las consecuencias de una falla puede ser realizado desde diferentes dimensiones, la seguridad del equipo, la seguridad del personal, el medio ambiente o el efecto sobre la empresa, la producción, el retraso en los objetivos, y así sucesivamente. Es importante mencionar que este ítem varía en cada unidad.

La evaluación del impacto por indisponibilidad de un transformador de potencia se fundamenta en indicadores que miden su efecto sobre la calidad del suministro eléctrico y la seguridad del entorno en el que se encuentra. En este estudio, se utiliza indistintamente el término factor de consecuencia por indisponibilidad de un activo. Aunque los efectos de un acontecimiento suelen cuantificarse económicamente, esto no siempre es factible debido a la naturaleza cualitativa de ciertos parámetros involucrados. Por ello, es necesario desarrollar modelos de integración que permitan expresar las consecuencias de manera objetiva y medible.

El factor de consecuencia se evalúa de acuerdo a 5 posibles niveles de impacto, los cuales son: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto. En la Figura A8 del anexo B se puede observar la función de membresía creada a partir de los mismos.

3.9.1 Variables de entrada para el factor de consecuencia

Sobrecarga a otros equipos

Este indicador evalúa el impacto de la indisponibilidad del transformador de potencia en la red, particularmente si otro componente de la red necesita operar por encima de su capacidad para compensar su falta. Los criterios relacionados con la sobrecarga de equipos se detallan en la Tabla 3.6 y su función de pertenencia se muestra en la Figura A9 del anexo B.

Tabla 3.6 Nivel de sobrecarga a otros equipos

Nivel de impacto	Representación
Muy Bajo	No sobrecarga a otros equipos
Bajo	Ocasionalmente sobrecarga a otros equipos
Medio	Sobrecarga a otros equipos
Alto	Sobrecarga a otros equipos y produce su desconexión
Muy Alto	Produce desconexión de equipos en cadena e inestabilidad en la red

Potencia desconectada

Este parámetro alude a la potencia promedio que proporciona el activo y que tiene que ser admitida por otros activos y representa la energía que no se suministra a la carga. Es importante destacar que la potencia desconectada no es lo mismo que la potencia instalada; la primera se refiere a la carga promedio que demanda el transformador, mientras que la segunda corresponde al valor nominal indicado en la placa. Las escalas relacionadas se presentan en la Tabla 3.7 y su función de pertenencia se muestra en la Figura A10 del anexo B.

Tabla 3.7 Nivel de potencia desconectada

Grado de impacto	Descripción
Muy Bajo	Menos de 5 [MW]
Bajo	De 5 a 10 [MW]
Medio	De 10 a 30 [MW]
Alto	De 30 a 60 [MW]
Muy Alto	Más de 60 [MW]

Cargas sensibles

Este parámetro alude a la presencia de cargas sensibles, los cuales pueden ser: hospitales, fábricas de producción continua o aeropuertos, ubicados cerca de la unidad de transformación. En la Tabla 3.8 se muestra el rango utilizado para evaluar el impacto y su función de pertenencia se muestra en la Figura A11 del anexo B.

Tabla 3.8 Nivel de cargas sensibles

Grado de impacto	Descripción
Bajo	No existen cargas sensibles
Medio	Existe al menos una carga sensible
Alto	Existen cargas muy sensibles

Volumen del aceite

En el caso de un evento catastrófico que ocurra en un transformador de potencia, el evento más grave que puede ocurrir es una explosión de la unidad seguida de un incendio. El aceite aislante puede contribuir a hacer más grandes las llamas o derramarse en el suelo. El potencial contaminante del aceite en un transformador de potencia hace que sea su mayor riesgo ecológico. Para determinar el impacto del volumen de aceite se utiliza la escala que se detalla en la Tabla 3.9 y su función de pertenencia se muestra en la Figura A12 del anexo B.

Tabla 3.9 Nivel del volumen de aceite

Grado de impacto	Descripción
Bajo	Menos de 10.000 litros
Medio	De 10.000 a 30.000 litros
Alto	Más de 30.000 litros

Proximidad de construcciones

Este parámetro toma en cuenta la presencia de construcciones civiles cercanas a la estación de transformación, las cuales podrían verse afectadas si ocurre alguna falla que pueda provocar un incendio en la unidad o una explosión. La medida que se utiliza para mostrar la distancia es en metros y se detalla en la Tabla 3.10 y su función de pertenencia se muestra en la Figura A13 del anexo B.

Tabla 3.10 Nivel de proximidad a otras construcciones

Grado de impacto	Descripción
Muy Bajo	> 500 [m]
Bajo	300 - 500 [m]
Medio	200 - 300 [m]
Alto	100 - 200 [m]
Muy Alto	< 100 [m]

Penalizaciones

Los castigos por la indisponibilidad de una unidad se ajustan al nivel de su potencia. Para calcular el impacto de la unidad se tomará su potencia nominal de acuerdo con la métrica indicada en la tabla 3.11 y su función de pertenencia se muestra en la Figura A14 del anexo B.

Tabla 3.11 Nivel de penalizaciones

Grado de impacto	Descripción
Bajo	< 30 [MVA]
Medio	31 - 40 [MVA]
Alto	41 - 60 [MVA]
Muy Alto	> 60 [MVA]

3.10 EL ÍNDICE DE RIESGO

Este índice es un parámetro clave en la toma de buenas decisiones que se relacionan con un activo, este índice se calcula a partir de los parámetros de operación asociados a un activo de potencia, lo que permite determinar el estado en que se encuentra con un alto grado de precisión.

La determinación del índice de riesgo combina el análisis de datos obtenidos mediante monitoreo continuo o evaluaciones periódicas, con el conocimiento experto y criterios basados en la experiencia en la gestión de activos. Esta integración facilita una evaluación integral del activo, considerando tanto su condición actual como los posibles escenarios futuros derivados de su operación.

El nivel de riesgo cambia en general, la probabilidad de falla de un transformador se ve incrementada con el paso del tiempo, otra de las consecuencias de falla es la diferencia que se presenta con los cambios que pueden suceder en el entorno en el cual opera el activo [21].

La gestión de los transformadores de potencia se puede realizar poniendo prioridad en las unidades que tengan un nivel de riesgo alto, esta clasificación permite una gestión óptima de los recursos, brindando una manera adecuada para crear acciones de mantenimiento y reparación.

Plano del riesgo

Por lo general, el riesgo se representa en un plano que tiene como ejes a la probabilidad de falla y al factor de consecuencia. En la Figura 3.5 se presentan los distintos campos con estados de riesgo bajo, riesgo medio y riesgo alto, en la Figura 3.5 (a) se muestra la matriz en la que los ejes de factor de consecuencia y probabilidad de falla se valoran de forma cuantitativa, por otra parte, la Figura 3.5 (b) los valora mediante variables lingüísticas. Conforme a los tipos de problema que se pueden enfrentar, existen diferentes tipos de matrices. En cada caso, esto afectará en cómo será el resultado final de su uso. De acuerdo a la matriz (b) se recomienda tener entre tres y cinco niveles para tener una mejor estimación y que además sea confiable e intuitiva a las severidades. No es conveniente utilizar más niveles porque resulta complicado diferenciarlos lingüísticamente.

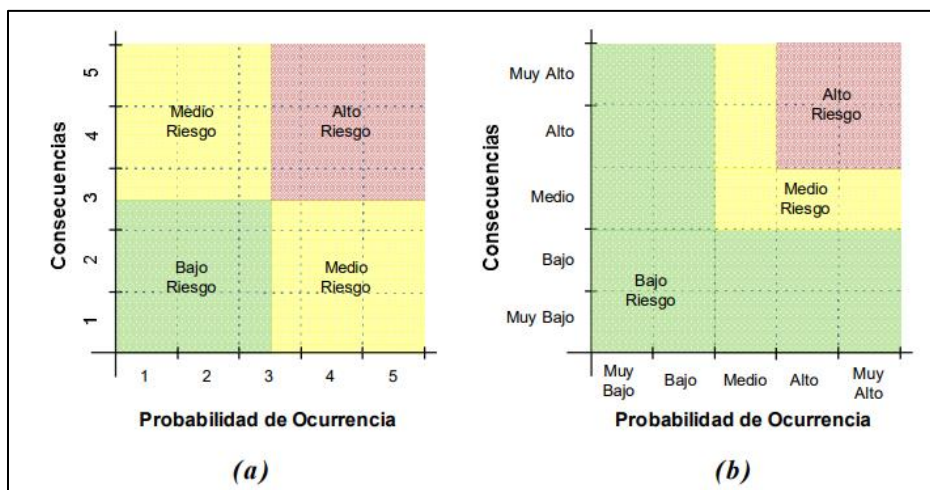


Figura 3.5 Plano de la probabilidad de falla vs el factor de consecuencia

Acciones de remplazo y mantenimiento en base al índice de riesgo

El índice de riesgo se debe evaluar mediante los parámetros del indicador de condición y criticidad de los equipos para realizar acciones de reemplazo y mantenimiento un transformador de potencia [22]. Para analizar estos parámetros se puede utilizar la siguiente información:

- Pruebas que se obtienen del sistema de monitoreo, como: la temperatura en el interior del transformador, la carga, el contenido de los gases disueltos presentes en el líquido, la condición en la que se encuentra el aceite y el análisis de furanos.
- Pruebas de rutina que requieren la desconexión del activo por un periodo corto de tiempo, estas pruebas incluyen las pruebas eléctricas y dieléctricas.
- Mediciones y pruebas de origen complejo que para su obtención requieren una desconexión prolongada de la unidad, como: la obtención de muestras del papel aislante y la medición visual de la deformación del núcleo.

Etapas del sistema de gestión de riesgos en transformadores de potencia

Se destaca que el índice de riesgo será un parámetro clave para priorizar el mantenimiento, en relación a categorizar, en orden de importancia en base al riesgo, los transformadores que requieran acciones correctivas, determinando de tal forma la asignación más efectiva y eficiente de los recursos. Las etapas que conforman un sistema de Gestión de Riesgos para abordar el cálculo o estimación del índice de riesgo de un transformador son las siguientes:

- Identificación de los riesgos.
- Analizar y determinar los distintos escenarios de riesgos.
- Evaluar las consecuencias de los escenarios de riesgos determinados. En esta etapa se requiere de experiencia acumulada y de conocimiento experto.
- Clasificar y priorizar los riesgos.
- Priorizar el Mantenimiento de cada transformador.

Se debe resaltar que, para proceder a la identificación de los riesgos asociados a un transformador, se requiere de una investigación y obtención de datos previos, como la información de entrada y del estado de la condición del mismo.

El índice de riesgo se evalúa de acuerdo a 5 posibles niveles, los cuales son: bajo, moderado, alto y crítico. En la Figura A15 del anexo B se puede observar la función de membresía creada a partir de los mismos.

3.11 ERROR PROMEDIO

El error promedio constituye un indicador estadístico fundamental que cuantifica la discrepancia promedio entre valores observados (reales) y sus respectivas estimaciones o predicciones. Esta métrica es ampliamente reconocida en el ámbito científico y técnico como una herramienta esencial para:

1. **Evaluación de modelos:** Permite determinar la precisión de algoritmos predictivos en campos como machine learning, ingeniería y ciencias aplicadas.
2. **Validación metodológica:** Facilita la comparación objetiva entre diferentes enfoques analíticos o sistemas de medición.
3. **Control de calidad:** Proporciona una medida cuantitativa de la exactitud en procesos industriales y experimentales.

Para realizar este cálculo se utiliza la ecuación (1) descrita a continuación:

$$Error\ promedio = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |V_{real,i} - V_{estimado,i}| \quad (1)$$

En donde:

n: Número total de observaciones

Valor real: Valor teórico o de referencia.

Valor estimado: Valor obtenido mediante un modelo.

| |: Valor absoluto

La ecuación (2) se utiliza para calcular el error absoluto.

$$\text{Error absoluto} = |V_{\text{real}, i} - V_{\text{estimado}, i}| \quad (2)$$

En donde:

Valor real: Valor teórico o de referencia.

Valor estimado: Valor obtenido mediante un modelo.

| |: Valor absoluto

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

4.1 VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

Los datos de las pruebas realizadas y parámetros para el factor de consecuencia fueron tomados de los transformadores utilizados como ejemplo práctico en el Diplomado modular: Gestión de activos del sector eléctrico, apoyada con tecnologías 4.0 y herramientas de inteligencia computacional.

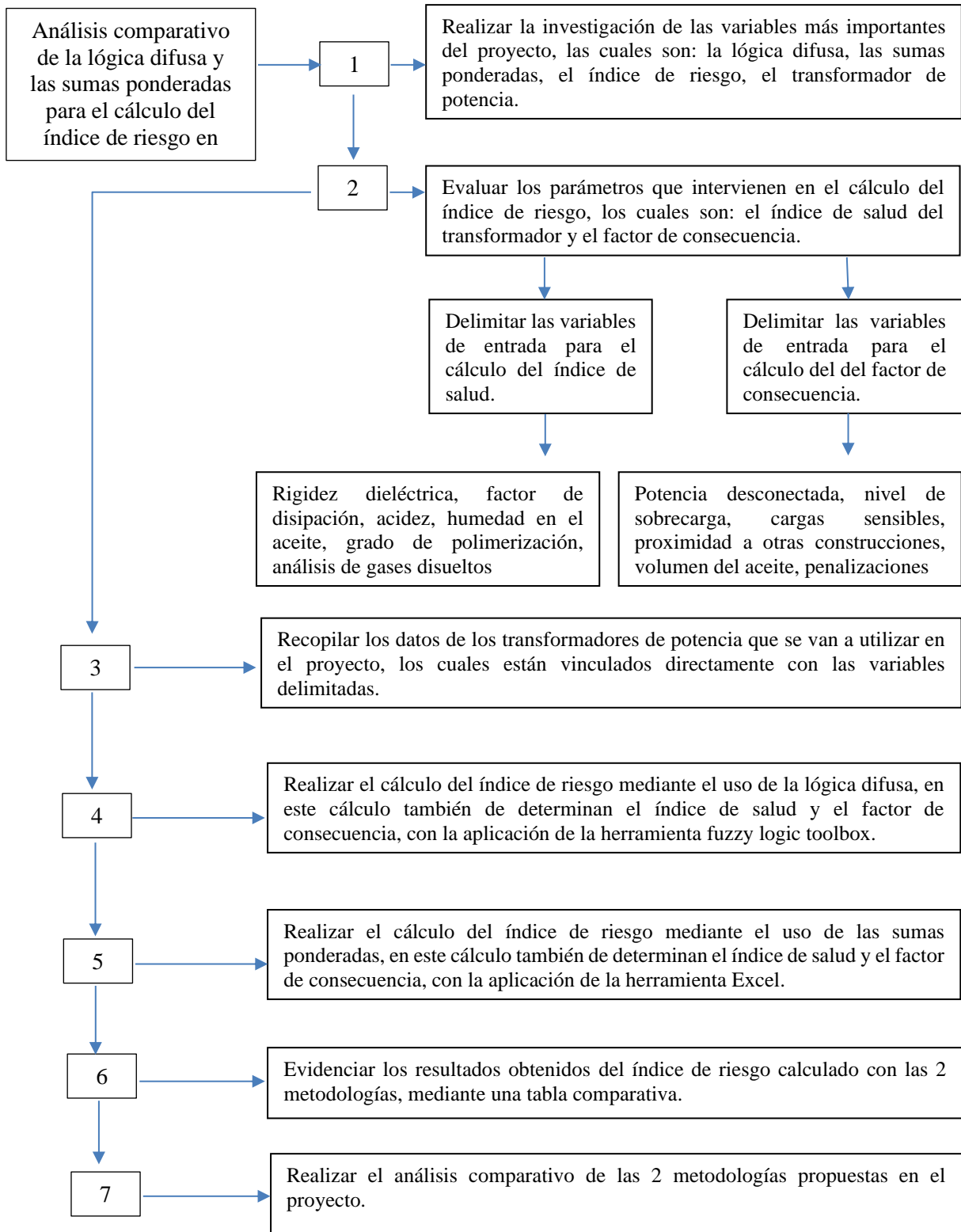
4.1.1 VARIABLES INDEPENDIENTES

Metodología de la lógica difusa, metodología de las sumas ponderadas.

4.1.2 VARIABLES INDEPENDIENTES

Datos de las pruebas realizadas a los transformadores de potencia como: la rigidez dieléctrica, el contenido de humedad en el aceite, la acidez, el factor de disipación, el análisis de gases disueltos, el grado de polimerización y los indicadores de consecuencia a la falla como: la sobrecarga a otros equipos, la potencia desconectada, las cargas sensibles, el volumen de aceite, la proximidad a otras construcciones y las penalizaciones.

4.2 DIAGRAMA DE FLUJO



4.3 DATOS DE ENTRADA

Los datos de la placa obtenidos de los transformadores de potencia utilizados en el proyecto, se muestran en la tabla 4.1, los transformadores mencionados operan en una sola subestación transformadora que es abastecida principalmente por 3 líneas, 2 de 220 kV y una de 132 kV.

Tabla 4.1 Datos de entrada de los transformadores de potencia en estudio

Datos de placa				
Indicador	TP1	TP2	TP3	TP4
Año de instalación	1969	1994	1963	1984
Potencia	30 MVA	30 MVA	15 MVA	30 MVA
Conexión	Delta/Estrella	Delta/Estrella	Delta/Estrella	Delta/Estrella
Tensión	132 / 34,5 / 13,8 kV	132 / 34,5 / 13,8 kV	132 / 34,5 / 13,8 kV	132 / 34,5 / 13,8 kV

La tabla 4.2 muestra las variables a utilizar para el cálculo del índice de salud, estas variables se utilizan porque son indicadores clave que reflejan de manera integral el estado del aceite y el aislamiento, la humedad y la acidez en el aceite muestran la degradación y contaminación, la rigidez dieléctrica y el factor de disipación miden la capacidad aislante, los gases disueltos detectan los fallos incipientes y el grado de polimerización evalúa el envejecimiento del papel aislante.

Tabla 4.2 Variables utilizadas para el cálculo del índice de salud

Variables	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4
Humedad en el aceite [ppm]	21	7	22	13
Acidez [mgKOH/g]	0,09	0,04	0,15	0,20
Rigidez dieléctrica [kV]	29	56	52	42
Factor de disipación [%]	0,027	0,019	0,033	0,072
TDGA [ppm]	492	561	203	663
DP [ppm]	323,30	532,69	273,69	340,65

La tabla 4.3 muestra las variables de entrada utilizadas para el cálculo del factor de consecuencia, estas variables se utilizan porque estos indicadores muestran el nivel de impacto que pueden generar las fallas en el ambiente que opera la subestación de transformación.

Tabla 4.3 Variables utilizadas para el cálculo del factor de consecuencia

VARIABLES	TP1	TP2	TP3	TP4
Nivel de sobrecarga de equipos	Sobrecarga a otros equipos y produce su desconexión	Sobrecarga a otros equipos y produce su desconexión	Ocasionalmente sobrecarga a otros equipos	Sobrecarga a otros equipos y produce su desconexión
Potencia desconectada [MVA]	20,89	15,59	7,69	16,65
Cargas sensibles	Existen cargas muy sensibles	Existen cargas muy sensibles	Existen cargas muy sensibles	Existen cargas muy sensibles
Volumen de aceite [lt]	16800	17450	9800	12169,3
Proximidad de otras construcciones [m]	140	97	97	140
Penalizaciones [MVA]	30	30	15	30

4.4 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO CON LÓGICA DIFUSA

A partir de un ejercicio de aplicación práctico, se presenta la metodología para evaluar y calcular el índice de riesgo en transformadores de potencia que es uno de los enfoques de este trabajo. Su desarrollo surgió después de realizar una investigación profunda para generar un sistema de inferencia difusa basado en criterio experto para obtener el índice de riesgo. La metodología se basa en información comercial y geográfica sobre las unidades, así como en los ensayos aplicados a cada unidad. Esta información, una vez validada, debe ser almacenada, ya que el riesgo puede variar en el tiempo.

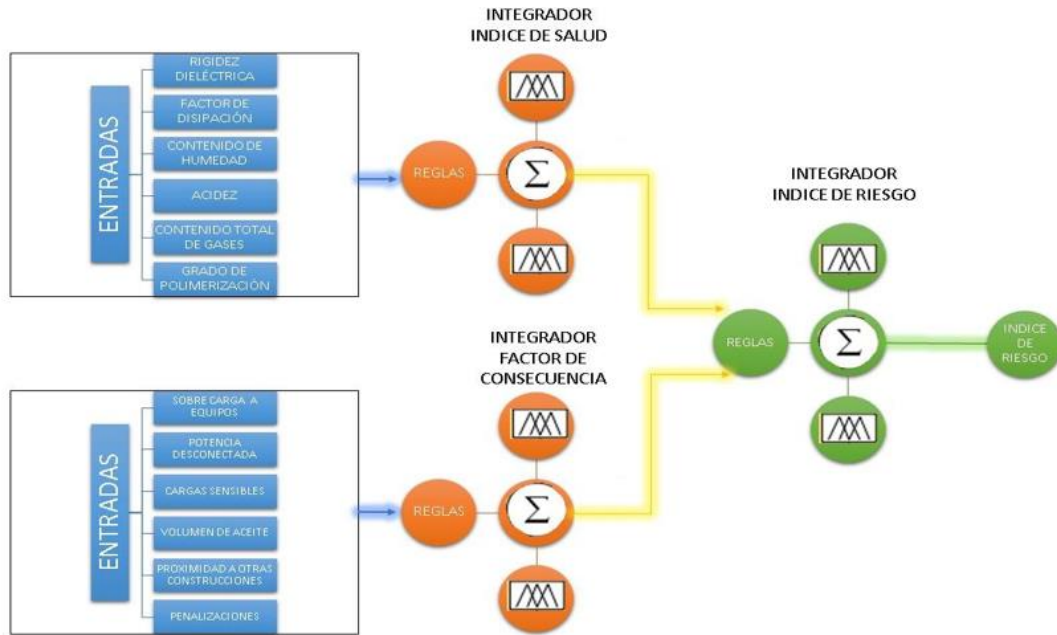


Figura 4.1 Diagrama del sistema de inferencia difusa para el cálculo del índice de riesgo en transformadores de potencia.

En la Figura 4.1 se presenta un diagrama para realizar el cálculo del índice de riesgo con los sub cálculos del índice de salud y el factor de consecuencia. Para el método de la lógica difusa se utilizan seis criterios de entrada para cada uno de los sub índices antes mencionados.

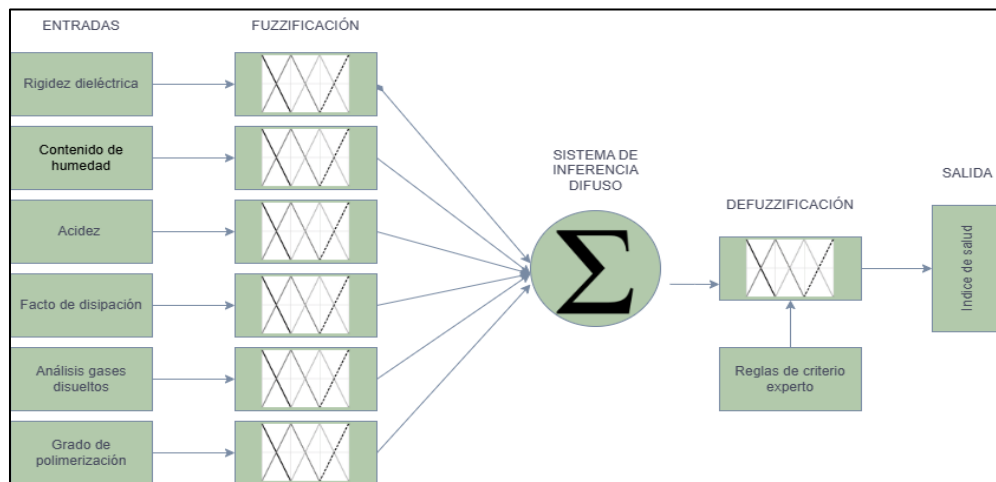


Figura 4.2 Esquema del sistema de inferencia difusa para el cálculo del índice de salud

En la Figura 4.2 se presenta el sistema de inferencia difusa propuesto para calcular el índice de salud de los transformadores de potencia, en este sistema se utilizan los siguientes criterios: la rigidez dieléctrica del aceite aislante (que refleja su capacidad para resistir esfuerzos eléctricos sin perforarse, donde valores bajos indican contaminación o degradación), el contenido de humedad (que no solo reduce la rigidez dieléctrica sino que acelera la hidrólisis del

aislamiento), la acidez del aceite (indicador crítico de oxidación y degradación térmica que corroe los materiales aislantes), el factor de disipación (que cuantifica pérdidas dieléctricas y señala contaminación o deterioro), el análisis de gases disueltos (para detectar fallos incipientes como descargas o sobrecalentamientos) y el grado de polimerización (que determina la degradación mecánica del papel aislante). Los criterios descritos permiten evaluar el estado eléctrico, térmico, mecánico y químico del transformador de potencia proporcionando una valoración integral de su condición operativa.

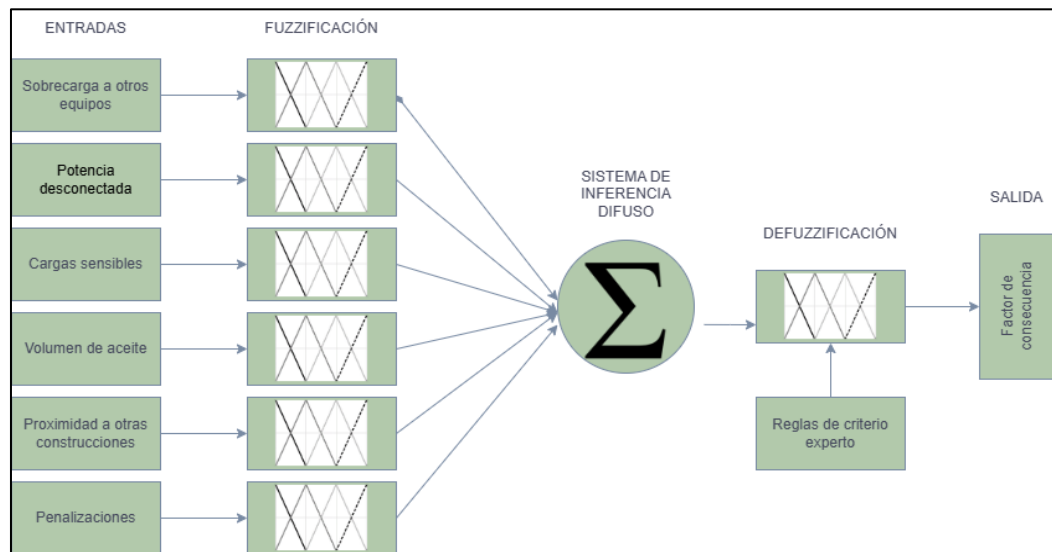


Figura 4.3 Esquema del sistema de inferencia difusa para el cálculo del factor de consecuencia

En la Figura 4.3 se presenta el sistema de inferencia difusa propuesto para calcular el factor de consecuencia, en este sistema se utilizan los siguientes criterios: como la sobrecarga a otros equipos (que evalúa el riesgo de fallos en cascada), la potencia desconectada (que cuantifica el impacto por MVA no suministrados), las cargas sensibles (como hospitales o centros de datos, cuyo corte genera graves perjuicios), el volumen del aceite (donde mayores cantidades implican mayor riesgo ambiental e incendio), la proximidad a construcciones (que aumenta el peligro de daños colaterales) y las penalizaciones normativas (multas por derrames o incumplimientos) estos criterios permiten evaluar el impacto operativo, económico y de seguridad que tendría un posible fallo en el transformador.

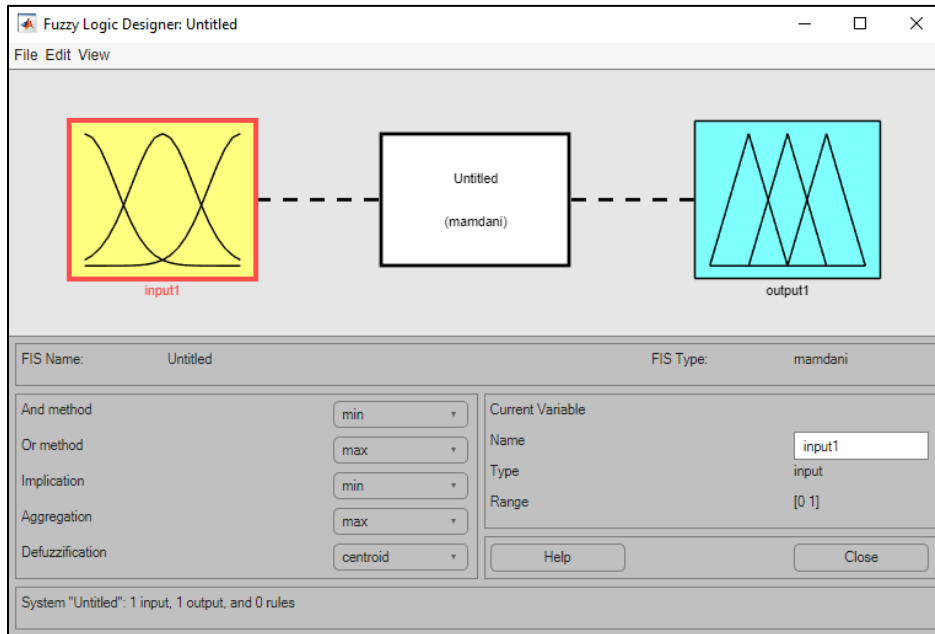


Figura 4.4 Interfaz visual de fuzzy logic toolbox

El desarrollo del sistema de inferencia difusa se implementará mediante el Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB, herramienta que permite la integración sistematizada de los indicadores de entrada correspondientes al índice de salud y factor de consecuencia. Para inicializar el entorno de desarrollo, se debe ejecutar el comando fuzzy en la sección Command Window, lo que genera la interfaz gráfica mostrada en la Figura 4.4.

En esta interfaz hay que configurar las variables de entrada y salida que se utilizan para el proceso de evaluación y simulación del índice de salud, el factor de consecuencia y el índice de riesgo, estas variables fueron evaluadas en las secciones 3.8, 3.9 y 3.10 respectivamente.

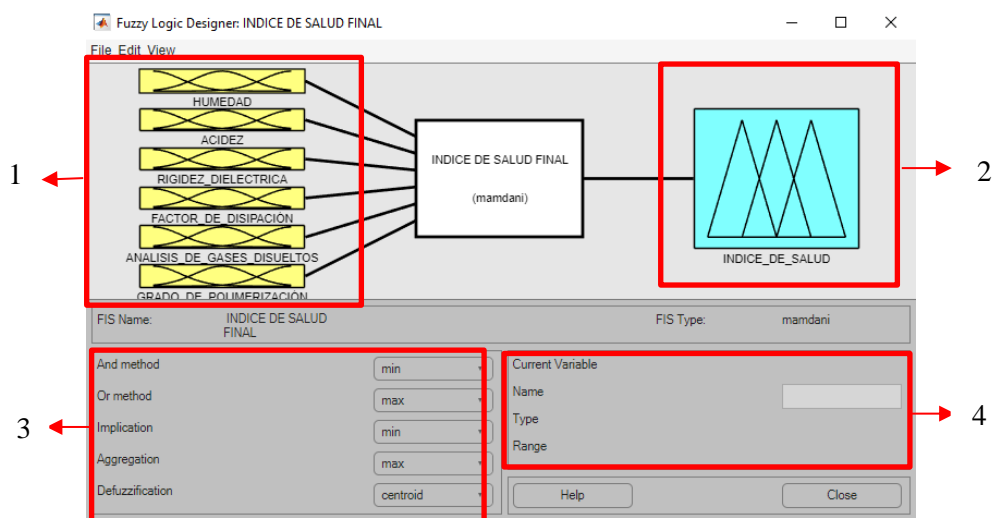


Figura 4.5 Interfaz del sistema de inferencia, ingresado las entradas y salida del índice de salud

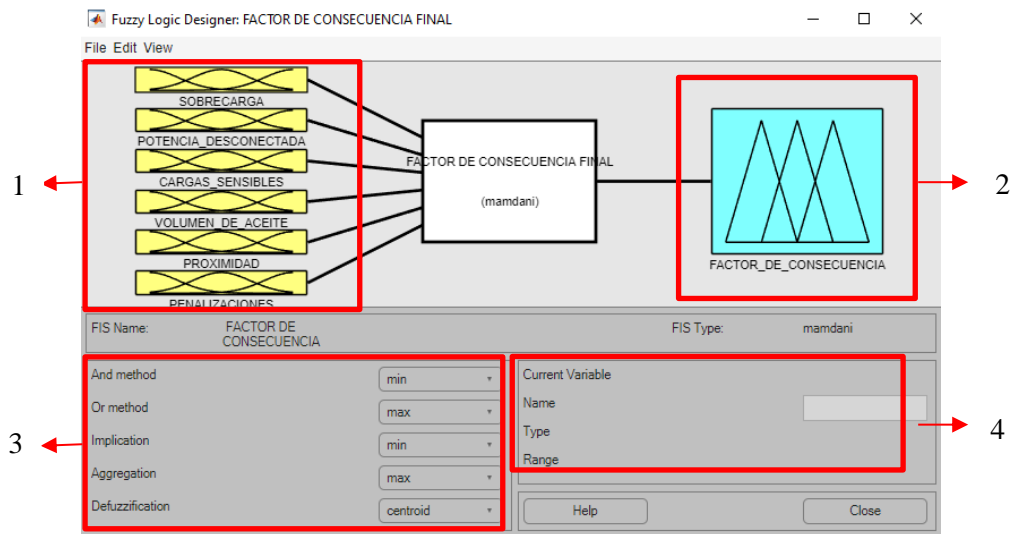


Figura 4.6 Interfaz del sistema de inferencia, ingresado las entradas y salida del factor de consecuencia

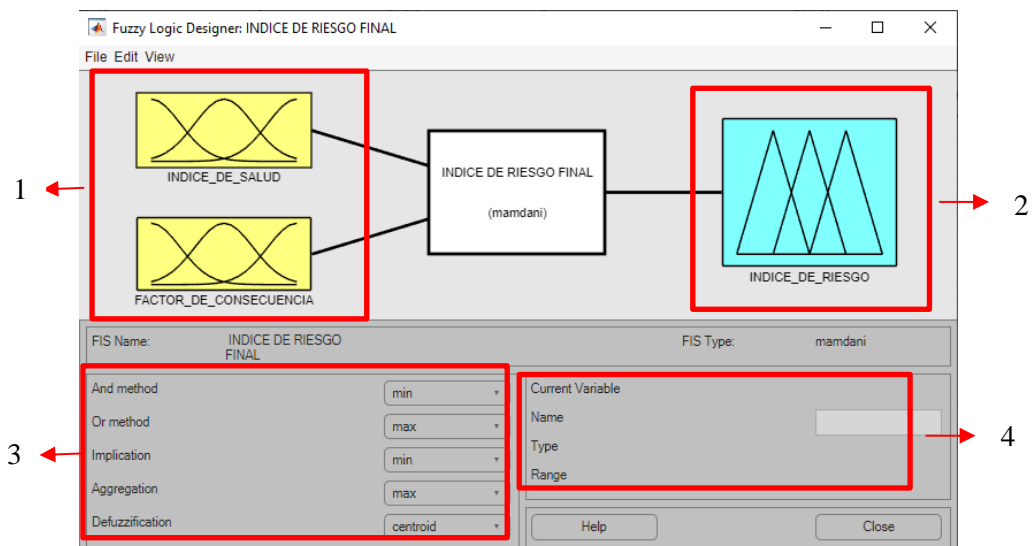


Figura 4.7 Interfaz del sistema de inferencia, ingresado las entradas y salida del índice de riesgo

Para configurar las variables de entrada y salida del sistema de inferencia difusa, se debe acceder al módulo Edit de la interfaz de desarrollo y seleccionar la opción Add Variable. En este proceso, se definen las seis variables de entrada correspondientes a los indicadores de salud, factor de consecuencia e índice de riesgo, junto con sus respectivas variables de salida, las cuales se integran de manera individual en cada uno de los sistemas de inferencia difusa asociados, las Figuras 4.5, 4.6, y 4.7 muestran los sistemas con sus respectivas variables configuradas.

En la sección 1 de estas figuras se muestran las variables de entrada creadas para el sistema, en la sección 2 muestra las variables de salida, en la sección 3 se configura el método lógico con el cual va a trabajar el sistema, así como el método de defuzzificación que va a utilizar, por

último, en la sección 4 se ingresa el nombre de la variable y se selecciona el tipo de función de membresía que va a utilizar.

Tras definir las variables de entrada y salida del sistema de inferencia difusa, se procede a configurar los operadores lógicos difusos para cada etapa del proceso de inferencia (ver Figura 4.8). Esta selección determina los operadores que regirán la agregación de antecedentes en las reglas difusas, la elección de estos operadores afecta directamente la propagación de los grados de pertenencia, influyendo en la robustez, linealidad y sensibilidad del sistema, esta configuración es crítica para balancear precisión y generalización en la superficie de control resultante, según los requerimientos de la aplicación.

And method	min
Or method	max
Implication	min
Aggregation	max
Defuzzification	centroid

Figura 4.8 Selección de operadores lógicos

Tras configurar los operadores lógicos, se procede a implementar las funciones de pertenencia (MFs) seleccionando cualquier bloque de entrada previamente creado, lo que despliega la interfaz de configuración que se muestra en la Figura 4.9. Para sustituir las MFs por defecto, se accede a Edit > Remove all MFs y se agregan MFs personalizadas mediante Add custom MF, definiendo: el nombre de la variable lingüística, el tipo de función y los parámetros de rango y soporte asegurando la normalización y un solapamiento adecuado entre conjuntos adyacentes.

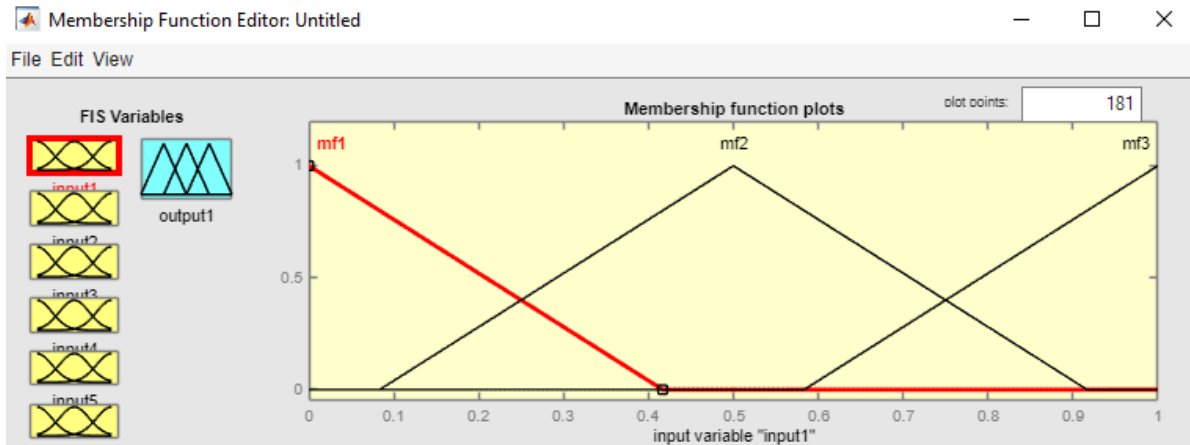


Figura 4.9 Funciones de membresía creadas por defecto

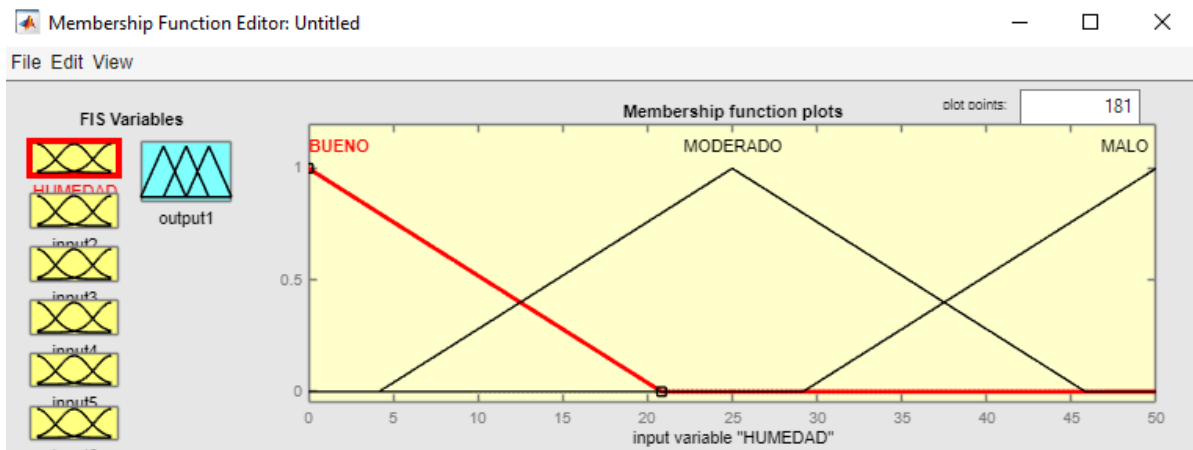


Figura 4.10 Reemplazo de función de membresía por defecto

Este proceso se lo realiza para cada una de las 6 variables de entrada y salida en el caso del índice de salud y el factor de consecuencia, en el caso del índice de riesgo se ingresan 2 variables de entrada y 1 de salida.

A continuación, se ingresan las reglas de inferencia difusa que servirán para la interpretación de las variables de entrada, estas reglas se ingresan en el Rule editor, para acceder al mismo se debe hacer doble clic en el bloque central de la ventana principal o dirigirse al apartado de Edit y dar clic en reglas (Rules) para obtener la ventana que se muestra en la Figura 4.11.

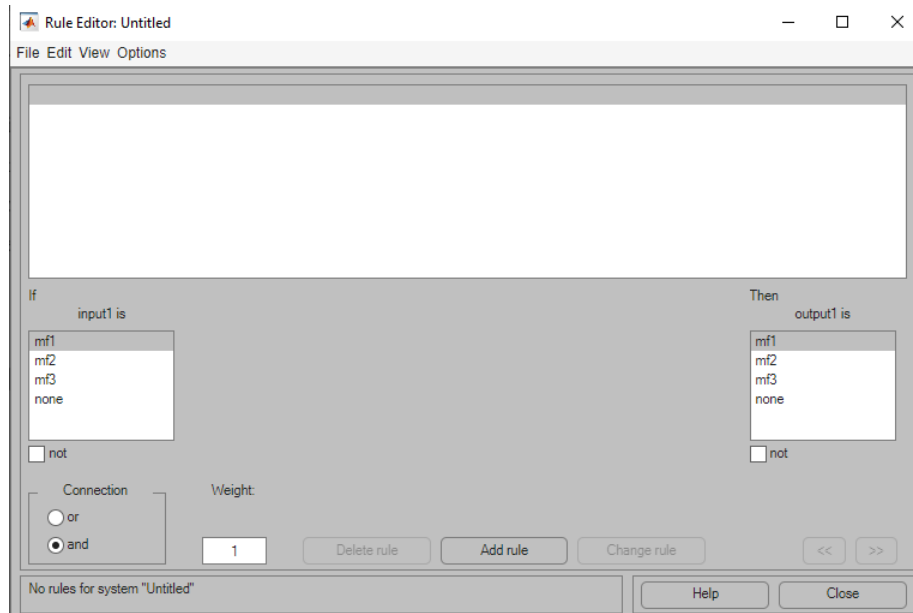


Figura 4.11 Ventana del editor de reglas

Una vez en el entorno del editor de reglas se procede a ingresar las reglas de inferencia difusa basadas en criterio experto, para esta metodología se emplean un total de 163 reglas de inferencia que se dividen en 3 bloques: 80 reglas de inferencia difusa se utilizan para calcular el índice de salud, 54 reglas se utilizan para calcular el factor de consecuencia y 29 reglas se utilizan para determinar el índice de riesgo, estas reglas se encuentran planteadas en el Anexo A de este proyecto. Las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 muestran las ventanas del editor una vez ingresadas las reglas de inferencia en cada sistema de inferencia.

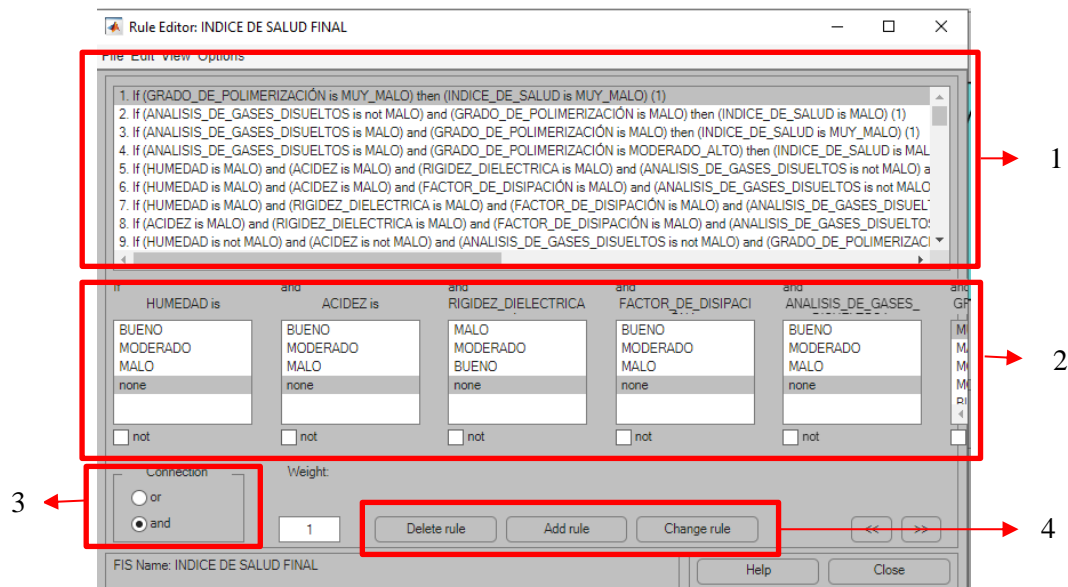


Figura 4.12 Reglas de inferencia para el índice de salud

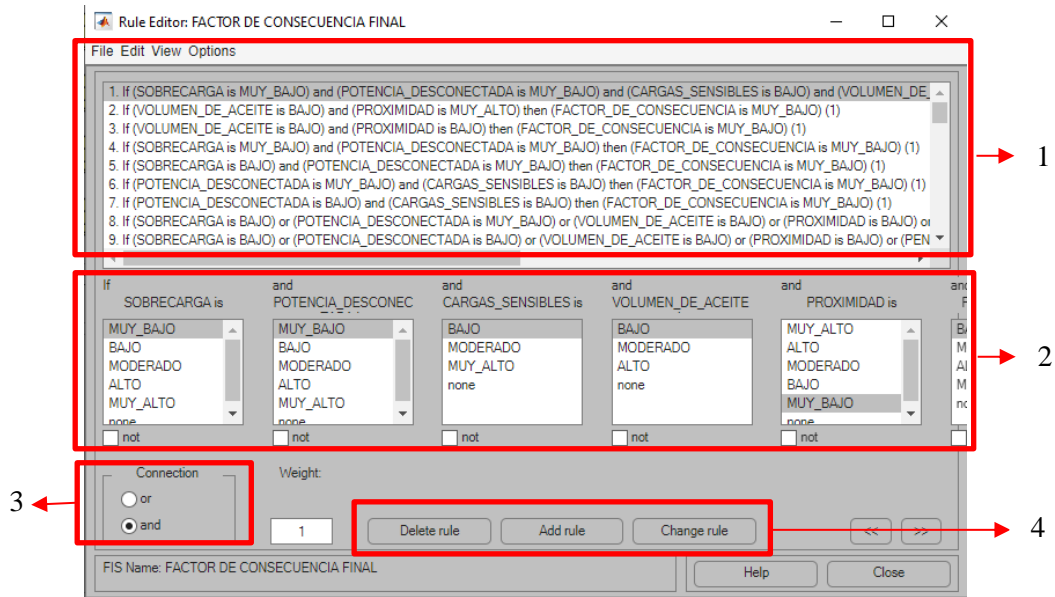


Figura 4.13 Reglas de inferencia para el factor de consecuencia

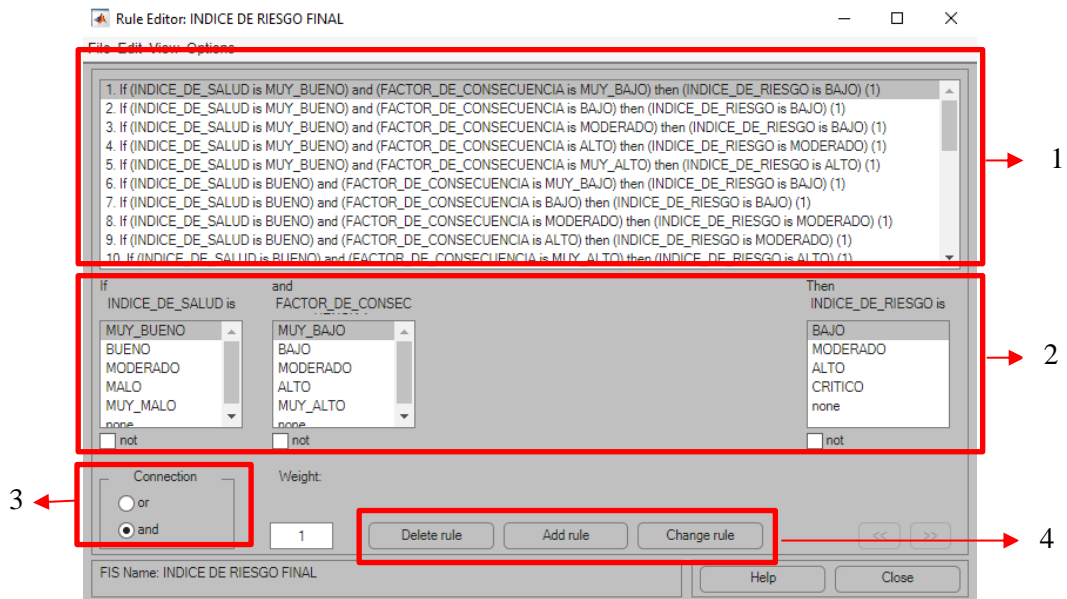


Figura 4.14 Reglas de inferencia para el índice de riesgo

En la sección 1 de las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 se puede observar las reglas de inferencia creadas mediante la sección 2 que es en donde se generan dichas reglas, en la sección 3 se elige el tipo de conector que va a utilizar cada regla, para estos sistemas se utilizan los conectores and y or, por último, en la sección 4 se puede eliminar, añadir o modificar las reglas.

Para ejecutar la simulación del sistema de inferencia difusa, se accede al módulo View (Rules) como indica la Figura 4.15, en donde se introducen los valores numéricos de entrada para cada variable del índice de salud, el factor de consecuencia y el índice de riesgo. El motor de inferencia procesa estos datos mediante un flujo estandarizado que incluye: etapa de

fuzzificación, donde los valores se mapean a grados de pertenencia utilizando las funciones de membresía preconfiguradas; evaluación de la base de conocimiento compuesta por las reglas de inferencia, agregación de salidas mediante los operadores lógicos determinados y el proceso de defuzzificación por el método de centroide para obtener resultados numéricos.

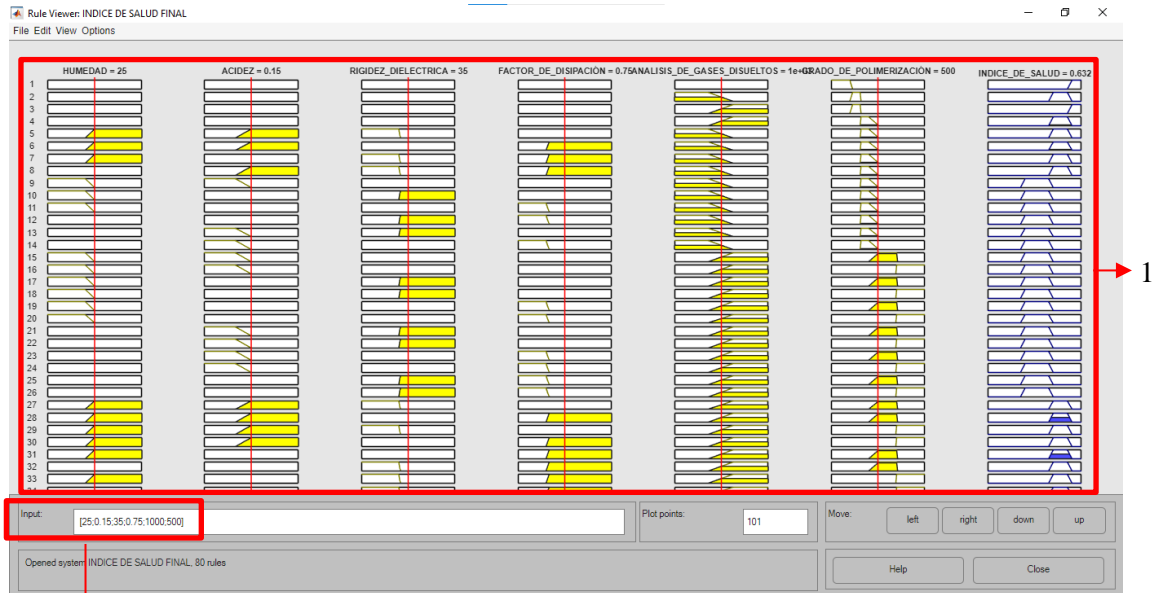


Figura 4.15 Entorno visual de las reglas de inferencia

En la sección 1 de la Figura 4.15 se pueden ingresar los valores de entrada mediante el uso de la barra deslizante, mientras que en la sección se pueden ingresar los datos de forma manual.

Para configurar los parámetros de entrada del sistema de inferencia difusa, se accede al módulo Input que se muestra en la Figura 4.16, diseñado bajo un esquema de validación que garantiza la integridad de los datos. La interfaz soporta múltiples modos de ingreso en este caso se ingresan los datos de forma manual ya que se definen de mejor manera.

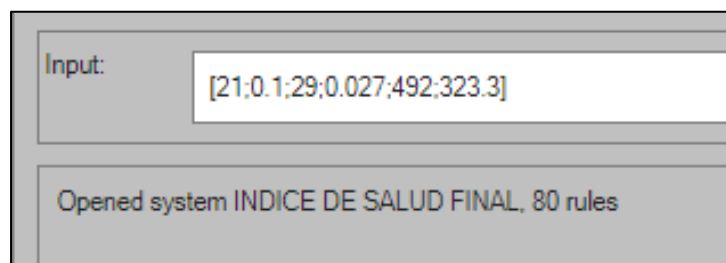


Figura 4.16 Ingreso de los valores de entrada de los TP

Una vez ingresados los valores de cada parámetro de los transformadores de potencia, el sistema de inferencia difusa procede a realizar el cálculo del valor del índice de salud y el factor de

consecuencia, una vez obtenido estos 2 resultados se procede a calcular el índice de riesgo.

4.5 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO CON SUMAS PONDERADAS

En esta sección, se presenta el método de cálculo del índice de riesgo en transformadores de potencia, el cual se basa en las sumas ponderadas de una serie de pruebas realizadas al transformador. El cálculo es apoyado en el criterio de expertos para establecer los criterios de evaluación, este índice se calcula mediante los elementos que caracterizan el estado del transformador y el factor de consecuencia.

Como primer paso se procede con el cálculo del índice de salud de los transformadores de potencia, en este procedimiento se han definido 5 categorías para evaluar este índice las cuales son: muy bueno, bueno, aceptable, malo, muy malo. En la tabla 4.4 se define la escala del HI.

Tabla 4.4 Escala del índice de salud.

HI	Condición	Descripción	Vida útil esperada aproximada
4	Muy bueno	Algunos signos de envejecimiento o deterioro leve en un número limitado de componentes.	Más de 15 años
3	Bueno	Deterioro significativo en algunos componentes	Más de 10 años
2	Aceptable	Deterioro generalizado significativo o deterioro grave en componentes específicos	Hasta 10 años
1	Malo	Deterioro grave generalizado	Menos de 3 años
0	Muy malo	Deterioro grave extensivo	Fin de vida útil

La metodología que se propone tiene en cuenta los siguientes aspectos:

- Un transformador se somete a pruebas que permiten evaluar su condición. Esto es lo que se contempla en los datos de condición.
- La cifra dada en un rango que corresponderá a determinada prueba.
- El peso varía en función de la importancia de la prueba y de su relevancia en el diagnóstico
- El HI se calcula sumando los puntajes ponderados de las pruebas realizadas.

Los valores para la función de condición y el peso incluidos en la metodología, se definen en base a las especificaciones de la IEEE e IEC y en los informes de la literatura técnica especializada.

Para obtener el valor del índice de salud de la unidad se utiliza la ecuación (3), en la que se toma en cuenta todas las variables de entrada para determinar su estado de condición.

$$HI = \frac{\sum_{j=1}^n K_j HIF_j}{\sum_{j=1}^n 4K_j} \quad (3)$$

En donde:

HIF_j = Es el factor del índice de salud de la prueba j , asignado de acuerdo con la prueba realizada, el valor resultante del HIF_j para cada parámetro estará definido entre 0 y 4.

K_j = Es el factor de peso asignado a la prueba j , que se evalúa de 1 a 5.

n = Es el número máximo de pruebas utilizadas a la unidad.

El cálculo del índice de salud es la suma de la multiplicación entre el factor del índice de salud de cada parámetro, dividida por la suma total de pesos de todos los parámetros utilizados y multiplicado por la puntuación máxima. En la tabla 4.5 se muestra la puntuación de los datos y el peso de acuerdo con los resultados de las pruebas realizadas al transformador.

Tabla 4.5 Puntajes y pesos de las variables utilizadas en el cálculo del índice de salud

Parámetro	69 kV < U > 230	Puntaje	Peso
Rigidez dieléctrica	≥ 52	1	3
	47-52	2	
	35-47	3	
	≤ 35	4	
Acidez	$\leq 0,04$	1	2
	0,04-0,1	2	
	0,1-0,15	3	
	$\geq 0,15$	4	
Factor de disipación	$\leq 0,1$	1	3
	0,1-0,5	2	
	0,5-1	3	
	≥ 1	4	
Humedad	≤ 20	1	4
	20-25	2	
	25-30	3	
	≥ 30	4	

TDCG	<300	1	3
	300-560	2	
	560-1250	3	
	>1250	4	
DP	>700	1	4
	700-400	2	
	400-200	3	
	<200	4	

A continuación, se procede con el cálculo del factor de consecuencia de los transformadores de potencia, en este procedimiento se han definido 5 categorías para evaluar este factor las cuales son: muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto. En la tabla 4.6 se define los rangos del FC.

Tabla 4.6 Rangos para evaluar el factor de consecuencia

Rango	Impacto
FC < 1	Muy Bajo
1 < FC < 2	Bajo
2 < FC < 3	Medio
3 < FC < 4	Alto
FC > 4	Muy alto

La metodología propuesta considera los siguientes aspectos:

- **Grado de impacto:** se refiere al impacto causado por posibles fallas en el transformador.
- **Función de condición:** se refiere al valor asignado en un rango, para cada factor.
- **Peso:** depende de la importancia del factor y su importancia para el diagnóstico de la consecuencia.
- **Cálculo del factor de consecuencia:** es la suma de puntajes ponderados de todos los factores, que indican la consecuencia de falla.

El cálculo del factor de consecuencia para el transformador se realiza utilizando la ecuación (4), en la que se toma en cuenta todas las variables y factores obtenidos para la formulación de su condición.

$$FC = \frac{\sum_{j=1}^n K_j FCF_j}{\sum_{j=1}^n 4K_j} \quad (4)$$

En donde:

FCF_j =Factor de consecuencia de la prueba j, asignado de acuerdo con la prueba realizada, el valor posible del FCF_j para cada parámetro se definirá entre un rango de 0 a 4.

K_j = Factor de peso asignado a la prueba j, que va de 1 a 5, la cual considera la importancia de los resultados de la consecuencia de falla.

n = Número máximo de parámetros utilizados.

Mediante la ecuación (4), se realiza el cálculo del factor de consecuencia que es la suma de la multiplicación entre el factor del factor de consecuencia en cada parámetro, dividida por la suma total de pesos de cada variable utilizada y multiplicado por la puntuación máxima. En la tabla 4.7 se muestra la puntuación de los datos y el peso de acuerdo con los resultados de las pruebas realizadas al transformador.

Tabla 4.7 Puntajes y pesos de las variables utilizadas en el cálculo del factor de consecuencia

Parámetro	69 kV < U > 230	Puntaje	Peso
Nivel de sobrecarga a otros equipos	No sobrecarga a otros equipos	0	3
	Ocasionalmente sobrecarga a otros equipos	1	
	Sobrecarga a otros equipos	2	
	Sobrecarga a otros equipos y produce su desconexión	3	
	Produce desconexión de equipos en cadena e inestabilidad de la red	4	
Nivel de potencia desconectada	< 5 MW	0	4
	5-10 MW	1	
	10-30 MW	2	
	30-60 MW	3	
	>60 MW	4	
Nivel de cargas sensibles	No existen cargas sensibles	2	4
	Existe al menos una carga sensible	3	
	Existen cargas muy sensibles	4	
Nivel de volumen de aceite	< 10.000 litros	2	2
	10.000-30.000 litros	3	
	>30.000 litros	4	
Nivel de proximidad a otras construcciones	>500 metros	0	3
	300-500 metros	1	
	200-300 metros	2	
	100-200 metros	3	
	<100 metros	4	
Nivel de penalizaciones	<30 MVA	1	2
	31-40 MVA	2	

	41-60 MVA	3	
	>60 MVA	4	

Una vez que se han evaluado los valores del índice de salud y factor de consecuencia de cada unidad se procede a calcular su índice de riesgo. El riesgo será evaluado con 4 posibles estados: bajo riesgo, riesgo medio, alto riesgo y riesgo inaceptable. En la tabla 4.8 se define la escala de rangos de los niveles de riesgo en el transformador de potencia.

Tabla 4.8 Rangos de los niveles de riesgo

Rango	Nivel de riesgo
<1	Bajo
1-2,5	Medio
2,5-4	Alto
> 4	Inaceptable

La metodología propuesta considera los siguientes aspectos:

- **Índice de salud:** se refiere a la condición del transformador.
- **Factor de consecuencia:** se refiere al impacto causado por posibles fallas en el transformador.
- **Función de condición:** se refiere al valor asignado en un rango, para cada factor.
- **Peso:** depende de la relevancia del factor y su importancia para el diagnóstico de la unidad.
- **Cálculo del índice de riesgo:** es la suma de puntajes ponderados de los factores asociados a la condición del transformador.

El cálculo del índice de riesgo para el transformador se lo realiza mediante la ecuación (5), en esta ecuación se toma en cuenta todos los parámetros y factores obtenidos para la formulación de su estado de condición.

$$RI = \frac{\sum_{j=1}^n K_j H I F_j K_j F C F_j}{\sum_{j=1}^n 4 K_j} \quad (5)$$

En donde:

HIF_j =Factor del índice de salud, el valor posible del HIF_j será definida entre 0 y 4.

FCF_j =Factor de consecuencia, el valor posible del FCF_j será definida entre 0 y 4.

K_j = Factor de peso asignado a cada parámetro j, que se establece de 1 a 5.

n = Número máximo de parámetros utilizados.

De acuerdo a la ecuación (5), el cálculo del índice de riesgo es la adición de la multiplicación entre el factor de consecuencia con su peso asignado y entre el índice de salud con su peso asignado, dividido por la suma total de pesos de cada parámetro utilizado y multiplicado por la puntuación máxima. En la tabla 4.9 se muestra la puntuación de los datos y los pesos asignados.

Tabla 4.9 Puntajes y pesos de las variables utilizadas en el cálculo del índice de riesgo

Parámetro	69 kV < U > 230	Puntaje	Peso
Índice de salud	> 4	0	3
	3-4	1	
	2-3	2	
	1-2	3	
	< 1	4	
Factor de consecuencia	FC < 1	0	4
	1 < FC < 2	1	
	2 < FC < 3	2	
	3 < FC < 4	3	
	FC > 4	4	

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

Las metodologías utilizadas para analizar los resultados se basaron en la utilización de las herramientas tecnológicas: MatLab y Excel. Es importante destacar que tanto las funciones de membresía como las reglas de inferencia utilizadas con la lógica difusa fueron definidas en anteriores investigaciones para su uso en proyectos futuros. Durante la programación, se utilizaron parámetros como rigidez dieléctrica, factor de disipación, acidez, grado de polimerización, contenido de humedad, análisis de gases disueltos, y también los factores que pueden generar grandes consecuencias, los cuales son sobrecarga a otros equipos, potencia desconectada, cargas sensibles, volumen de aceite, proximidad a otras construcciones y penalizaciones. Por parte de las sumas ponderadas cabe recalcar que las ponderaciones escogidas fueron obtenidas por criterio de expertos.

Esta sección se presenta el análisis y discusión de los resultados obtenidos mediante la propuesta de investigación. Se detallan las pruebas realizadas para el cálculo del índice de riesgo en una flota de cuatro transformadores de potencia, así como los resultados obtenidos de este proceso mediante la aplicación de las dos metodologías evaluadas: el método de sumas ponderadas y la lógica difusa. Para ello, se utilizan referencias conceptuales, tablas comparativas y gráficos que permiten visualizar y comprender los hallazgos. Finalmente, se realiza una discusión para identificar las implicaciones de estos hallazgos en relación con el problema y los objetivos propuestos, considerando para ello la información de las secciones anteriores.

Resultados obtenidos del índice de salud mediante la lógica difusa

Tabla 5.1 Resultados obtenidos del índice de salud

Unidad	Índice de salud	Estado
TP1	0,525	Aceptable
TP2	0,30	Bueno
TP3	0,775	Malo
TP4	0,525	Aceptable

En la tabla 5.1 se puede observar los resultados del índice de salud que se obtuvieron utilizando la metodología de la lógica difusa.

Para el caso del TP1 se pudo evidenciar que obtuvo un índice de salud Aceptable, pese a que esta unidad es la más antigua de la subestación, esto se debe en gran medida al buen nivel de su grado de polimerización y un buen análisis de gases disueltos, aunque presentó un nivel malo de rigidez dieléctrica, factor de disipación y contenido de humedad.

Para el caso del TP2 se pudo evidenciar que obtuvo un índice de salud Bueno, esto se puede justificar por el hecho que posee un elevado nivel de su grado de polimerización ya que como se mencionó en la metodología desarrollada es uno de los parámetros más importantes al momento de establecer el estado en el que se encuentra el activo.

Para el caso del TP3 se pudo evidenciar que obtuvo un índice de salud Malo, esto se puede justificar por el hecho el aceite presenta un nivel de acidez elevado y nivel bajo de su grado de polimerización.

Por último, el TP4 obtuvo un índice de salud aceptable, ya que su nivel de humedad en el aceite, rigidez dieléctrica y análisis de gases disueltos se encuentran dentro de los parámetros aceptables.

Resultados obtenidos del factor de consecuencia mediante la lógica difusa

Tabla 5.2 Resultados obtenidos del factor de consecuencia

Unidad	Factor de consecuencia	Impacto
TP1	0,522	Medio
TP2	0,574	Medio
TP3	0,458	Medio
TP4	0,574	Medio

La Tabla 5.2 presenta los resultados del factor de consecuencia evaluado para todas las unidades de transformador en estudio. Dado que estas unidades están emplazadas dentro de la misma estación transformadora comparten características generales de ubicación, entorno operativo y condiciones de exposición a los riesgos externos. Sin embargo, se distinguen entre sí por sus propias características, como el volumen de aceite aislante que contienen, factores que influyen

directamente en su criticidad dentro del sistema eléctrico.

Al analizar los resultados, se observa que la unidad TP3 registra el menor factor de consecuencia, lo cual se atribuye principalmente a su menor potencia nominal en comparación con las demás, lo que implica que, en caso de fallo, su impacto en la continuidad del servicio y en la infraestructura sería menos severo. Por otro lado, las unidades TP2, TP3 y TP4 muestran un factor de consecuencia similar, esto debido a que tanto su nivel de sobrecarga, cargas sensibles y proximidad a otras construcciones son similares para cada unidad.

Resultados obtenidos del índice de riesgo mediante la lógica difusa

Tabla 5.3 Resultados obtenidos del índice de riesgo

Unidad	Índice de riesgo	Nivel de riesgo
TP1	0,6656	Alto
TP2	0,4158	Medio
TP3	0,5974	Medio
TP4	0,6659	Alto

La tabla 5.3 muestra los resultados obtenidos del índice de riesgo aplicando la metodología de la lógica difusa, en donde se puede evidenciar que tanto el TP1 y TP4 se encuentran en un nivel de riesgo alto, esto debido a que pese a presentar un factor de consecuencia medio, su índice de salud se encuentra en el estado de aceptable por lo que se nivel de riesgo aumenta ya que estas unidades pueden sufrir fallas de manera inesperada y su factor de consecuencia puede aumentar.

Por otra parte, el TP2 encuentran en un nivel de riesgo medio, ya que, pese a tener un índice de riesgo muestra un estado del activo bueno, su factor de consecuencia se encuentra en un nivel de impacto medio lo que hace coherente este resultado.

Por último, se analiza el resultado del TP3 que de igual manera tiene un nivel de riesgo medio, esto se puede entender ya que su estado de salud es bueno, pero debido a que se encuentra en la misma subestación que las otras unidades en estudio, presenta un factor de consecuencia similar. Por lo que eleva su nivel de riesgo.

Resultados obtenidos del índice de salud mediante las sumas ponderadas

Tabla 5.4 Resultados del índice de salud calculado con sumas ponderadas

Unidad	Índice de salud	Estado
TP1	3,5	Bueno
TP2	2,5	Aceptable
TP3	3,25	Bueno
TP4	3,75	Bueno

La tabla 5.4 muestra los resultados obtenidos del índice de salud calculados mediante el uso del método de las sumas ponderadas, aquí se puede observar que las unidades TP1, TP3 Y TP4 presentaron un estado de salud bueno, esto se debe en gran medida a los pesos asignados a cada variable de entrada, en esta metodología se asigna una mayor ponderación tanto al contenido de humedad en el aceite como al análisis de gases disueltos y el grado de polimerización. Por otra parte, al resto de variables se les asignó una ponderación menor. El TP2 presentó un estado de salud aceptable ya que dispone de un nivel elevado en el análisis de gases disueltos en el aceite.

Resultados obtenidos del factor de consecuencia mediante las sumas ponderadas

Tabla 5.5 Resultados del factor de consecuencia calculado con sumas ponderadas

Unidad	Factor de consecuencia	Impacto
TP1	4	Alto
TP2	4,25	Muy alto
TP3	3	Medio
TP4	4	Alto

La tabla 5.5 muestra los resultados obtenidos del factor de consecuencia calculado mediante el uso del método de las sumas ponderadas, aquí se puede observar que las unidades TP1 Y TP4 presentaron un nivel de impacto alto, ya que los pesos asignados a cada variable de entrada de estas unidades se les asignó un nivel de ponderación alto ya que se tomó en cuenta el impacto que pueden causar en el entorno en el cual están ubicadas las unidades. El que mayor nivel de impacto tuvo fue el TP2, esto como se menciona es debido a las ponderaciones utilizadas en este cálculo ya que pese a estar en la misma subestación posee mayor cantidad de volumen de

aceite lo cual hace que el riesgo por explosión sea muy alto.

Resultados obtenidos del índice de riesgo mediante las sumas ponderadas

Tabla 5.6 Resultado del índice de riesgo calculado con sumas ponderadas

Unidad	Índice de riesgo	Nivel
TP1	1,75	Medio
TP2	3	Alto
TP3	1,5	Medio
TP4	1,75	Medio

En la tabla 5.6 se muestran los resultados que fueron obtenidos mediante la aplicación de las sumas ponderadas, en esta tabla se evidencia que el TP1, TP3 y TP4 presentan un nivel de riesgo medio ya que pese a que obtuvieron un factor de consecuencia elevado lo compensa su estado de salud, esto no aplica para el TP2 ya que esta unidad presentó un estado de salud aceptable y un factor de consecuencia muy alto, en esta metodología se evidencia que influye mucho el peso de ponderación que se le asigna a cada variable.

Las tablas 5.7 y 5.8 presentan un resumen de los resultados obtenidos con cada metodología.

Tabla 5.7 Resultados del índice de salud calculado mediante las 2 metodologías propuestas.

UNIDAD	INDICE DE SALUD (LÓGICA DIFUSA)	Estado	INDICE DE SALUD (SUMAS PONDERADAS)	Estado
TP1	0,525	Aceptable	3,5	Bueno
TP2	0,3	Bueno	2,5	Aceptable
TP3	0,775	Malo	3,25	Bueno
TP4	0,525	Aceptable	3,75	Bueno

La Tabla 5.7 contrasta los resultados de las dos metodologías de evaluación utilizadas para calcular el índice de salud, aplicado a cuatro transformadores de potencia, mostrando notables diferencias en los diagnósticos. Por ejemplo, TP1 recibe una calificación de aceptable con el primer método, pero alcanza un estado de bueno con el segundo método, mientras que el TP3 evidencia la mayor inconsistencia al ser catalogado como malo mediante lógica difusa frente a como lo cataloga el método ponderado. Estas discrepancias indican que la lógica difusa resulta

más sensible ante variables críticas (como humedad o acidez), a diferencia del enfoque ponderado que considera otros aspectos con mayor relevancia. El TP2 mantiene una evaluación relativamente consistente para las dos metodologías, mientras que el TP4 obtuvo un comportamiento similar al TP1. La marcada contradicción en el TP3 demanda un análisis complementario de las pruebas realizadas y los casos del TP1 y TP4 requieren un seguimiento constante debido a sus resultados imprecisos.

Tabla 5.8 Resultados del factor de consecuencia calculado mediante las 2 metodologías propuestas.

UNIDAD	FACTOR DE CONSECUENCIA (LÓGICA DIFUSA)	IMPACTO	FACTOR DE CONSECUENCIA (SUMAS PONDERADAS)	IMPACTO
TP1	0,5293	Medio	3,5	Alto
TP2	0,5743	Medio	3,75	Muy alto
TP3	0,4581	Medio	2,75	Medio
TP4	0,5749	Medio	3,5	Alto

La tabla 5.8 muestra los resultados obtenidos del factor de consecuencia mediante el cálculo de las 2 metodologías propuestas, en esta tabla se puede observar que con el desarrollo de la lógica difusa se obtuvieron valores similares lo cual estableció a las unidades con un impacto medio, esto se debe a que los 4 transformadores comparten valores similares por el hecho de encontrarse en la misma subestación, mientras que con el método de las sumas ponderadas se puede evidenciar que presentaron valores diferentes y que mostraron un grado de impacto alto muy alto exceptuando al TP3 que se apega al valor calculado por la lógica difusa.

Tabla comparativa del Índice de riesgo calculado por la lógica difusa y las sumas ponderadas

Tabla 5.9 Resultados del Índice de riesgo calculado con las 2 metodologías propuestas en el proyecto

UNIDAD	INDICE DE RIESGO LÓGICA DIFUSA	NIVEL DE RIESGO	INDICE DE RIESGO SUMAS PONDERADAS	NIVEL DE RIESGO
TP1	0,6656	Alto	1,75	Medio
TP2	0,4158	Medio	3	Alto
TP3	0,5974	Medio	1,5	Medio
TP4	0,6659	Alto	1,75	Medio

La Tabla 5.9 presenta los resultados obtenidos del índice de riesgo de todas las unidades en estudio, aquí se puede observar que existe una clara diferencia al momento de evaluar este índice con las dos metodologías.

La metodología de la lógica difusa posiciona al TP1 en un nivel de riesgo alto debido al estado de salud en el que se encuentra el cual es aceptable, mientras que la metodología de las sumas ponderadas lo posiciona en un nivel de riesgo medio ya que a pesar de que se obtuvo un estado de salud bueno su factor de consecuencia tiene un grado de impacto alto. La metodología que más se acerca a la condición real del transformador es la lógica difusa ya que esta unidad presenta una degradación considerable del papel aislante, su nivel de rigidez dieléctrica es bajo y presenta un nivel de acidez relevante.

Al TP2 la metodología de la lógica difusa lo considera con un nivel de riesgo medio ya que presenta un buen estado de salud y un factor de consecuencia medio, mientras que el método de las sumas ponderadas lo clasifica con un nivel de riesgo alto, en este caso el método de las sumas ponderadas presenta un resultado inconsistente, ya que de todas las unidades de las subestación, esta es la que mejor índice de salud dispone porque todos los parámetros de las pruebas realizadas están dentro de los valores permisibles, un claro ejemplo es que esta unidad dispone de un valor de DP alto a comparación del resto, su nivel de humedad es el más bajo dentro de la flota de transformadores y tanto su nivel de acidez, como factor de disipación presentan niveles bajos.

Para el TP3 se obtuvo un nivel de riesgo similar mediante el desarrollo de la lógica difusa y el método de las sumas ponderadas, para esta unidad la primera metodología lo sitúa en ese nivel de riesgo porque de todas las unidades es que el obtuvo el menor valor del factor de consecuencia pese a que su índice de salud es el más elevado, para el segundo método lo define en ese mismo nivel ya que mediante los cálculos se obtuvo un índice de salud bueno y un factor de consecuencia medio y como sus pesos en la ponderación son similares no presenta demasiada variación en el resultado.

El TP4 ha sido clasificado en un nivel de riesgo similar a la unidad TP1 tanto con el desarrollo de la lógica difusa como con el método de las sumas ponderadas esto debido a que también presenta un nivel de DP bajo y a pesar de que el análisis de gases disueltos está dentro de los rangos permisibles, la presencia de un alto nivel de acidez y un factor de disipación alto lo posiciona como a una de las unidades prioritarias para realizar acciones preventivas.

Al comparar las 2 metodologías se puede observar claramente que los resultados del índice de riesgo, difieren mucho debido a su estructura, por un lado, la lógica difusa ofrece reglas de inferencia propuestas y validadas por criterio de expertos y expuestas en otros proyectos, las sumas ponderadas varían en gran medida sus niveles de ponderación de acuerdo al criterio de expertos que fueron consultados sobre el tema propuesto.

En la tabla 5.10 se muestra el error absoluto que existe entre las dos metodologías propuestas calculado mediante la ecuación (2).

Tabla 5.10 Error relativo de las metodologías propuestas

Unidad	Error absoluto
TP1	0,2281
TP2	0,3342
TP3	0,2224
TP4	0,2284

Después de haber calculado el valor del error absoluto de cada uno de los transformadores de

potencia se aplica la ecuación (1) para obtener el error promedio. El valor calculado del error promedio entre la metodología de la lógica difusa y el método de las sumas ponderadas es de 0,2533 esto significa que los valores obtenidos mediante las sumas ponderadas se desvían un 25,33 % respecto a los valores del índice de riesgo obtenidos mediante la lógica difusa, de acuerdo a este error se sugiere revisar los pesos asignados a cada variable en la metodología de las sumas ponderadas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

La revisión de literatura especializada y normativas técnicas constituyeron una base de conocimiento sólida para profundizar en el estado del arte relacionado con la evaluación de riesgos en transformadores de potencia, este proceso de investigación permitió desarrollar 2 metodologías fundamentadas en la lógica difusa y las sumas ponderadas, las cuales ofrecen un marco de referencia para el desarrollo de proyectos a futuro en el campo de la optimización de estrategias de evaluación y gestión de riesgos en activos eléctricos críticos.

Se desarrollaron exitosamente dos metodologías distintas para la determinación del índice de riesgo en los transformadores de potencia. La primera metodología utilizó un sistema de inferencia difusa integrando datos cuantitativos de las unidades en estudio, a través de una base de reglas de inferencia propuestas por expertos. En simultáneo, se desarrolló un modelo de sumas ponderadas como un contrapunto metodológico, estableciendo un modelo cuantitativo basado en la asignación de pesos fijos. Al comparar los resultados de ambas metodologías se observó que existe un error promedio del 25,33% en los valores del índice de riesgo calculados.

La evaluación comparativa de los resultados concluye que el índice de riesgo generado por la lógica difusa se apega más al estado real de los transformadores de potencia estudiados ya que el método desarrollado por las sumas ponderadas presenta diferencias al momento de asignar los pesos a las variables, un claro ejemplo es el análisis del TP2, para este activo se puede evidenciar que el resultado obtenido con la lógica difusa lo sitúa en un nivel de riesgo medio comparable al resto de los 3 TP, mientras que el método de las sumas ponderadas lo sitúa en un nivel de riesgo alto, esto se debe a que se obtuvo un valor del factor de consecuencia muy elevado con la implementación de las sumas ponderadas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a las empresas de distribución eléctrica adoptar la metodología de lógica difusa como el estándar para la evaluación de riesgos en sus transformadores de potencia críticos. Esta implementación permitirá una gestión de activos proactiva y basada en información precisa, lo que se traduce en una mayor fiabilidad del sistema eléctrico.

Para una correcta implementación de la lógica difusa, se recomienda invertir en la capacitación del personal técnico en el uso de software especializado (como MATLAB y su Fuzzy Logic Toolbox). Es fundamental que los ingenieros puedan diseñar, validar y ajustar los modelos difusos, utilizando el conocimiento experto y los datos históricos de las pruebas de diagnóstico en los transformadores de potencia para refinar las reglas y funciones de pertenencia.

Se recomienda enfáticamente establecer un programa sistemático para la recolección y almacenamiento de datos históricos de pruebas y mantenimiento de los transformadores. Esta base de datos es el pilar fundamental para nutrir y mejorar continuamente la precisión de cualquier modelo de evaluación, especialmente el de lógica difusa, garantizando que el diagnóstico de la "salud" del equipo sea acertado y basado en evidencia.

7. REFERENCIAS

- [1] A. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, J. Service, y W. Fan, “An approach to power transformer asset management using health index”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 25, núm. 2, pp. 20–34, mar. 2009, doi: 10.1109/MEI.2009.4802595.
- [2] G. Jiménez-Araya y G. A. Gómez-Ramírez, “Comportamiento de los aislamientos sólidos de transformadores de potencia en condiciones ambientales no controladas”, *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 29, núm. 3, p. 99, nov. 2016, doi: 10.18845/tm.v29i3.2891.
- [3] A. A. Romero, E. E. Mombello, y G. Ratta, “An overview on power transformer management: Individual Assets and Fleets”, en *2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*, IEEE, sep. 2012, pp. 1–7. doi: 10.1109/TDC-LA.2012.6319081.
- [4] Choi y Tiffany, “Large Power Transformers and the U.S. Electric Grid”.
- [5] A. F. Cerón, I. F. Orduña, G. Aponte, y A. A. Romero, “Panorama de la Gestión de Activos para Transformadores de Potencia”, *Información tecnológica*, vol. 26, núm. 3, pp. 99–110, 2015, doi: 10.4067/S0718-07642015000300014.
- [6] “La gestión efectiva de activos en la industria energética”. Consultado: el 27 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fractal.com/es/blog/gestion-de-activos-en-la-industria-de-energia>
- [7] “Componentes del transformador de potencia: la guía definitiva”. Consultado: el 27 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://transformermfg.net/blog/power-transformer-components/>
- [8] Emilio Morales Cruz, “SISTEMAS DE MONITOREO INTEGRAL PARA TRANSFORMADORES”, 2017, Consultado: el 28 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.electro-genesis.com/WebGenesisBiblio/Literatura/Articulos/Comisionamiento%20Testeo%20Mantenimiento/Transformadores/Web/SISTEMAS%20DE%20MONITOREO%20INTEGRAL%20PARA%20TRANSFORMADORES.pdf>
- [9] “Capítulo 2: CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LÓGICA DIFUSA”.
- [10] R. A. M. Perez, “Sistemas de Inferencia Basado en Logica Borrosa: Fundamentos y casos de estudio”, *Revista de Investigacion de Sistemas e Informatica*, vol. 7, núm. 1, 2010.
- [11] B. Gorgan, P. V. Notingher, L. V. Badicu, y G. Tanasescu, “CALCULATION OF POWER TRANSFORMERS HEALTH INDEXES”, *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series*, 2010.
- [12] A. Naderian, S. Cress, R. Piercy, F. Wang, y J. Service, “An approach to determine the health index of power transformers”, en *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2008. doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570308.
- [13] A. E. B. Abu-Elanien, M. M. A. Salama, y M. Ibrahim, “Calculation of a health index for oil-immersed transformers rated under 69 kV using fuzzy logic”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, núm. 4, 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2205165.
- [14] F. Ortiz, I. Fernandez, A. Ortiz, C. J. Renedo, F. Delgado, y C. Fernandez, “Health indexes for power transformers: A case study”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 32, núm. 5, 2016, doi: 10.1109/MEI.2016.7552372.
- [15] A. F. Cerón, D. F. Echeverry, G. Aponte, y A. A. Romero, “Índice de salud para transformadores de potencia inmersos en aceite mineral con voltajes entre 69kV y 230kV usando lógica difusa”, *Informacion Tecnologica*, vol. 26, núm. 2, 2015, doi: 10.4067/S0718-07642015000200013.
- [16] “IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment”, el 27 de junio de 1991, *IEEE, Piscataway, NJ, USA*. doi: 10.1109/IEEESTD.1992.101092.
- [17] “IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors”, el 6 de marzo de 2013, *IEEE, Piscataway, NJ, USA*. doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6544533.
- [18] V. Olume, “TRANSFORMER DIAGNOSTICS”, *UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION*, vol. 3–31, 2003.

- [19] “IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers”, el 26 de septiembre de 2008, *IEEE, Piscataway, NJ, USA*. doi: 10.1109/IEEESTD.2009.4776518.
- [20] R. D. Medina, D. A. Zaldivar, A. A. Romero, J. Zuñiga, y E. E. Mombello, “A fuzzy inference-based approach for estimating power transformers risk index”, *Electric Power Systems Research*, vol. 209, p. 108004, ago. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108004.
- [21] J. P. Lata, R. D. Medina, W. P. Borja, y D. X. Morales, “Transformer common test description for condition management”, en *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, IEEE, oct. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICA-ACCA.2016.7778472.
- [22] A. Ilgevicius y A. Babizki, “Integrated Transformer Fleet Management (ITFM) System”, en *23rd International Conference on Electricity Distribution*, 2015.

ANEXOS

ANEXO A

Reglas de inferencia difusa

En este anexo se presentan las reglas de inferencia propuestas en este proyecto, las cuales se utilizan para el desarrollo del cálculo del índice de riesgo utilizando la lógica difusa.

Índice de salud

- 1 Si grado de polimerización es muy malo entonces índice de salud es muy malo
- 2 Si análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es malo entonces índice de salud es malo
- 3 Si análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es malo entonces índice de salud es muy malo
- 4 Si análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado alto entonces índice de salud es malo
- 5 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado alto entonces índice de salud es malo
- 6 Si humedad es malo y acidez es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado alto entonces índice de salud es malo
- 7 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado alto entonces índice de salud es malo
- 8 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado alto entonces índice de salud es malo

- 9 Si humedad es malo y acidez es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado alto entonces índice de salud es moderado
- 10 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado alto entonces índice de salud es moderado
- 11 Si humedad es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado alto entonces índice de salud es moderado
- 12 Si rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado alto entonces índice de salud es moderado
- 13 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado alto entonces índice de salud es moderado
- 14 Si acidez es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado alto entonces índice de salud es moderado
- 15 Si humedad es malo y acidez es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 16 Si humedad es malo y acidez es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 17 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 18 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 19 Si humedad es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 20 Si humedad es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 21 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es malo y

- grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 22 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 23 Si acidez es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 24 Si acidez es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 25 Si rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 26 Si rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 27 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es malo
- 28 Si humedad es malo y acidez es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es malo
- 29 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es malo
- 30 Si humedad es malo y acidez es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es malo
- 31 Si humedad es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es malo
- 32 Si rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es malo

- 33 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es malo
- 34 Si rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es malo y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es malo
- 35 Si humedad es malo y análisis de gases disueltos es moderado y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 36 Si acidez es malo y análisis de gases disueltos es moderado y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 37 Si rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es moderado y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 38 Si factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es moderado y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 39 Si humedad es malo y análisis de gases disueltos es moderado y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 40 Si acidez es malo y análisis de gases disueltos es moderado y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 41 Si rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es moderado y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 42 Si factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es moderado y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 43 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es moderado y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es bueno
- 44 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es moderado y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es bueno

- 45 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es aceptable
- 46 Si humedad es malo y acidez es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es aceptable
- 47 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es aceptable
- 48 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es aceptable
- 49 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es aceptable
- 50 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es aceptable
- 51 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es bueno
- 52 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es bueno y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es bueno
- 53 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es bueno y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es bueno
- 54 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es bueno y factor de

- disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es bueno
- 55 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es bueno
- 56 Si humedad es malo y acidez es bueno y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es bueno
- 57 Si humedad es bueno y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es bueno
- 58 Si humedad es bueno y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es bueno
- 59 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 60 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 61 Si rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es moderado
- 62 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 63 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 64 Si rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado

- 65 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es bueno
- 66 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es bueno
- 67 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es bueno
- 68 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es bueno
- 69 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es bueno
- 70 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es bueno
- 71 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es bueno
- 72 Si acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es bueno
- 73 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es bueno
- 74 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es bueno

- 75 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es bueno
- 76 Si humedad es malo y rigidez dieléctrica es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es bueno
- 77 Si humedad es bueno y acidez es bueno y rigidez dieléctrica es bueno y factor de disipación es bueno y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es moderado bajo entonces índice de salud es muy bueno
- 78 Si humedad es bueno y acidez es bueno y rigidez dieléctrica es bueno y factor de disipación es bueno y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es muy bueno
- 79 Si humedad es malo y acidez es malo y rigidez dieléctrica es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado
- 80 Si humedad es malo y acidez es malo y factor de disipación es malo y análisis de gases disueltos es bueno y grado de polimerización es bueno entonces índice de salud es moderado

Factor de consecuencia

- 1 Si sobrecarga es muy bajo y potencia desconectada es muy bajo y cargas sensibles es bajo y volumen de aceite es bajo y proximidad es muy bajo y penalizaciones es bajo entonces factor de consecuencia es muy bajo
- 2 Si volumen de aceite es bajo y proximidad es muy alto entonces factor de consecuencia es muy bajo
- 3 Si volumen de aceite es bajo y proximidad es bajo entonces factor de consecuencia es muy bajo
- 4 Si sobrecarga es muy bajo y potencia desconectada es muy bajo entonces factor de consecuencia es muy bajo

- 5 Si sobrecarga es bajo y potencia desconectada es muy bajo entonces factor de consecuencia es muy bajo
- 6 Si potencia desconectada es muy bajo y cargas sensibles es bajo entonces factor de consecuencia es muy bajo
- 7 Si potencia desconectada es bajo y cargas sensibles es bajo entonces factor de consecuencia es muy bajo
- 8 Si sobrecarga es bajo o potencia desconectada es muy bajo o volumen de aceite es bajo o proximidad es bajo o penalizaciones es bajo entonces factor de consecuencia es bajo
- 9 Si sobrecarga es bajo o potencia desconectada es bajo o volumen de aceite es bajo o proximidad es bajo o penalizaciones es bajo entonces factor de consecuencia es bajo
- 10 Si volumen de aceite es moderado y proximidad es muy bajo entonces factor de consecuencia es bajo
- 11 Si sobrecarga es moderado y potencia desconectada es muy bajo entonces factor de consecuencia es bajo
- 12 Si sobrecarga es bajo y potencia desconectada es bajo entonces factor de consecuencia es bajo
- 13 Si sobrecarga es muy bajo y potencia desconectada es moderado entonces factor de consecuencia es bajo
- 14 Si potencia desconectada es moderado y cargas sensibles es bajo entonces factor de consecuencia es bajo
- 15 Si potencia desconectada es muy bajo y cargas sensibles es moderado entonces factor de consecuencia es bajo
- 16 Si potencia desconectada es bajo y cargas sensibles es moderado entonces factor de consecuencia es bajo
- 17 Si volumen de aceite es moderado o proximidad es moderado o penalizaciones es moderado entonces factor de consecuencia es moderado

- 18 Si volumen de aceite es bajo y proximidad es moderado entonces factor de consecuencia es moderado
- 19 Si volumen de aceite es bajo y proximidad es alto entonces factor de consecuencia es moderado
- 20 Si volumen de aceite es moderado y proximidad es bajo entonces factor de consecuencia es moderado
- 21 Si volumen de aceite es alto y proximidad es muy bajo entonces factor de consecuencia es moderado
- 22 Si volumen de aceite es alto y proximidad es bajo entonces factor de consecuencia es moderado
- 23 Si sobrecarga es moderado y potencia desconectada es bajo entonces factor de consecuencia es moderado
- 24 Si sobrecarga es bajo y potencia desconectada es moderado entonces factor de consecuencia es moderado
- 25 Si sobrecarga es bajo y potencia desconectada es alto entonces factor de consecuencia es moderado
- 26 Si potencia desconectada es alto y cargas sensibles es bajo entonces factor de consecuencia es moderado
- 27 Si potencia desconectada es muy alto y cargas sensibles es bajo entonces factor de consecuencia es moderado
- 28 Si potencia desconectada es moderado y cargas sensibles es moderado entonces factor de consecuencia es moderado
- 29 Si potencia desconectada es bajo entonces factor de consecuencia es moderado
- 30 Si potencia desconectada es muy bajo entonces factor de consecuencia es moderado
- 31 Si sobrecarga es moderado o potencia desconectada es moderado o cargas sensibles es

- moderado o volumen de aceite es alto o proximidad es alto o penalizaciones es alto entonces factor de consecuencia es alto
- 32 Si volumen de aceite es bajo y proximidad es muy alto entonces factor de consecuencia es alto
- 33 Si volumen de aceite es moderado y proximidad es muy alto entonces factor de consecuencia es alto
- 34 Si volumen de aceite es alto y proximidad es muy bajo entonces factor de consecuencia es alto
- 35 Si sobrecarga es alto y potencia desconectada es muy bajo entonces factor de consecuencia es alto
- 36 Si sobrecarga es alto y potencia desconectada es bajo entonces factor de consecuencia es alto
- 37 Si sobrecarga es alto y potencia desconectada es moderado entonces factor de consecuencia es alto
- 38 Si sobrecarga es moderado y potencia desconectada es moderado entonces factor de consecuencia es alto
- 39 Si sobrecarga es moderado y potencia desconectada es alto entonces factor de consecuencia es alto
- 40 Si potencia desconectada es muy alto y cargas sensibles es moderado entonces factor de consecuencia es alto
- 41 Si potencia desconectada es moderado y cargas sensibles es muy alto entonces factor de consecuencia es alto
- 42 Si sobrecarga es alto o proximidad es muy alto o penalizaciones es muy alto entonces factor de consecuencia es muy alto
- 43 Si sobrecarga es muy alto o potencia desconectada es muy alto entonces factor de consecuencia es muy alto

- 44 Si volumen de aceite es moderado y proximidad es muy alto entonces factor de consecuencia es muy alto
- 45 Si volumen de aceite es alto y proximidad es alto entonces factor de consecuencia es muy alto
- 46 Si volumen de aceite es alto y proximidad es muy alto entonces factor de consecuencia es muy alto
- 47 Si sobrecarga es muy alto y potencia desconectada es muy bajo entonces factor de consecuencia es muy alto
- 48 Si sobrecarga es muy alto y potencia desconectada es bajo entonces factor de consecuencia es muy alto
- 49 Si sobrecarga es muy alto y potencia desconectada es moderado entonces factor de consecuencia es muy alto
- 50 Si sobrecarga es alto y potencia desconectada es alto entonces factor de consecuencia es muy alto
- 51 Si sobrecarga es muy alto y potencia desconectada es alto entonces factor de consecuencia es muy alto
- 52 Si sobrecarga es muy alto y potencia desconectada es muy alto y cargas sensibles es moderado entonces factor de consecuencia es muy alto
- 53 Si sobrecarga es muy alto y potencia desconectada es muy alto y cargas sensibles es muy alto entonces factor de consecuencia es muy alto
- 54 Si sobrecarga es muy alto y potencia desconectada es alto y cargas sensibles es muy alto entonces factor de consecuencia es muy alto

Índice de riesgo

- 1 Si índice de salud es muy bueno y factor de consecuencia es muy bajo entonces índice de riesgo es bajo

- 2 Si índice de salud es muy bueno y factor de consecuencia es bajo entonces índice de riesgo es bajo
- 3 Si índice de salud es muy bueno y factor de consecuencia es moderado entonces índice de riesgo es bajo
- 4 Si índice de salud es muy bueno y factor de consecuencia es alto entonces índice de riesgo es moderado
- 5 Si índice de salud es muy bueno y factor de consecuencia es muy alto entonces índice de riesgo es alto
- 6 Si índice de salud es bueno y factor de consecuencia es muy bajo entonces índice de riesgo es bajo
- 7 Si índice de salud es bueno y factor de consecuencia es bajo entonces índice de riesgo es bajo
- 8 Si índice de salud es bueno y factor de consecuencia es moderado entonces índice de riesgo es moderado
- 9 Si índice de salud es bueno y factor de consecuencia es alto entonces índice de riesgo es moderado
- 10 Si índice de salud es bueno y factor de consecuencia es muy alto entonces índice de riesgo es alto
- 11 Si índice de salud es moderado y factor de consecuencia es muy bajo entonces índice de riesgo es bajo
- 12 Si índice de salud es moderado y factor de consecuencia es bajo entonces índice de riesgo es moderado
- 13 Si índice de salud es moderado y factor de consecuencia es moderado entonces índice de riesgo es alto
- 14 Si índice de salud es moderado y factor de consecuencia es alto entonces índice de riesgo es alto

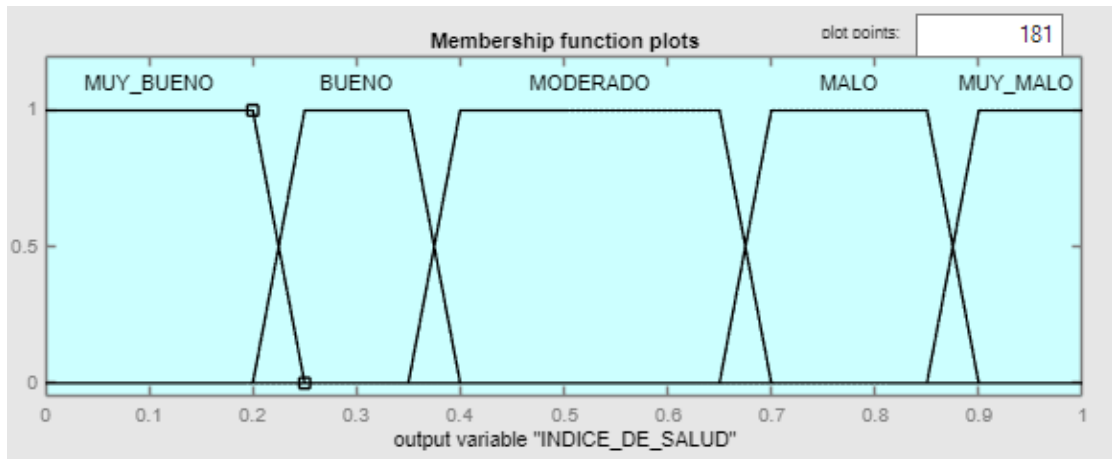
- 15 Si índice de salud es moderado y factor de consecuencia es muy alto entonces índice de riesgo es alto
- 16 Si índice de salud es malo y factor de consecuencia es muy bajo entonces índice de riesgo es moderado
- 17 Si índice de salud es malo y factor de consecuencia es bajo entonces índice de riesgo es moderado
- 18 Si índice de salud es malo y factor de consecuencia es moderado entonces índice de riesgo es alto
- 19 Si índice de salud es malo y factor de consecuencia es alto entonces índice de riesgo es crítico
- 20 Si índice de salud es malo y factor de consecuencia es muy alto entonces índice de riesgo es crítico
- 21 Si índice de salud es muy malo y factor de consecuencia es muy bajo entonces índice de riesgo es alto
- 22 Si índice de salud es muy malo y factor de consecuencia es bajo entonces índice de riesgo es alto
- 23 Si índice de salud es muy malo y factor de consecuencia es moderado entonces índice de riesgo es alto
- 24 Si índice de salud es muy malo y factor de consecuencia es alto entonces índice de riesgo es crítico
- 25 Si índice de salud es muy malo y factor de consecuencia es muy alto entonces índice de riesgo es crítico
- 26 Si índice de salud es muy malo entonces índice de riesgo es crítico
- 27 Si factor de consecuencia es muy alto entonces índice de riesgo es crítico
- 28 Si índice de salud es muy bueno y factor de consecuencia es muy alto entonces índice

de riesgo es bajo

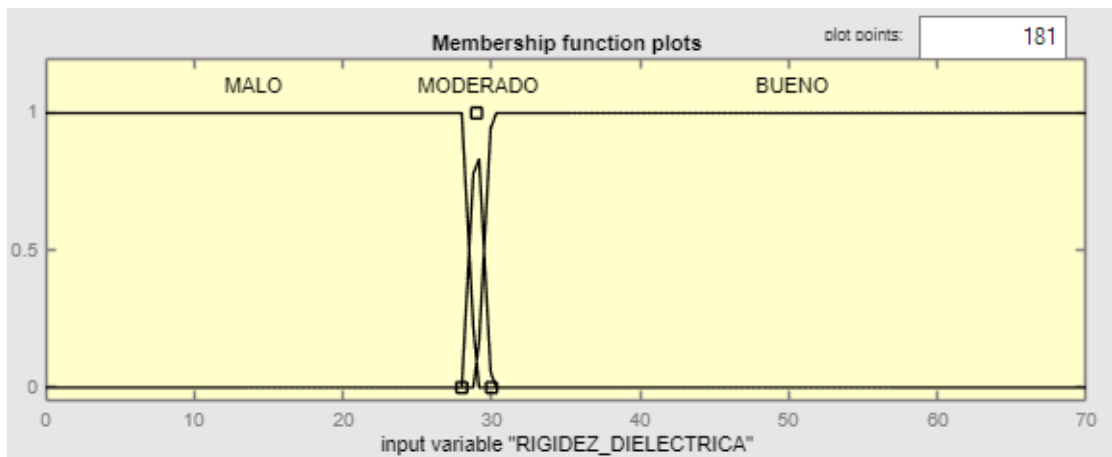
29 Si índice de salud es muy malo y factor de consecuencia es muy bajo entonces índice de riesgo es bajo

ANEXO B

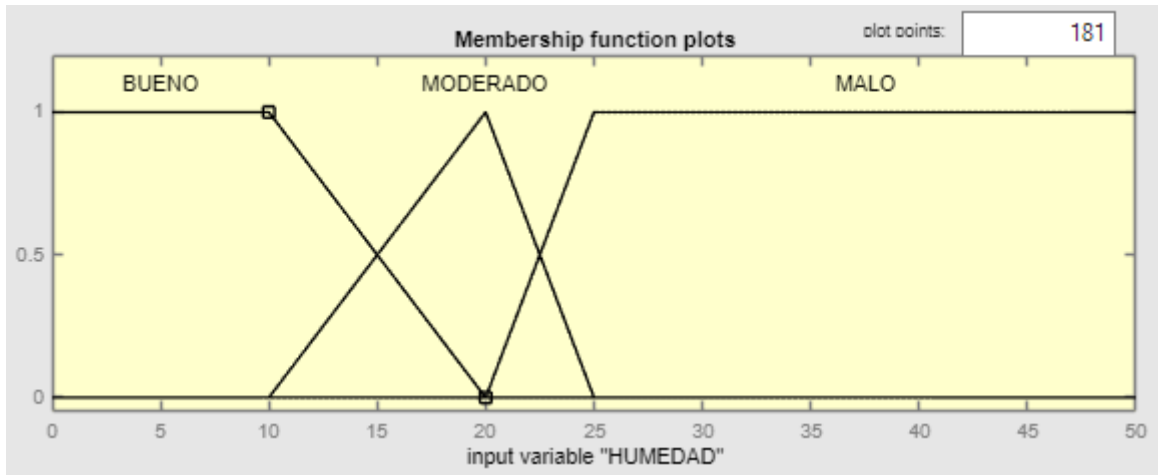
En este anexo se presentan las funciones de membresía para los parámetros del índice de salud, factor de consecuencia e índice de riesgo utilizadas en este proyecto.



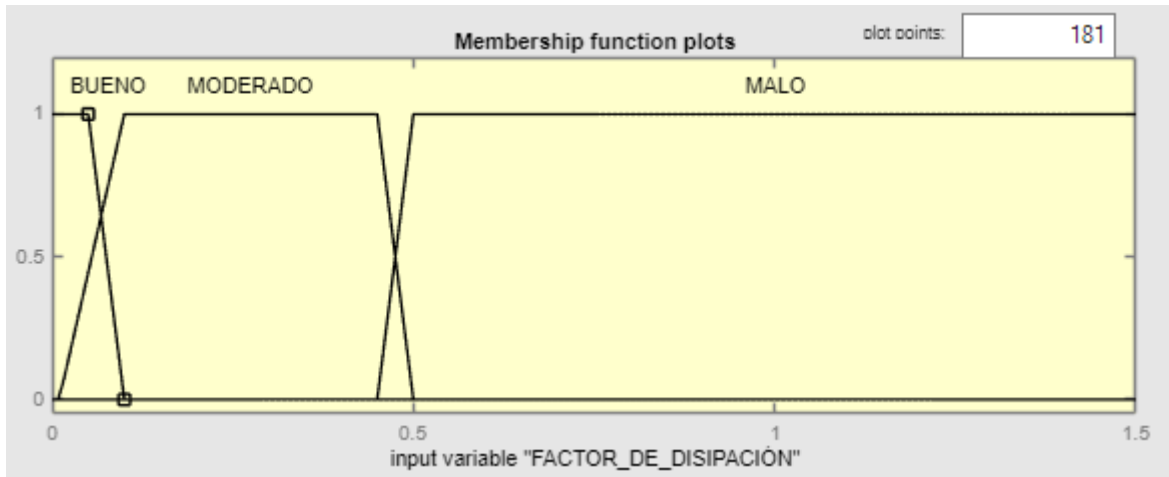
A 1 Función de membresía para la evaluación del índice de salud



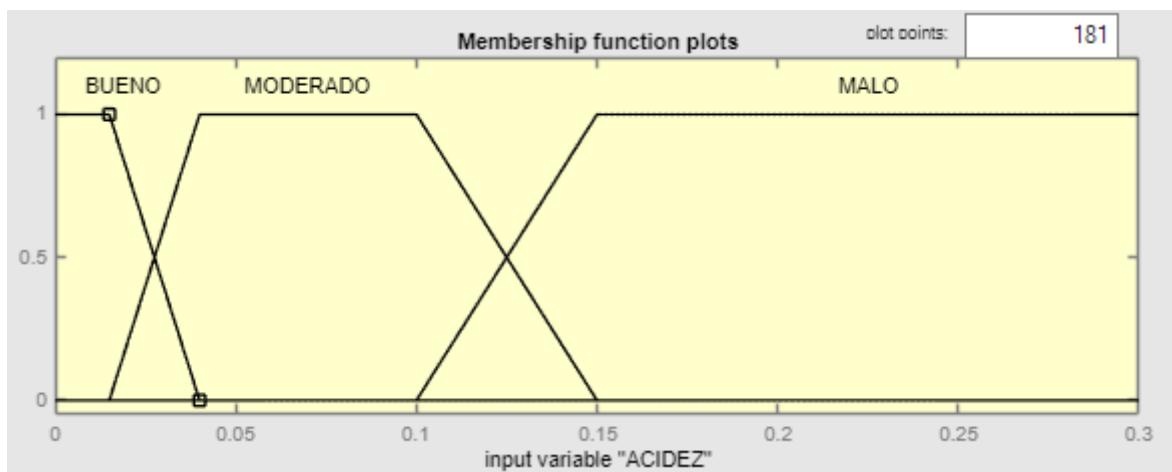
A 2 Función de membresía de la rigidez dieléctrica



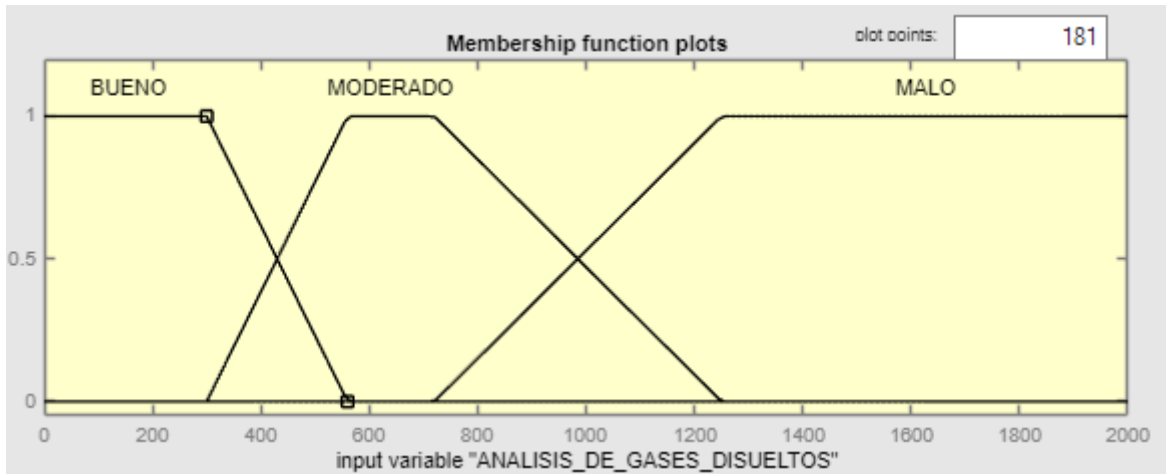
A 3 Función de membresía para el contenido de humedad



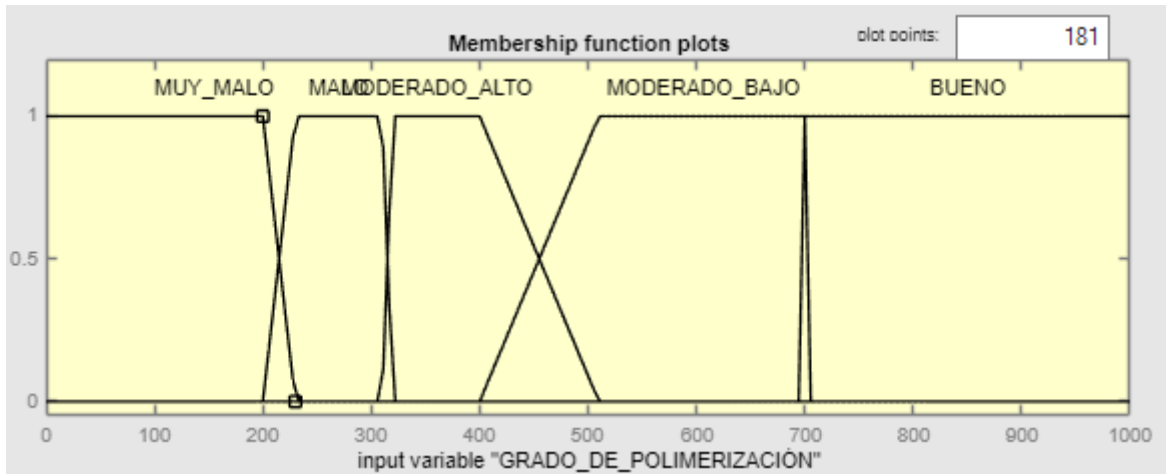
A 4 Función de membresía para el factor de disipación



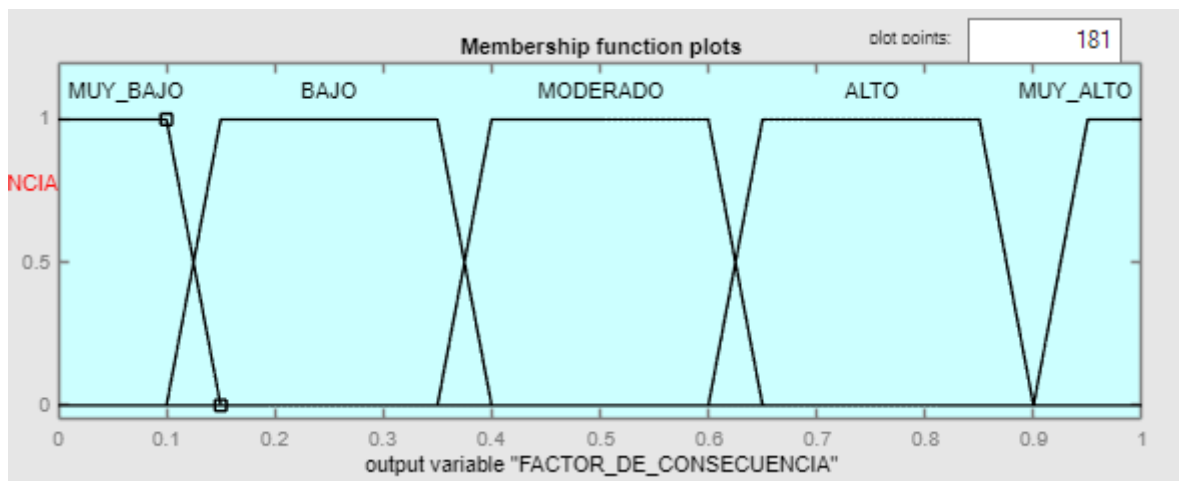
A 5 Función de membresía para la acidez



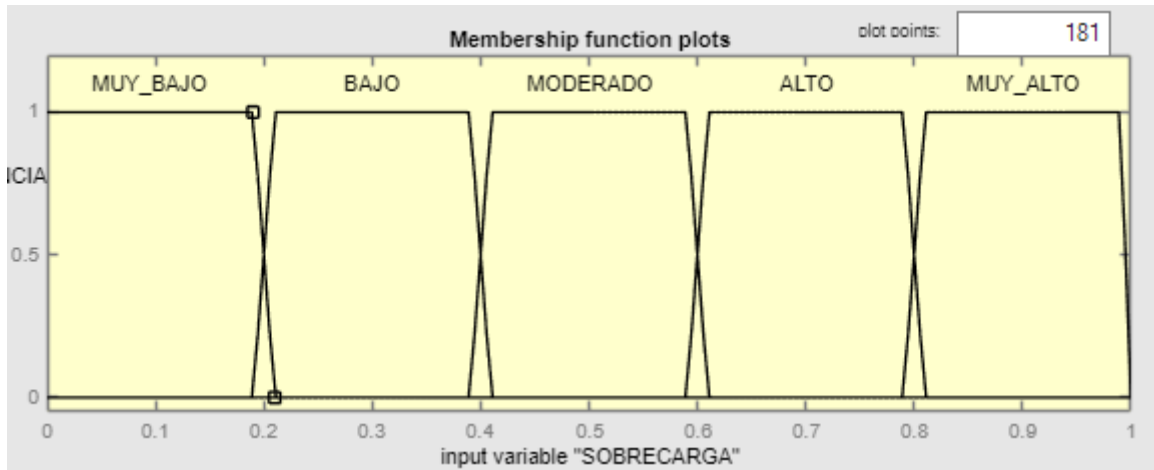
A 6 Función de membresía para el análisis de gases disueltos



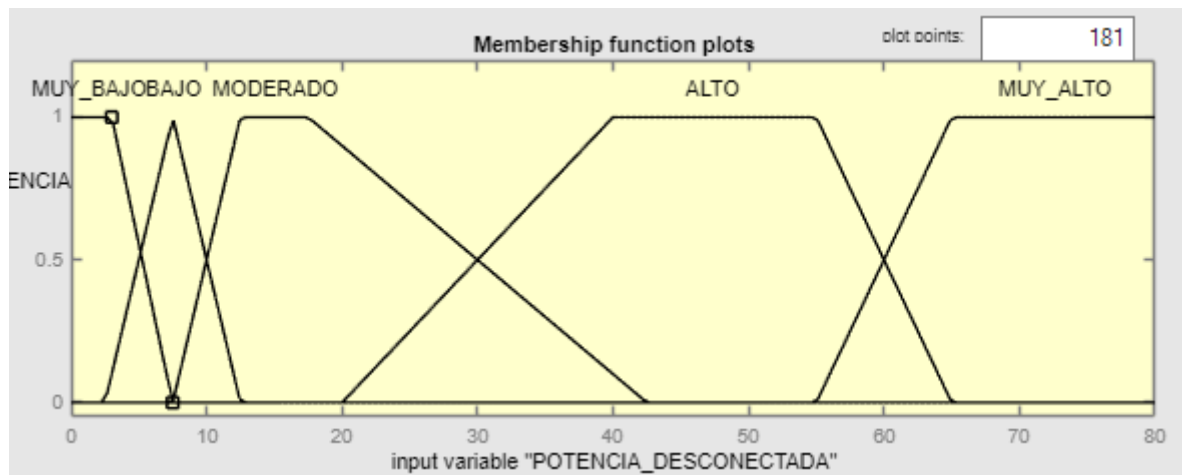
A 7 Función de membresía para el grado de polimerización



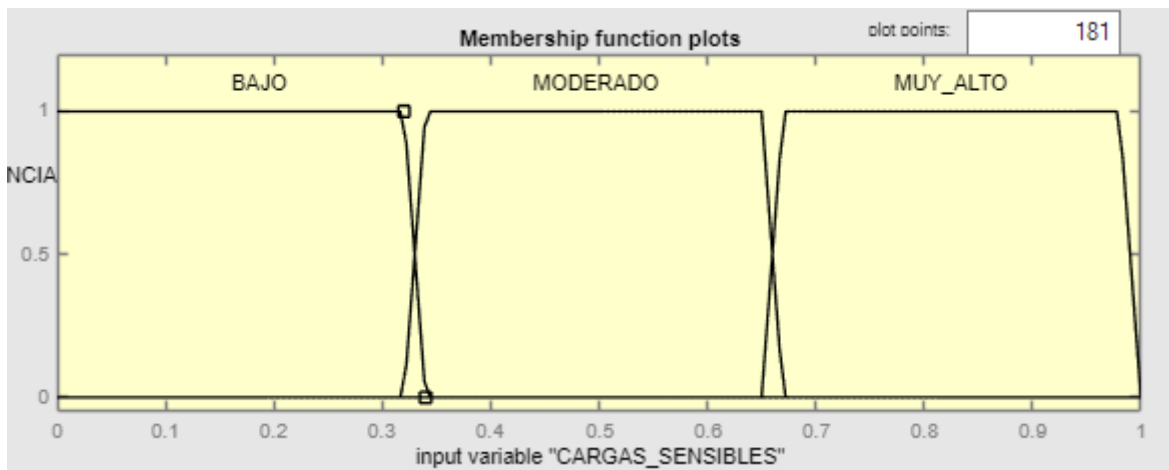
A 8 Función d membresía para el factor de consecuencia



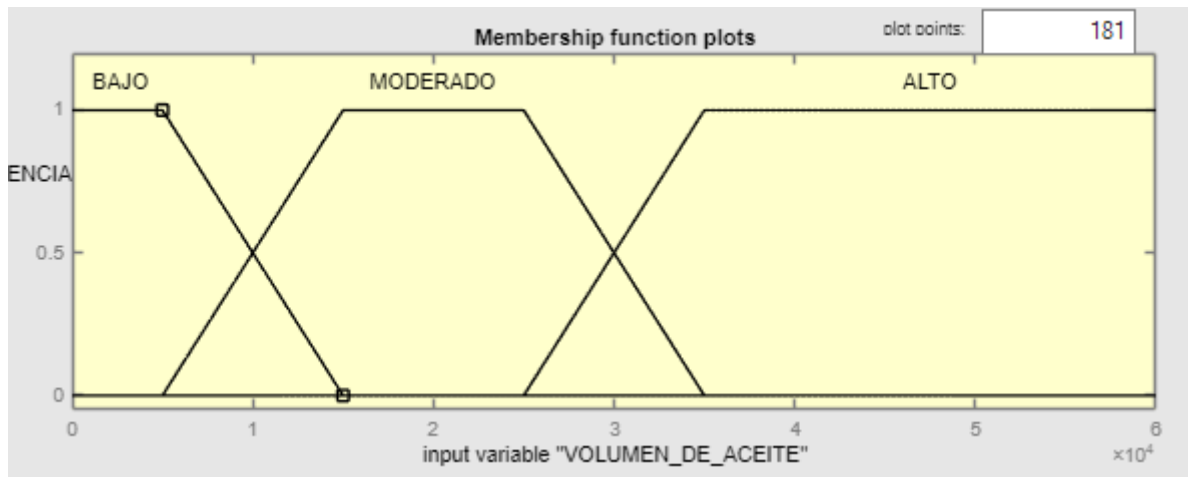
A 9 Función de membresía para la sobrecarga a otros equipos



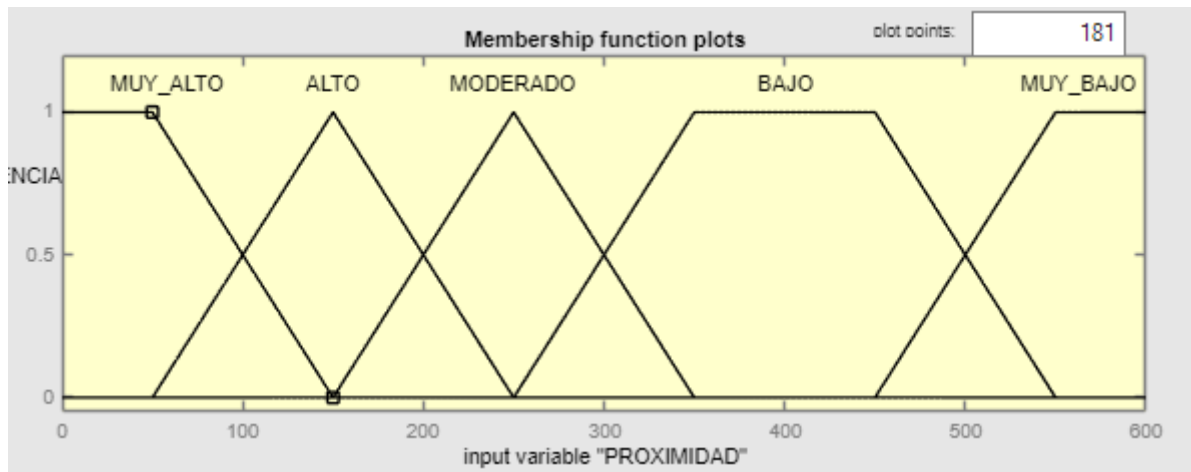
A 10 Función de membresía para la potencia desconectada



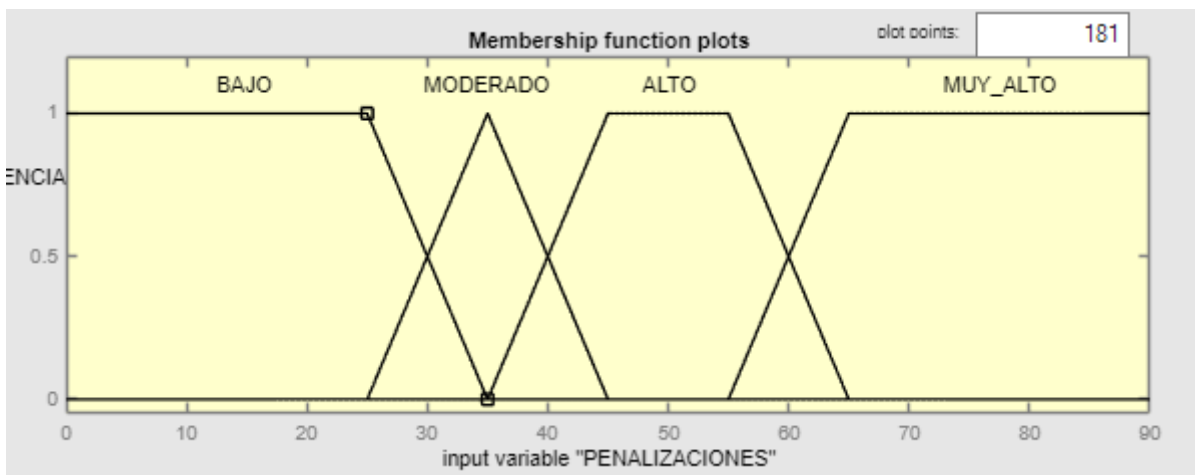
A 11 Función de membresía para las cargas sensibles



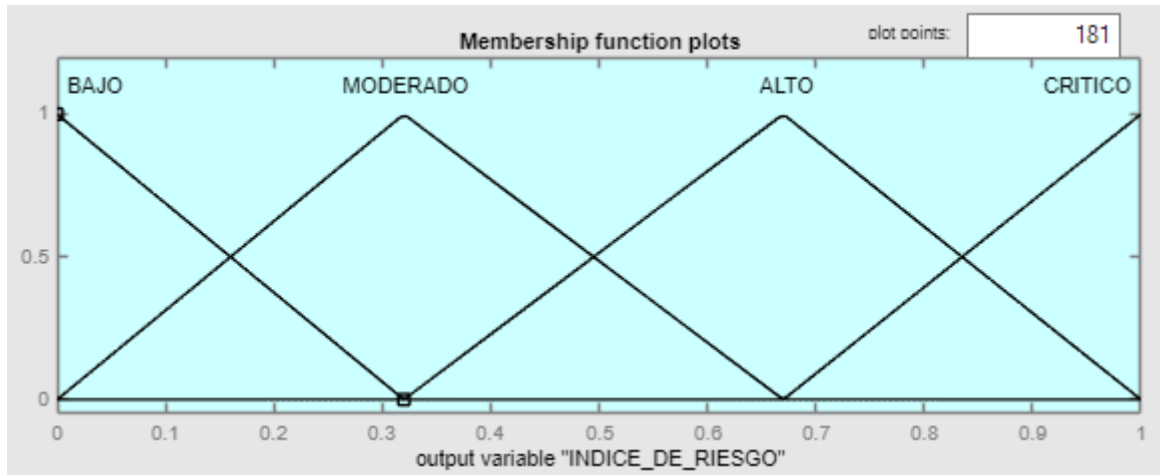
A 12 Función de membresía para el volumen de aceite



A 13 Función de membresía para la proximidad a otras construcciones



A 14 Función de membresía para las penalizaciones



A 15 Función de membresía para el índice de riesgo