



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales No Renovables

Maestría en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Sistema de inferencia de lógica difusa para la evaluación del riesgo de transformadores de distribución del alimentador Pío Jaramillo de la ciudad de Loja.

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

AUTOR:

Ing. Juan Pablo Gutiérrez Celi

DIRECTOR:

Ing. Julio Cesar Cuenca Tinitana Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2022

Certificación

Loja, 03 de octubre de 2022

Ing. Julio Cesar Cuenca Tinitana Mg. Sc.
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico:

C E R T I F I C O:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Sistema de inferencia de lógica difusa para la evaluación del riesgo de transformadores de distribución del alimentador Pío Jaramillo de la ciudad de Loja.**, previo a la obtención del título de **Magister en Electricidad. Mención Sistemas Eléctricos de Potencia**, de la autoría del estudiante, **Gutiérrez Celi, Juan Pablo** con cédula de identidad **Nro.1105333783** una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.



Firmado electrónicamente por:
**JULIO CESAR
CUENCA
TINITANA**

Ing. Julio Cesar Cuenca Tinitana Mg. Sc.
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Juan Pablo Gutiérrez Celi**, declaro ser autor del trabajo de investigación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación del trabajo de titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula de Identidad: 1105333783

Fecha: 4/10/2022

Correo electrónico: juan.p.gutierrez@unl.edu.ec

Teléfono: 0984245565

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

Yo, **Juan Pablo Gutiérrez Celi**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Sistema de inferencia de lógica difusa para la evaluación del riesgo de transformadores de distribución del alimentador Pío Jaramillo de la ciudad de Loja**, como requisito para optar el título de **Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

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

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

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

Firma:

Autor: Ing. Gutiérrez Celi, Juan Pablo

Cédula: 1105333783

Dirección: La Argelia

Correo electrónico: juan.p.gutierrez@unl.edu.ec

Teléfono: 0984245565

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de trabajo de investigación: Ing. Cuenca Tinitana, Julio Cesar Mg. Sc.

Dedicatoria

Principalmente dedico este trabajo de investigación a Dios, siempre acudí a él en todo momento cuando llegaban tiempos difíciles. A mi madre Miryam y padre Romel que me han apoyado en todo momento para poder llegar a obtener este nuevo objetivo. A mi hermano mayor Javier que siempre fue mi guía para este camino a donde pienso llegar. A mi hermano menor que fue quien me brindaba su apoyo de manera emocional y me permitió culminar de mejor manera este objetivo. A mis dos abuelitas que siempre con su bendición hicieron que esta meta planteada no le haya faltado nada.

Juan Pablo Gutiérrez Celi

Agradecimiento

Agradezco a mis familiares que me brindaron su apoyo en todo momento, a mis amigos que aportaron de manera directa e indirectamente su granito de arena, a los docentes que impartieron sus conocimientos en cada asignatura brindada. Finalmente quiero agradecer a la Universidad Nacional de Loja por permitirme obtener de mejor manera este nuevo objetivo.

Juan Pablo Gutiérrez

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas	ix
Índice de Figuras	x
Índice de Anexos	xi
1. Título	1
2. Resumen	2
2.1 Abstract.....	3
3. Introducción	4
3.1. Objetivo general.....	4
3.2. Objetivos específicos.....	5
4. Marco teórico	6
4.1. Sistemas eléctricos de distribución.....	7
4.1.1. Transformadores de distribución.....	7
4.1.2. Normas técnicas para el diseño de redes eléctricas por parte de la EERSSA	8
4.2. Lógica difusa.....	9
4.2.1. Funciones de membresía	9
4.2.2. Factor de consecuencia.....	10
4.2.3. Índice de salud	11
4.2.4. Índice de riesgo	11
4.3. Trabajos relacionados	12
5. Metodología	13

5.1. Área de estudio	13
5.2. Procesamiento y análisis de datos	15
5.3. Inferencia de lógica difusa para la evaluación del índice de riesgo.....	15
5.3.1. Sistema de inferencia de lógica difusa para la evaluación del índice de salud.....	15
5.3.2. Sistema de inferencia de lógica difusa para la evaluación del factor de consecuencia.	18
5.3. Codificación en MatLab.....	20
6. Resultados	22
7. Discusión	26
8. Conclusiones	27
9. Recomendaciones	28
10. Bibliografía	29
11. Anexos	30

Índice de tablas

Tabla 1.	Clasificación de los transformadores de distribución comerciales	8
Tabla 2.	Factor de sobrecarga de los transformadores de distribución	9
Tabla 3.	Características del alimentador Pío Jaramillo	14
Tabla 4.	Clasificación de los transformadores por edad.....	16
Tabla 5.	Clasificación de los transformadores por cargabilidad	16
Tabla 6.	Clasificación de los transformadores por índice de salud.....	17
Tabla 7.	Clasificación de los transformadores por su capacidad (kVA)	18
Tabla 8.	Clasificación de los transformadores por factor de consecuencia	19
Tabla 9.	Clasificación por factor índice de riesgo.....	22
Tabla 10.	Clasificación por factor índice de riesgo.....	24

Índice de Figuras

Figura 1. Funcionamiento de un sistema de control difuso (Wikipedia, 2022).	9
Figura 2. Función de membresía triangular	10
Figura 3. Función de membresía trapezoidal	10
Figura 4. Posibles resultados del índice de riesgo	11
Figura 5. Diagrama de bloques de la herramienta Fuzzy Logic	13
Figura 6. Área del alimentador Pío Jaramillo	14
Figura 7. Función de membresía de la variable edad.	16
Figura 8. Función de membresía de la variable cargabilidad	17
Figura 9. Función de membresía de la variable índice de salud	17
Figura 10. Superficie de la variable índice de salud.	18
Figura 11. Función de membresía de la variable capacidad	19
Figura 12. Función de membresía de la variable factor de consecuencia	19
Figura 13. Superficie del factor de consecuencia.	20
Figura 14. Función de membresía de la variable índice de riesgo	22
Figura 15. Superficie del índice de riesgo.	23
Figura 16. Superficie del factor de consecuencia.	23
Figura 17. Diagrama de bloques del sistema	21
Figura 18. Porcentaje de transformadores con respecto al índice de riesgo.	25

Índice de Anexos

Anexo 1: base de datos del alimentador Pío Jaramillo.....	30
Anexo 2: código fuente.....	35
Anexo 3: reglas de inferencia.....	36
Anexo 4: clasificación de los transformadores por el índice de riesgo.....	37
Anexo 5. Certificación de traducción del resumen	40

1. Título

Sistema de inferencia de lógica difusa para la evaluación del riesgo de transformadores de distribución del alimentador Pío Jaramillo de la ciudad de Loja

2. Resumen

El presente trabajo de investigación utiliza la metodología de inferencia de lógica difusa para determinar el índice de riesgo que existen en transformadores de distribución del alimentador Pío Jaramillo de la ciudad de Loja. Para este estudio se analizan las variables que tienen más impacto en la vida útil de los transformadores como es el caso de la cargabilidad actual, edad de las unidades y la capacidad que tiene cada transformador. Mediante la herramienta Fuzzy Logic ToolBox del software MatLab se analiza los diferentes resultados de acuerdo a las reglas establecidas para cada caso. Así mismo, se establecen las funciones de membresía para cada variable de entrada y salida. Finalmente, se compara los resultados en cada transformador para encontrar la relación que existe entre las variables seleccionadas y el índice de riesgo en cada unidad.

Palabras claves: Fuzzy, Matlab, transformador, índice de riesgo, índice de salud, factor de consecuencia.

2.1 Abstract

This research uses the fuzzy logic inference methodology to determine the risk index of the Pío Jaramillo feeder line distribution transformers in the city of Loja. For this study, the variables that have more impact on the useful life of the transformers are analyzed, such as the current loadability, age of the units, and the capacity of each transformer. Using the Fuzzy Logic ToolBox of MatLab software, the different results are analyzed according to the rules established for each case. Likewise, the membership functions for each input and output variable are established. Finally, the results are compared in each transformer to find the relationship between the selected variables and the risk index in each unit.

Keywords: Fuzzy, Matlab, transformer, risk index, health index, consequence factor.

3. Introducción

Debido a la gran importancia que han tenido los transformadores de distribución dentro de un sistema eléctrico de potencia (SEP) ha surgido la necesidad de tener un sistema de distribución confiable y con un alto grado de disponibilidad. De igual manera, la energía que recibe el usuario final debe pretender ser de alta calidad, evitando pérdidas y caídas de tensión.

Los transformadores de distribución contemplan un alto grado económico en el subsistema de distribución por lo que al existir algún fallo provocará perjuicios económicos tanto a la entidad distribuidora como a los usuarios. Por tal motivo, para la entidad encargada de la administración y mantenimiento de los transformadores de distribución, resulta de gran utilidad disponer de herramientas que permitan evaluar el estado y condición de las unidades que se encuentran en operación.

En la actualidad, diversas metodologías han sido inmersas en el campo de la energía eléctrica para evaluar el estado de los centros de transformación, como es el caso de la lógica difusa que permite convertir resultados numéricos en simples etiquetas que serán analizadas mediante reglas de criterio y tener a la salida una o varias variables de fácil interpretación.

Para este trabajo se plantea desarrollar una herramienta basada en la metodología de lógica difusa que permita evaluar las condiciones y el índice de riesgo de los transformadores de distribución del alimentador Pío Jaramillo perteneciente a la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (EERSSA) de la ciudad de Loja. La edad, capacidad y cargabilidad serán las variables principales por analizar ya que, por lo general, los equipos eléctricos tienden a deteriorarse al cumplir con su vida útil.

Con los resultados obtenidos, la entidad responsable podrá enfocarse en los transformadores que necesiten de mayor atención en mantenimiento, economizando recursos y ampliando la vida útil de cada unidad.

Para alcanzar los resultados anteriormente mencionados se proponen los siguientes objetivos:

3.1. Objetivo general

Desarrollar una herramienta utilizando lógica difusa para evaluar el estado de funcionamiento de los transformadores de distribución del alimentador Pío Jaramillo de la ciudad de Loja.

3.2. Objetivos específicos

Seleccionar las variables necesarias para el análisis del índice de riesgo, factor de consecuencia e índice de salud de los transformadores de distribución del alimentador Pío Jaramillo de la ciudad de Loja.

Establecer las reglas de inferencia, en la herramienta Fuzzy Logic, para determinar el índice de salud de cada transformador del alimentador Pío Jaramillo de la ciudad de Loja.

Deducir la relación que existe entre las variables de análisis seleccionadas para obtener el índice de salud de cada transformador del alimentador Pío Jaramillo de la ciudad de Loja.

4. Marco teórico

En la actualidad, la electricidad es la principal fuente de energía de las áreas productivas y residenciales. Por lo tanto, el suministro de electricidad debe satisfacer de manera eficiente todas las áreas de servicio. Para ello se cuenta con sistemas eléctricos de potencia (SEP) los cuales están encargados de la generación, transmisión y distribución del suministro eléctrico.

La generación es la etapa que se encarga de transformar la energía primaria tales como energía eólica, hidráulica, térmica, solar, etc., en energía eléctrica. El principio de generación es igual en todos los sistemas a excepción de la energía solar que utiliza la radiación solar como fuente primaria de energía. Los demás métodos se basan en la conversión de energía electromecánica, donde los elementos encargados de convertir la energía primaria en energía mecánica son las turbinas y los motores impulsores, mientras que para convertir la energía mecánica en energía eléctrica se denominan generadores eléctricos (Matulic, 2003).

La segunda etapa se denomina transmisión y se basa en transmitir grandes cantidades de energía eléctrica desde los centros de generación hasta las subestaciones ubicadas estratégicamente. Los niveles de voltaje en Ecuador para transmisión son de 500kV, 230kV, y 138kV para distancias largas y 69kV para distancias relativamente cortas (Granda & Arcos, 2007).

La última etapa de un SEP se basa en la distribución de energía eléctrica mediante los transformadores de distribución hasta los usuarios finales. Su función principal es reducir la tensión de distribución a una tensión que pueda ser usada por el cliente final. Generalmente los valores de tensión suelen ser 480 V, 220 V y 127 V (EERSSA, 2012).

Las instalaciones de los transformadores de distribución se clasifican según sea su capacidad. En la ciudad de Loja la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (EERSSA), según su normativa vigente, determina que los transformadores con capacidades hasta los 75 kVA deben ser instalados en estructuras de un solo poste, hasta los 200 kVA deben ser instalados en estructuras denominados “castillos” conformados por dos postes y finalmente para potencias mayores a 200 kVA los transformadores deben ser instalados en cámaras de transformación (EERSSA, 2012).

Existen factores en los transformadores tales como la edad, cargabilidad o su capacidad que pueden influir directa o indirectamente en la vida útil de cada unidad, así mismo en la probabilidad de que ocurra una falla en los mismos. Analizar estos factores puede inferir de manera

eficiente en el suministro de energía, así mismo, inferir en la parte económica ya que una falla en un transformador implica asumir elevados costos (Álvarez & Pozo, 2007).

4.1. Sistemas eléctricos de distribución

La distribución es la última etapa en un SEP, conformado por elementos que se encargan de conducir la energía eléctrica desde una subestación de potencia hasta el usuario final (Morón, 2021). El sistema de distribución comprende las líneas primarias y secundarias de distribución, transformadores de distribución, acometidas y medidores.

La etapa de distribución debe ser realizada de forma que el cliente final reciba un servicio de calidad, es decir, de forma continua, evitando interrupciones, con valores de tensión ideales para poder utilizar dispositivos eléctricos. A esto se suma que las ondas sinusoidales deben ser puras evitando que existan armónicos en la señal.

Los sistemas eléctricos de distribución pueden ser clasificados de acuerdo a su construcción como pueden ser aéreos, subterráneos y mixtos. La construcción de estos sistemas eléctricos se mostrará más a detalle en el apartado 4.1.2.

4.1.1. Transformadores de distribución

Este trabajo de investigación se basa principalmente en el análisis de los transformadores de distribución, es por eso que se realizará mayor énfasis en este elemento. Son equipos que se encargan de cambiar los valores de tensión de la red primaria a valores de tensión menor, convirtiéndose en red secundaria (Pérez, 2020). Estos equipos permiten que el cliente final pueda utilizar la energía eléctrica de manera directa, es decir, que no necesita de equipos extras.

En la 0 se clasifican los transformadores de distribución en trifásicos, con capacidades que van desde los 15kVA hasta los 300kVA, y monofásicos, con capacidades entre 3kVA hasta 333kVA. La capacidad de estos se selecciona en base a la carga a instalarse y siempre teniendo en cuenta el factor de demanda que es la suma de la demanda máxima y la carga total que se encuentra conectada en el sistema, y factor de coincidencia que es el porcentaje promedio de la demanda máxima individual que es coincidente en el momento de la demanda máxima (Morón, 2021).

Tabla 1.

Clasificación de los transformadores de distribución comerciales

Capacidad de transformadores de distribución (kVA)	
Trifásicos	Monofásicos
15	3
30	5
50	10
75	15
100	25
112.5	37.5
125	50
150	75
200	100
250	167
300	333

Fuente. Datos tomados de ECUATRAN publicada el 2017/02

4.1.2. Normas técnicas para el diseño de redes eléctricas por parte de la EERSSA

En la ciudad de Loja la entidad encargada en la distribución de la energía eléctrica es Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. EERSSA. Esta entidad tiene sus propias normas técnicas para la construcción de redes eléctricas y centros de transformación.

La EERSSA maneja un nivel de media tensión en redes primarias de 13.8/7.97 kV en la zona de Loja y un nivel de media tensión de 22/12.7 kV para la zona Oriental que comprende a Zamora Chinchipe y el cantón Gualaquiza de la provincia de Morona Santiago. En cuanto a las redes secundarias, la EERSSA utiliza redes monofásicas de distribución con niveles de 240/120 V y sistemas trifásicos de distribución con niveles de 220/127 V.

Los transformadores de distribución deben cumplir con las normas NTW INEN 2114 y 2115, mismas que especifican las máximas pérdidas admisibles en transformadores tanto monofásicos como trifásicos. Se debe tener en consideración el factor de sobrecarga, definida como la carga promedio entre la carga máxima en un periodo de tiempo específico. En la Tabla 2 se detallan las categorías de acuerdo al tipo de usuario con su respectivo factor de sobrecarga, empezando con la categoría A que tiene el factor de sobrecarga más elevado con un valor de 0.9 y las categorías D, E, F, G y H con el factor de sobrecarga con un valor de 0.7 siendo este el más bajo de todas las categorías.

Tabla 2.

Factor de sobrecarga de los transformadores de distribución

Categoría	FS
A	0.9
B – C	0.8
D – H	0.7

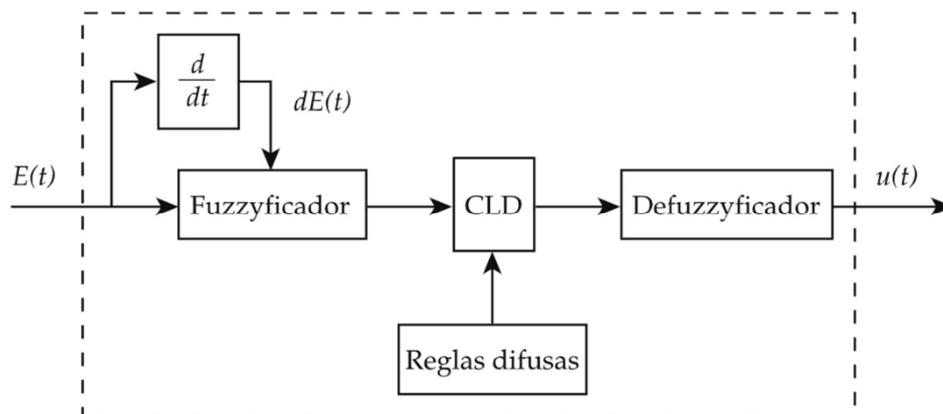
4.2. Lógica difusa

Es una metodología que proporciona una manera más simple de obtener una conclusión a partir de la entrada de datos con un alto grado de incertidumbre. Esta técnica es una rama de la inteligencia computacional y tiene la ventaja de que puede ser implementada tanto en hardware como en software (Eduardo & De Vito, 2006).

La lógica clásica cuenta con dos posibles respuestas: verdadero o falso, incluso existen otras lógicas donde introducen un tercer valor posible denominado “indeterminado” (Mendoza Saboya, 2009). La lógica difusa es un tipo de lógica multivaluada y tiene la principal característica de que intenta cuantificar esta incertidumbre. Este método realiza cálculos en un sistema de control con base a reglas heurísticas.

Figura 1.

Diagrama de bloques de un controlador difuso genérico (Guzmán & Castaño, 2006).

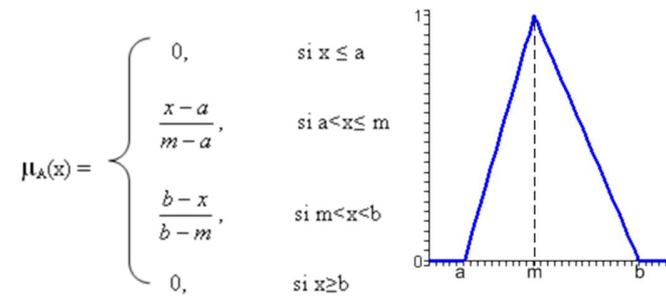


4.2.1. Funciones de membresía

Estas funciones representan el grado de pertenencia de un subconjunto definido por una etiqueta y generalmente pueden ser de tipo triangular y trapezoidal, de acuerdo al conjunto al que pertenezca.

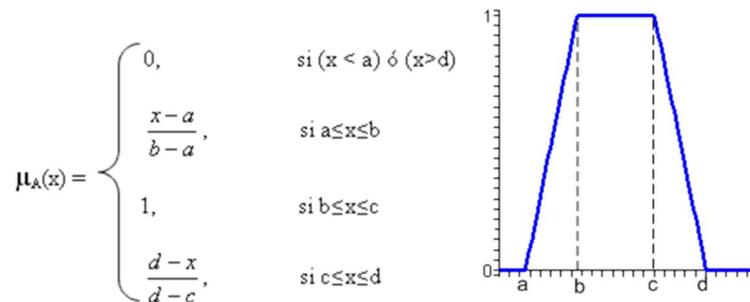
La función triangular como su nombre lo indica, es muy parecida a una figura triangular que no tiene porqué ser simétrica y es definida por el límite inferior a , el superior b y el valor modal como se puede observar en la Figura 2.

Figura 2.
Función de membresía triangular



La función trapezoidal está definida por el límite inferior a , el superior d y los límites de soporte inferior b y superior c como se observa en la Figura 3. Para esta función es necesario que los valores tanto de b y c sean diferentes ya que al ser iguales formarían una función triangular.

Figura 3.
Función de membresía trapezoidal



4.2.2. Factor de consecuencia

Se basa principalmente en el análisis técnico-económico donde se deduce que todo activo fallará en un futuro y este tendrá consecuencias económicas cuantificables. Se debe tener en cuenta que, para esta investigación, el factor de consecuencia dependerá de cada transformador debido a las características propias de los mismos.

Este factor se lo analiza ya que se pueden reducir notablemente pérdidas económicas al realizar una inferencia a los transformadores que se encuentran deteriorados y se puede apreciar que variable es la que tiene mayor influencia.

4.2.3. Índice de salud

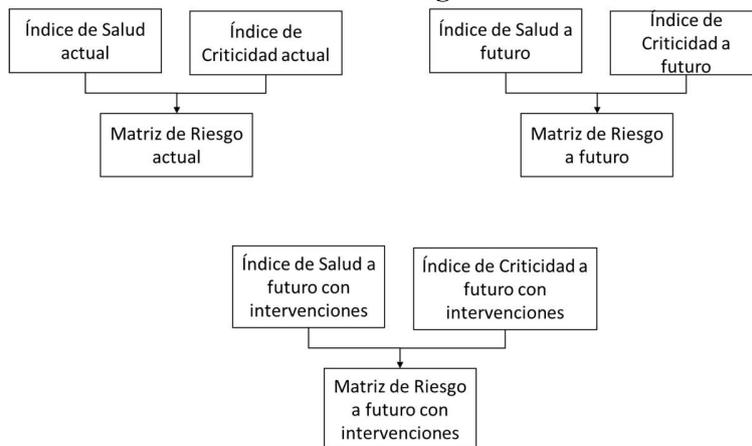
El índice de salud hace referencia a la salud y a la probabilidad de que exista una falla en un activo (Flor Gómez, 2018). En base a las variables seleccionadas edad y cargabilidad se puede llegar a una respuesta sobre el nivel de salud de un transformador. Este índice puede verse afectado por circunstancias que pueden ser controladas como la cargabilidad de los mismos transformadores o por circunstancias que no pueden ser controladas como la edad de los mismos. Con estas variables se puede obtener un índice cuantitativo que representa el estado general de salud del transformador.

De acuerdo a la normativa de la EERSSA los transformadores tienen una edad proyectada de hasta 10 años. En cuanto a la cargabilidad, los transformadores no pueden sobrepasar el nivel máximo que estos soportan. Todos estos puntos pueden afectar al estado de la unidad.

4.2.4. Índice de riesgo

Se entiende como índice de riesgo al parámetro de medida del riesgo que se obtiene a partir de la probabilidad de que ocurra algún riesgo determinado por la intensidad de los daños ocasionados. Este índice de riesgo se lo obtiene a partir del índice de salud y el factor de consecuencia. Por lo que en los apartados anteriores se deben escoger las variables más críticas para ser analizadas. Se puede en la Figura 4 los resultados esperados tales como los riesgos actuales que están ligados al índice de salud actual y el índice de criticidad actual. Así mismo se espera una respuesta para un futuro normal y un futuro con intervenciones.

Figura 4.
Posibles resultados del índice de riesgo



Fuente: (Kirylychik Yevmenchik, 2017)

4.3. Trabajos relacionados

Este trabajo irá enfocado en analizar el índice de riesgo que existen en el alimentador Pío Jaramillo de la ciudad de Loja mediante lógica difusa, es por eso que se revisaron los trabajos (Cerón et al., 2015), (Borja Arbito, 2019) y (Lata Cando, 2022) ya que utilizan esta metodología para la obtención de sus resultados.

Los trabajos revisados en (Montané García et al., 2019) y (Parraga Acosta, 2019) se enfocan en las edades de los transformadores de distribución como variables principales para el análisis y mejor visión del índice de salud de los mismos y así poder jerarquizarlos.

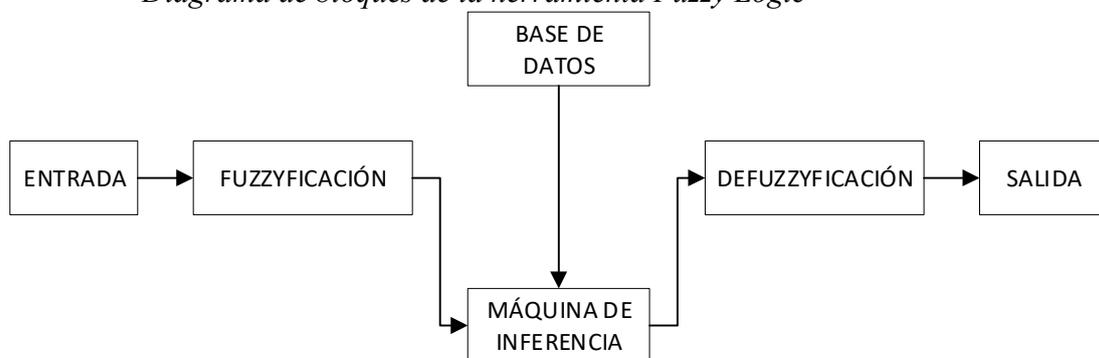
Existen otras investigaciones como la revisada en (Farfán Minchala & Marín Zúñiga, 2017) donde toma en consideración normas vigentes para la consideración de las variables de estudio. Por otro lado, el trabajo realizado en (Fernández Blanco et al., 2021) se enfoca en los sistemas conocidos como El Triángulo de Duval, IEC y el método de Rogers como alternativas para el análisis de gases disueltos en el aceite de los transformadores de potencia.

Finalmente, se analizó el trabajo (Valencia García) ya que este presenta un análisis estadístico de las fallas en los transformadores. El trabajo de investigación realizado permite analizar las causas de las fallas a cualquier interesado en el sector eléctrico. A diferencia de otros trabajos, esta investigación relaciona las variables edad, cargabilidad y capacidad de manera conjunta para poder ver cuál de ellas tiene más incidencia en el deterioro de la vida útil de los transformadores seleccionados con datos reales y actuales.

5. Metodología

Para el desarrollo de este tema de investigación se establece como principal herramienta Fuzzy Logic ToolBox del software MatLab. Esta herramienta permite analizar, diseñar y simular sistemas basados en lógica difusa. Además, permite ingresar la base de datos de manera más sencilla y evaluar las variables deseadas. El sistema de la herramienta Fuzzy Logic se basa en la entrada de las variables seleccionadas por el usuario las cuales pasan por una etapa de fuzzificación donde convierte valores numéricos a difusos. En este proceso se asignan grados de pertenencia a las variables de entrada seleccionadas con relación a los conjuntos difusos previamente definidos (Hernández & Valdés, 2016). Estas entradas pueden tener diferentes cualificaciones y varias categorías. Una vez realizado este paso el sistema realiza procesos de inferencia donde la base de datos es fundamental para correlacionar las variables. En esta etapa intervienen las reglas de inferencia que deben ser escogidas adecuadamente para cada variable de salida determinada ya que estas reglas permiten obtener el grado de certidumbre de los resultados finales. Por último, el sistema procede a la defuzzificación obteniendo una salida en formato numérico de cada variable introducida. Este proceso se lo puede ver detallado en la Figura 5.

Figura 5.
Diagrama de bloques de la herramienta Fuzzy Logic



5.1. Área de estudio

En la ciudad de Loja, las redes eléctricas se encuentran divididas por varias subestaciones y alimentadores. Para el presente trabajo de investigación se estableció como área de estudio el alimentador Pío Jaramillo con código 1800200T12 que se conecta a la subestación SUR. Este alimentador está constituido por 176 transformadores de los cuales 172 se encuentran en actual funcionamiento y se distribuyen en 164 monofásicos representados con un triángulo blanco, 10 trifásicos representados con un triángulo negro y 2 bancos de dos transformadores como se observa

en la Figura 6. El área de estudio constituye aproximadamente 2495253 metros cuadrados de extensión. Las características principales del alimentador se lo detallan en la Tabla 3.

Figura 6.
Área del alimentador Pío Jaramillo



Fuente: EERSSA

Tabla 3.
Características del alimentador Pío Jaramillo

Alimentador Pío Jaramillo	
Número de transformadores	172
Capacidad	10-15-25-30-37.5-45-50-75-100
Edad de transformadores	1980 hasta 2022
Potencia (kVA)	4830
Número de clientes	4888

Se escogió principalmente este alimentador ya que existen algunos transformadores que sobrepasan los 10 años de vida útil y que sin embargo siguen en funcionamiento. Así mismo, existen transformadores que se encuentran al borde de ser sobrecargados. Por estos motivos este alimentador es el ideal para esta investigación.

5.2. Procesamiento y análisis de datos

Gracias al sistema SIG de la EERSSA se puede obtener una base de datos específica del alimentador Pío Jaramillo. Este alimentador cuenta con 176 transformadores de los cuales se despreciaron 6 ya que se encuentran en funcionamiento, pero no tienen una carga conectada. De los 172 transformadores restantes se dividen en 164 monofásicos, 10 trifásicos y 2 bancos de transformadores.

Para este trabajo se han seleccionado las variables de edad (años) para poder deducir la vida útil que tiene cada unidad o si ya ha llegado a su límite de funcionamiento, y las variables capacidad (kVA) con cargabilidad (%) para poder deducir si existe una relación directa entre ellas, así mismo, verificar la hipótesis de que un transformador disminuye su vida útil al encontrarse sobrecargado.

En un análisis general se puede observar que existen transformadores que sobrepasan los 10 años como es el caso de las unidades con numeración 39, 142, 143, 147, OID279 y OID1649 que cuentan con una edad de 43 años siendo los más antiguos en la base de datos. Así mismo, existen transformadores como lo son las unidades 8135, 17404 y 16953 que estén con una cargabilidad superior al cien por ciento. Por otro lado, existen transformadores con una capacidad máxima de 100 kVA pero que no llegan ni al dos por ciento de cargabilidad, siendo evidente un alto sobredimensionamiento en estas unidades.

5.3. Inferencia de lógica difusa para la evaluación del índice de riesgo.

Para poder implementar la metodología de lógica difusa se establece las funciones de membresía de cada variable respectivamente como se detalla en los siguientes enunciados:

5.3.1. Sistema de inferencia de lógica difusa para la evaluación del índice de salud.

Se considera las variables edad del transformador, expresada en años, y la cargabilidad del mismo, en porcentaje, con el fin de obtener el índice de salud de manera cuantitativa.

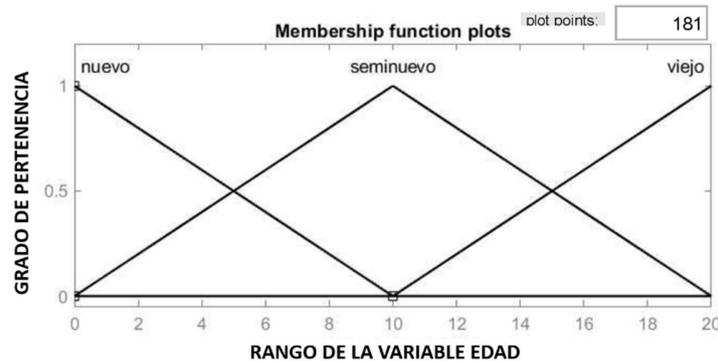
La variable edad permite evaluar la vida útil de las unidades activas. Cabe recalcar que los transformadores son proyectados para un tiempo de 10 años de funcionamiento, sin embargo, existen transformadores que han sobrepasado esta edad y siguen en actividad. La variable edad se clasifica en tres categorías: los transformadores que tienen entre 0 y 5 años de funcionamiento se los establece como nuevos, las unidades entre 5 y 10 años se los denominan seminuevos y

finalmente los que poseen más de 10 años se los determina como viejos, tomando en consideración la normativa de la EERSSA donde establece que un transformador debe tener una vida útil de 10 años. Lo antes mencionado se resume en la Tabla 4 y la función de membresía en la Figura 7.

Tabla 4.
Clasificación de los transformadores por edad

Cualificación	Edad (años)
Nuevo	0 – 5
Seminuevo	5 – 10
Viejo	10 en adelante

Figura 7.
Función de membresía de la variable edad.

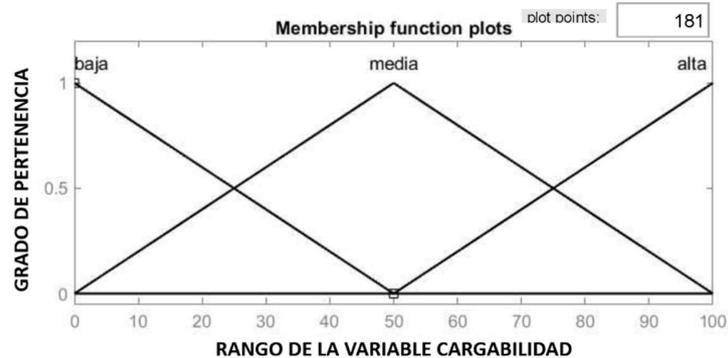


La variable cargabilidad permite conocer el estado de la unidad principalmente por la degradación térmica, así mismo la capacidad de poder introducir nuevas cargas. Los transformadores que tengan una cargabilidad de entre 0% y 25% se establecen como una cargabilidad baja, las unidades entre 25% y 75% están en la categoría de media y finalmente los que se encuentran por encima del 75% se denominan altos. Esta clasificación se la resume en la Tabla 5 y su función de membresía en la 0.

Tabla 5.
Clasificación de los transformadores por cargabilidad

Cualificación	Cargabilidad (%)
Baja	0 – 25
Media	25 – 75
Alta	75 – 100

Figura 8.
Función de membresía de la variable cargabilidad.

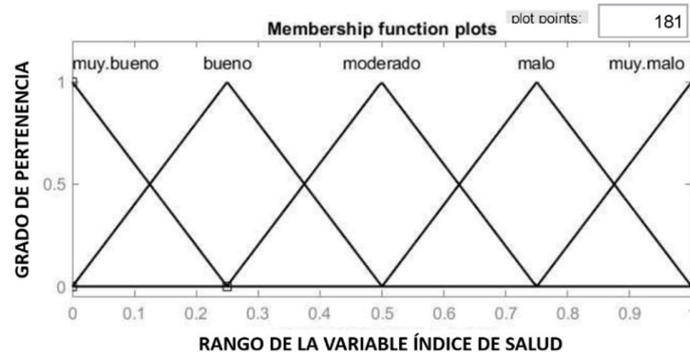


Para la variable de salida (índice de salud) los datos se clasifican en cinco categorías empezando desde 0 a 0.125 denominado “Muy bueno”. El índice de salud que se encuentra entre los valores de 0.125 a 0.375 se establece como “Bueno”. La etiqueta “Moderado” cuenta con un índice de salud con un valor entre 0.375 y 0.625. Los valores entre 0.625 a 0.875 se los denomina “Malo” y finalmente el índice de salud con una valoración entre 0.875 a 1 se establece como “Muy malo”. Estos valores se los puede ver resumidos en la Tabla 6 y la función de membresía en la Figura 9. Así mismo se establecieron reglas de inferencia adecuadas para obtener el índice de salud correspondiente, estas se detallan en el Anexo 3.

Tabla 6.
Clasificación de los transformadores por índice de salud

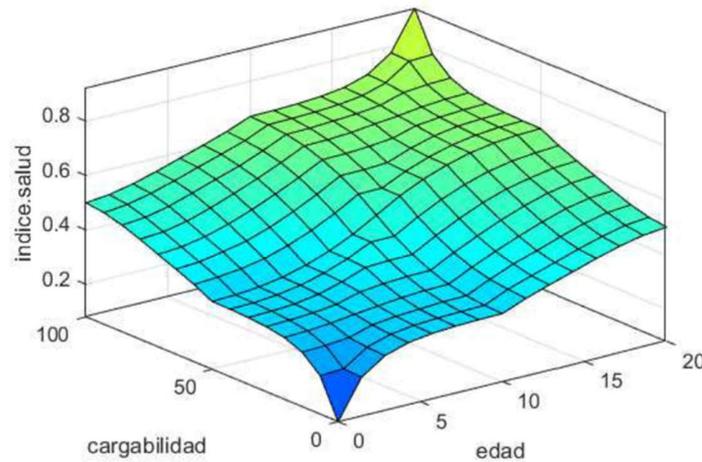
Cualificación	Índice de salud
Muy bueno	0 – 0.125
Bueno	0.125 – 0.375
Moderado	0.375 – 0.625
Malo	0.625 – 0.875
Muy malo	0.875 - 1

Figura 9.
Función de membresía de la variable índice de salud.



En la Figura 10 se puede observar la gráfica tridimensional con los ejes cargabilidad, edad e índice de salud. La zona que tiende a un color verde indica un índice de salud denominado “Muy malo” siendo el valor más crítico con una cuantificación de 1 cuando la variable “cargabilidad” se encuentra al 100% y la variable “edad” supera los 20 años.

Figura 10.
Superficie de la variable índice de salud.



5.3.2. Sistema de inferencia de lógica difusa para la evaluación del factor de consecuencia.

De igual manera para el factor de consecuencia se utilizan las variables de capacidad del transformador, expresada en kVA, y la cargabilidad del mismo, en porcentaje.

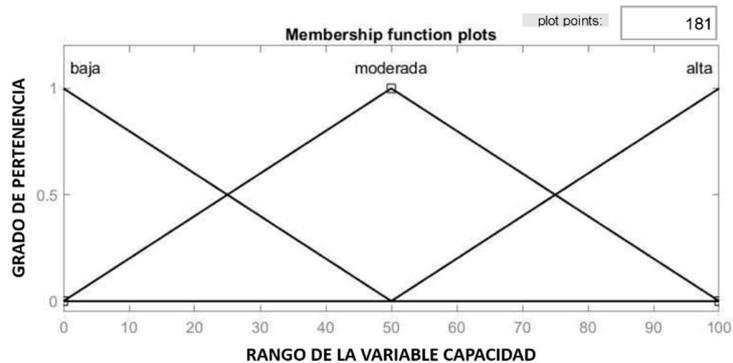
La variable capacidad permite conocer la potencia nominal de los transformadores seleccionados. La clasificación de los transformadores está dividida en “Bajo” con un rango entre los 0 kVA hasta los 25 kVA, “Medio” con valores entre 30 kVA hasta 50 kVA y finalmente se denomina “Alto” a los transformadores entre 75 kVA y 100 kVA, resumiéndose estos valores en la Tabla 7 y su función de membresía en la 0.

Tabla 7.
Clasificación de los transformadores por su capacidad (kVA)

Cualificación	Capacidad (kVA)
Bajo	0 – 25
Medio	30 – 50
Alto	75 – 100

Figura 11.

Función de membresía de la variable capacidad



Para la variable de salida (factor de consecuencia) se categorizaron los datos con cinco etiquetas de tal manera que la cualificación denominada “Muy bajo” tiene valores de entre 0 y 0.125. La etiqueta “Bajo” cuenta con valores que van desde los 0.125 hasta los 0.375. Los valores que se encuentran entre 0.375 y 0.625 se los denomina “Moderado”. Los valores denominados “Alto” son los definidos entre 0.625 y 0.875. Finalmente, los valores más altos denominados “Muy alto” se encuentran entre 0.875 y 1. El resumen de esta categorización se muestra en la Tabla 8 y la función de membresía en la Figura 12. Así mismo se establecieron reglas de inferencia adecuadas para obtener el factor de consecuencia correspondiente, estas se detallan en el Anexo 3.

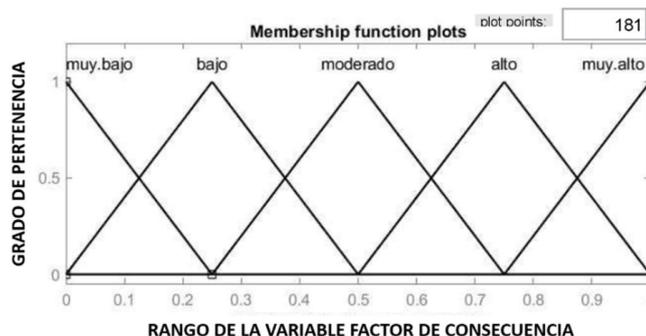
Tabla 8.

Clasificación de los transformadores por factor de consecuencia

Cualificación	Valor
Muy bajo	0 – 0.125
Bajo	0.125 – 0.375
Moderado	0.375 – 0.625
Alto	0.625 – 0.875
Muy alto	0.875 - 1

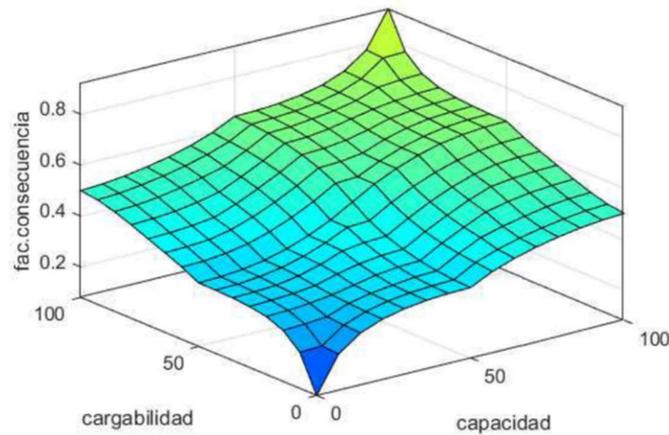
Figura 12.

Función de membresía de la variable factor de consecuencia.



En la Figura 13 se puede observar la gráfica tridimensional con los ejes cargabilidad, capacidad y factor de consecuencia. La zona que tiende a un color verde indica un factor de consecuencia muy alto siendo el valor más crítico con una cuantificación de 1 cuando la variable “cargabilidad” se encuentra al 100% y la variable “capacidad” se encuentra entre los 100 kVA.

Figura 13.
Superficie del factor de consecuencia.

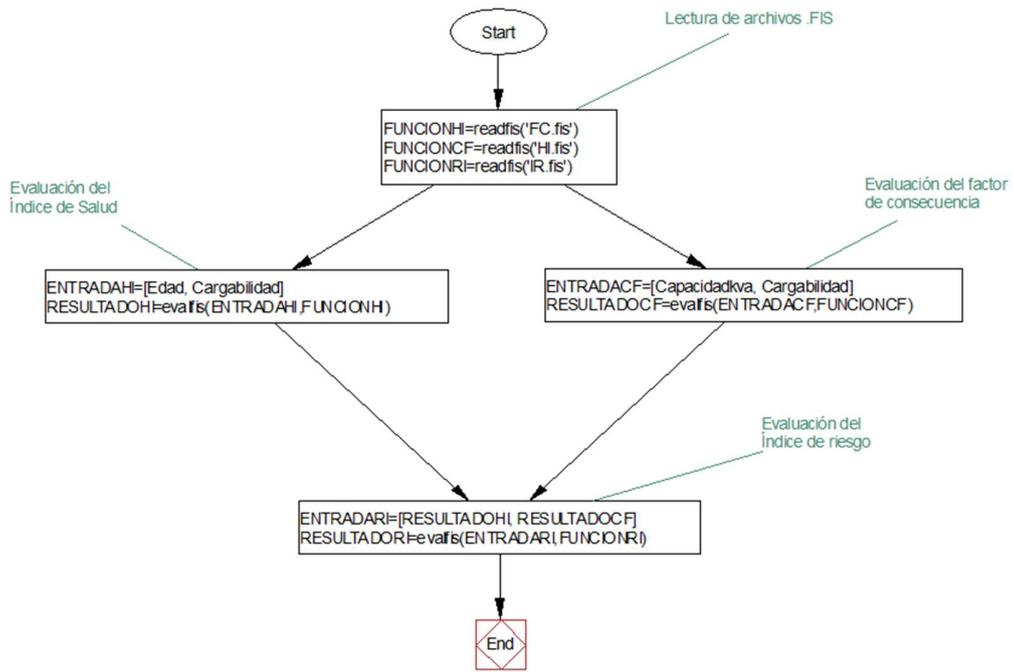


5.3. Codificación en MatLab

Para poder encontrar los valores del índice de riesgo primero se debe introducir la base de datos en Matlab en formato .xlsx, luego se introducen las variables edad, capacidad, cargabilidad y el número del transformador para poder identificarlos. Posterior se procede a leer los archivos .fis generados mediante la herramienta Fuzzy Logic del factor de consecuencia, índice de salud e índice de riesgo. Luego se establecen las entradas edad y cargabilidad para el índice de salud y las entradas capacidad y cargabilidad para el factor de consecuencia para poder evaluar en los archivos .fis. Finalmente se establecen como entradas el índice de salud y factor de consecuencia para tener como salida el índice de riesgo en cada unidad.

Este sistema se ve resumido en el diagrama de bloques de la Figura 14 y el código fuente en el Anexo 2.

Figura 14.
Diagrama de bloques del sistema



6. Resultados

En el apartado anterior se analizaron las variables edad, cargabilidad y capacidad de los 172 transformadores para obtener el índice de salud y el factor de consecuencia. Finalmente, se analizan estas dos variables de salida para obtener el índice de riesgo en cada transformador. En la Tabla 9 se clasifican los transformadores de acuerdo con el índice de riesgo, siendo la cualificación más crítica entre 0.875 a 1. En la Figura 15 se puede observar la función de membresía y la superficie se la puede observar en la Figura 16 evidenciando que los valores más críticos se encuentran cuando el índice de salud y el factor de consecuencia tienen un valor de 1. Así mismo se establecieron reglas de inferencia adecuadas para obtener el índice de riesgo correspondiente, estas se detallan en el Anexo 3.

Tabla 9.

Clasificación por factor índice de riesgo

Cualificación	Valor
Muy bajo	0 – 0.125
Bajo	0.125 – 0.375
Moderado	0.375 – 0.625
Alto	0.625 – 0.875
Muy alto	0.875 - 1

Figura 15.

Función de membresía de la variable índice de riesgo.

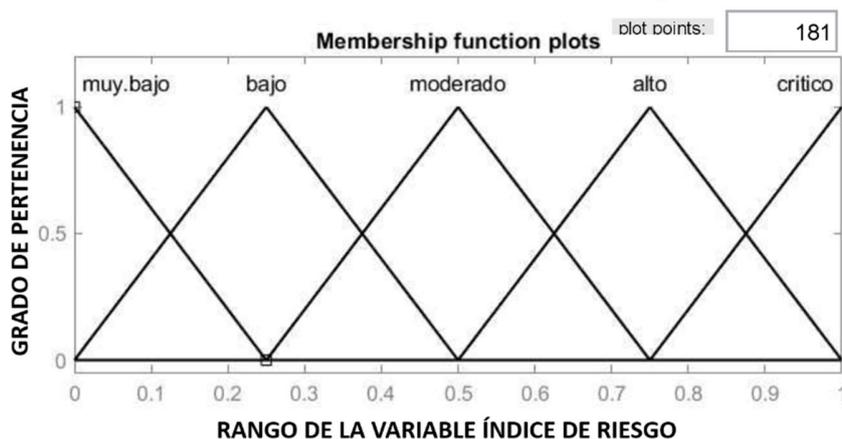
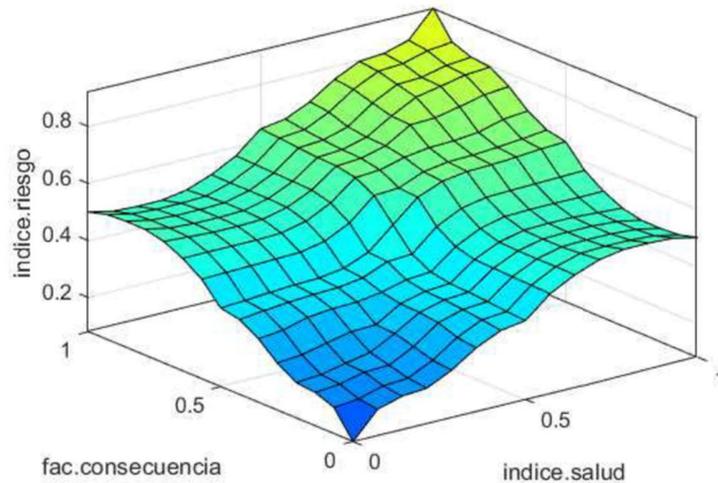
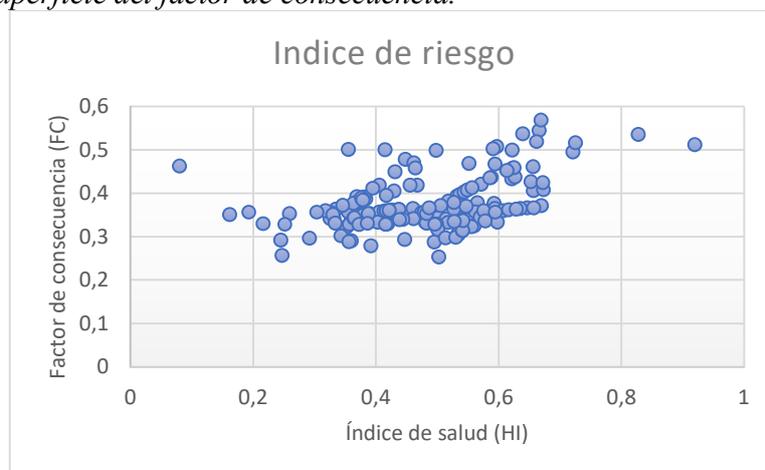


Figura 16.
Superficie del índice de riesgo.



En la Figura 17 se puede observar la relación que existe entre el índice de salud y el factor de consecuencia HI/CF. Se puede evidenciar que existe aglomeración en la zona media de la gráfica, donde el índice de salud se encuentra entre 0.4 a 0.6 y el factor de factor de consecuencia se encuentra entre 0.3 a 0.4. El transformador que se encuentra en una zona crítica tiene valores en el factor de consecuencia de aproximadamente 0.5 y el índice de salud con un valor de 0.9. De igual manera, existe un transformador con el índice de riesgo más bajo en comparación con los demás, con un valor de 0.25 en el índice de salud y aproximadamente 0.25 en el factor de consecuencia.

Figura 17.
Superficie del factor de consecuencia.



Los resultados numéricos de esta investigación se pueden observar de mejor manera en el Anexo 1 y Anexo 4 donde se clasifican los transformadores de acuerdo a su índice de riesgo. Finalmente, se categorizaron los transformadores de acuerdo con el índice de riesgo que se muestra en la Tabla 10 teniendo en consideración que entre 0% y 30% se denominan que tienen un índice de riesgo “Bajo”, entre 30% y 60% se consideran “Moderados” y finalmente entre 60% y 100% se establece que tienen un índice de riesgo "Alto".

Tabla 10.
Clasificación por factor índice de riesgo

Cualificación	Valor (%)
Bajo	0 - 30
Moderado	30 - 60
Alto	60 - 100

El valor más crítico se lo encuentra en el transformador con número 8135 que tiene un índice de riesgo del 63.85% y el transformador con número 39 ya que cuenta con un índice de riesgo de 63.07% clasificándose como transformadores con índice de riesgo “Alto”. Estos transformadores se encuentran con un valor alto debido a que tienen aproximadamente 25 y 43 años y se encuentra con una cargabilidad del 106.04 y 96.25% respectivamente. En estas unidades se ve reflejado que sus índices de salud tienen un valor de 0.9195 y 0.8275 y sus factores de consecuencia se encuentran en valores de 0.5117 y 0.5355.

Analizando estos transformadores detalladamente se puede apreciar que la unidad 8135 cuenta con 9 luminarias y 59 clientes activos, mientras que la unidad 39 cuenta con 13 luminarias y 50 clientes activos. Ambos transformadores son monofásicos y se diferencian por su capacidad, la unidad 8135 tiene una potencia de 15 kVA y la unidad 39 tiene una potencia de 25 kVA.

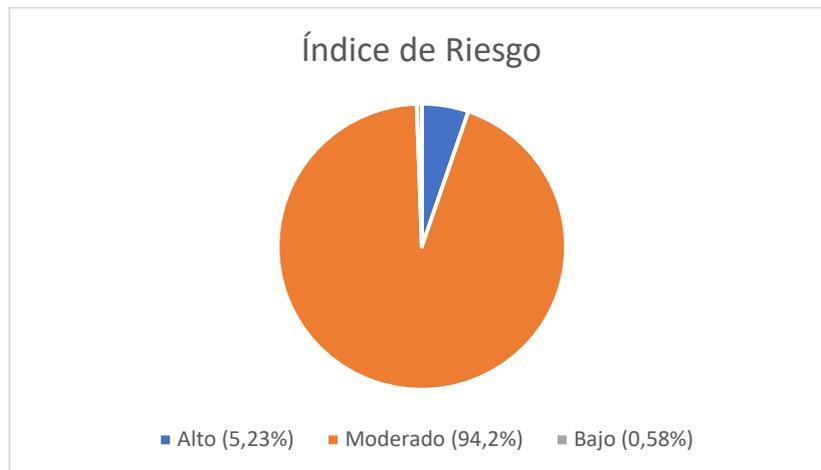
Por otro lado, el transformador que cuenta con un índice de salud más baja en comparación a los otros, es la unidad 9750 con un índice de riesgo del 26.01%, teniendo como índice de salud un valor de 0.2469 y el factor de consecuencia 0.2571. En este caso podemos deducir que el índice de riesgo aumenta gracias al porcentaje de cargabilidad de la unidad, ya que este transformador tiene una edad elevada de 22 años, pero se encuentra con una cargabilidad del 8.95%

Luego de haber realizado el análisis de los resultados se observa que un 5.23% de los transformadores totales se encuentran con un índice de salud “Alto”, el 94.2% tienen un índice de

salud “Moderado” y el 0.58% restante de los transformadores se encuentran en la denominación de “Bajo” como se lo puede observar resumidamente en la Figura 18.

Finalmente, se evidencia que la variable “Cargabilidad” tiende a influir con mayor peso en el índice de riesgo a pesar de que existen transformadores que han cumplido con los 10 años que la EERSSA denomina como años de vida útil.

Figura 18.
Porcentaje de transformadores con respecto al índice de riesgo.



7. Discusión

Actualmente no existe una herramienta por parte de la EERSSA que permita verificar el estado del índice de salud de las unidades de transformación en su área de concesión, por lo que el índice de riesgo de cada unidad es incierto. Si bien es cierto, el SIG que ofrece la empresa de distribución de energía eléctrica cuenta con algunos datos sobre el porcentaje de cargabilidad y datos de cuando fue instalado, no ofrece información sobre el estado de salud de los transformadores. Este trabajo permite conocer sobre la relación que existe entre las variables principales en un transformador como son la edad, cargabilidad actual y capacidad. El principal motivo a escoger estas variables es debido a que la EERSSA señala en su manual de construcción que los transformadores deben tener como mínimo 10 años de vida útil.

Esta investigación se realizó con información actualizada brindada por el SIG de la EERSSA. De acuerdo a los resultados obtenidos se establece que la mayor parte de los transformadores en este alimentador escogido se encuentran en un estado moderado, es decir que tienen una edad considerable y su cargabilidad es aceptable. Existen cuatro transformadores que se despreciaron para esta investigación ya que no tienen una carga conectada actualmente por lo que no tendrían un impacto en la base de datos. Actualmente se analizan tres variables como son la edad, cargabilidad y capacidad, pero para una mayor precisión se pueden añadir más variables que incidan en la respuesta del índice de riesgo final.

En comparación a trabajos relacionados no existe un estudio mediante lógica difusa en transformadores de distribución. En el caso de (Cerón et al., 2015), (Borja Arbito, 2019) y (Lata Cando, 2022) utilizan como metodología la lógica difusa en transformadores de potencia. De igual manera en trabajos como (Montané García et al., 2019) y (Parraga Acosta, 2019) únicamente analizan la variable edad en transformadores de distribución por lo que los resultados a esperarse mediante un estudio utilizando lógica difusa llegan a tener un grado de imprecisión elevada.

8. Conclusiones

- Las variables establecidas para el presente trabajo de investigación son edad, cargabilidad y capacidad. Estas fueron escogidas de acuerdo a la normativa de construcción establecida por la EERSSA donde menciona que los transformadores de distribución deben estar proyectados a 10 años de vida útil. Se observó que existen unidades que sobrepasan esta edad y siguen en funcionamiento óptimo. Así mismo, se observa que existen transformadores que están en un nivel crítico de cargabilidad estando muy cerca o incluso superior a la capacidad establecida por el fabricante.
- Se establecieron reglas de inferencia que van acorde a la relación que existen en cada variable de salida como se aprecia en el Anexo 3, dando así un alto grado de certidumbre en los resultados.
- La relación que existe entre variables se llegó a determinar mediante las reglas de inferencia establecidas dando como resultado que la variable “Cargabilidad” tiende a influir de manera más fuerte en el índice de riesgo a pesar de que existan unidades que han cumplido con los 10 años que la EERSSA denomina como años de vida útil. Es el caso del transformador con un índice de riesgo bajo con número 9750 que tiene 22 años de funcionamiento, pero cuenta con una cargabilidad del 8.95%. Finalmente, se llega a la conclusión de que las variables son dependientes entre sí.
- En el alimentador Pío Jaramillo existen 172 transformadores que se encuentran activos de los cuales, luego de haber realizado el análisis del índice de riesgo, se llegó a determinar que 9 unidades tienen un alto índice de riesgo, 162 se encuentran en estado moderado y finalmente 1 unidad tiene un índice de riesgo bajo.

9. Recomendaciones

Para obtener un análisis más acertado es recomendable ingresar más variables que influyan en el índice de riesgo directamente, ya que la lógica difusa arroja un valor más preciso cuando cuenta con mayor información.

Para un futuro estudio se puede plantear una solución para reducir el índice de riesgo en los transformadores más críticos. Algunas de estas soluciones pueden ser la implementación de sistemas mallados, bancos de transformadores, entre otras.

10. Bibliografía

- Álvarez, R. E., & Pozo, M. D. d. (2007). Mantenimiento de transformadores de potencia. XII Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRE (Foz de Iguazú, Brasil, 2007),
- Borja Arbito, W. P. (2019). *Metodología para la evaluación del factor de consecuencia de la falla final de transformadores de distribución*
- Cerón, A. F., Echeverry, D. F., Aponte, G., & Romero, A. A. J. I. t. (2015). Índice de salud para transformadores de potencia inmersos en aceite mineral con voltajes entre 69kV y 230kV usando lógica difusa. *26(2)*, 107-116.
- Eduardo, C., & De Vito, E. L. J. R. A. d. M. R. (2006). Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. *6(3)*, 126-136.
- EERSSA. (2012). Normas Técnicas para el Diseño de Redes Eléctricas Urbanas y Rurales. In (pp. 67).
- Farfán Minchala, C. A., & Marín Zúñiga, D. M. (2017). *Evaluación del índice de consecuencia de la falla final de un transformador de potencia usando lógica difusa basada en criterio experto*
- Fernández Blanco, J. C., Hernández González, F. H., & Corrales Barrios, L. B. J. I. E., Automática y Comunicaciones. (2021). Método de lógica difusa para el diagnóstico de fallos incipientes en un transformador de 40MVA. *42(2)*, 76-88.
- Flor Gómez, F. (2018). Índices de salud de los activos de una red eléctrica de distribución.
- Granda, N., & Arcos, H. J. R. T. e. (2007). Estudio De Estabilidad De Voltaje Para El Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano. *3(1)*, 86-96 pp.
- Guzmán, D., & Castaño, V. J. R. d. C. y. T. (2006). La lógica difusa en ingeniería: principios, aplicaciones y futuro. *24(2)*.
- Hernández, L. R. B., & Valdés, O. R. J. R. L. d. I. d. S. (2016). Lógica Difusa Basada en la Experiencia del Usuario para Medir la Usabilidad. *4(1)*, 48-54.
- Kirylychik Yevmenchik, V. (2017). Aplicación de la metodología de cálculo de índice de salud de activos a transformadores de potencia. Propuestas de mejora.
- Lata Cando, J. P. (2022). *Análisis del estado funcional de transformadores de potencia con voltaje de funcionamiento de hasta 500 kV mediante el uso de lógica difusa*
- Matulic, I. (2003). Introducción a los Sistemas Eléctricos de Potencia. *2(2)*, 208-215.
- Mendoza Saboya, L. A. (2009). *Metodología de la lógica difusa* (0124-8219).
- Montané García, J. J., Dorrbercker Drake, S. A., & del Castillo Serpa, A. M. J. I. E. (2019). Avances en evaluación del estado y la vida remanente de transformadores de fuerza. *40(3)*, 245-256.
- Morón, J. A. Y. (2021). *Sistemas eléctricos de distribución*. Reverté.
- Parraga Acosta, J. C. (2019). El índice de salud y su influencia en la gestión del ciclo de vida de los transformadores del sistema eléctrico de la Mina Cobriza.
- Pérez, P. A. (2020). *Transformadores de distribución. Teoría, cálculo, construcción y pruebas*. Reverté.
- Valencia García, C. M. J. D. d. I. E., Electrónica y Computación. Metodología para la evaluación de fallas en transformadores de distribución.

11. Anexos

Anexo 1: base de datos del alimentador Pío Jaramillo.

Item	Nro, Transformador	Capacidad (kVA)	Edad (años)	Cargabilidad (%)	Índice de Salud (HI)	Factor de Consecuencia (CF)	Índice de Riesgo (RI)
1	10718	25	21	54,78	0,5321	0,3935	0,4409
2	3374	15	33	72,00	0,6217	0,4333	0,5368
3	13331	25	16	40,97	0,5971	0,3636	0,4773
4	12402	15	20	33,54	0,5979	0,3334	0,4663
5	215	25	40	72,21	0,6228	0,4576	0,5577
6	12143	25	19	17,09	0,5325	0,336	0,4183
7	10460	25	21	24,55	0,3596	0,3418	0,3577
8	13337	25	16	15,66	0,4831	0,335	0,3835
9	12020	15	19	18,39	0,537	0,3109	0,4167
10	4234	15	32	36,21	0,4173	0,3355	0,3756
11	6208	25	29	6,48	0,2162	0,3297	0,3292
12	14489	75	15	10,79	0,448	0,4778	0,4396
13	21533	25	6	57,18	0,4298	0,4051	0,4045
14	13332	37,5	16	15,89	0,4838	0,3585	0,3898
15	7443	37,5	26	80,25	0,6662	0,5449	0,6188
16	OID279	37,5	43	66,92	0,5969	0,5072	0,5912
17	5753	25	30	28,13	0,3778	0,3486	0,3673
18	9660	37,5	22	28,58	0,38	0,3852	0,3808
19	14709	25	14	2,40	0,4158	0,3284	0,3737
20	18249	30	9	6,84	0,3315	0,3411	0,3454
21	19198	50	8	26,82	0,3689	0,392	0,3787
22	14353	15	15	10,39	0,4471	0,2931	0,3739
23	19597	15	8	36,56	0,4115	0,3359	0,3744
24	8135	15	25	106,04	0,9195	0,5117	0,6385
25	6849	25	27	44,25	0,4605	0,3652	0,3905
26	147	37,5	43	45,36	0,4673	0,419	0,4171
27	9682	15	23	23,23	0,3526	0,3226	0,3502
28	8071	15	25	72,99	0,6267	0,4373	0,5424
29	12407	25	20	50,78	0,6697	0,3711	0,5173
30	12027	37,5	19	25,82	0,5654	0,378	0,4621
31	13336	25	16	24,84	0,5213	0,342	0,4091
32	12141	25	19	19,92	0,5424	0,3382	0,4278
33	7157	15	26	50,39	0,5021	0,3444	0,3887
34	4244	25	32	30,65	0,3901	0,3528	0,3729
35	4225	25	32	52,63	0,5182	0,382	0,4204
36	16967	100	11	1,94	0,3553	0,501	0,3904

37	21019	37,5	6	18,41	0,3347	0,3626	0,3575
38	6094	37,5	29	65,71	0,5909	0,5026	0,5879
39	211	25	40	55,58	0,537	0,3975	0,448
40	19879	37,5	7	58,44	0,4617	0,4701	0,4522
41	13342	25	16	49,81	0,6464	0,3663	0,5061
42	13340	25	16	14,82	0,4802	0,3344	0,3833
43	18663	25	8	29,77	0,3803	0,3514	0,369
44	10039	15	21	13,75	0,2919	0,2961	0,3061
45	13466	25	17	11,33	0,4879	0,3322	0,3831
46	9285	50	23	49,87	0,4982	0,499	0,4974
47	13333	37,5	16	13,05	0,4746	0,3547	0,3882
48	12408	25	20	20,04	0,5464	0,3383	0,4311
49	5754	25	30	37,77	0,4251	0,3612	0,3842
50	213	25	40	33,81	0,4055	0,3571	0,3786
51	9750	10	22	8,95	0,2469	0,2571	0,2601
52	9608	25	23	35,45	0,4135	0,359	0,3811
53	OID1649	25	43	72,72	0,6253	0,459	0,56
54	820	25	40	56,72	0,5438	0,403	0,4576
55	13338	25	16	16,21	0,485	0,3354	0,3837
56	4233	25	32	65,14	0,5881	0,4365	0,5191
57	12025	25	19	43,66	0,6354	0,365	0,5002
58	14708	25	14	5,64	0,4188	0,3294	0,3746
59	12406	25	20	24,29	0,5625	0,3416	0,4449
60	17404	15	10	130,74	0,6568	0,4057	0,5327
61	18511	15	9	16,07	0,3427	0,3023	0,3418
62	18551	37,5	9	43,85	0,4556	0,4186	0,4159
63	6095	37,5	29	26,53	0,3698	0,3798	0,3748
64	214	25	40	38,11	0,4268	0,3615	0,3847
65	6096	10	29	47,68	0,4824	0,3353	0,3836
66	905	15	40	47,51	0,4813	0,342	0,3851
67	15568	25	13	51,66	0,5926	0,3764	0,4809
68	12411	25	20	21,56	0,5521	0,3394	0,4361
69	13335	25	16	34,02	0,5623	0,3574	0,4504
70	13343	25	16	23,28	0,5144	0,3408	0,4015
71	5755	15	30	55,72	0,5379	0,3714	0,4355
72	13540	25	16	62,40	0,6528	0,4268	0,5454
73	826	37,5	40	10,13	0,2595	0,353	0,3444
74	10461	25	21	25,85	0,3664	0,3441	0,3614
75	16514	50	11	0,84	0,355	0,3565	0,3597
76	14090	25	15	43,41	0,5938	0,3649	0,4758
77	12142	25	19	36,80	0,6073	0,3603	0,4821
78	5752	25	30	40,08	0,4371	0,363	0,3869
79	4242	37,5	32	29,39	0,384	0,3875	0,3834

80	10302	15	21	53,96	0,527	0,3632	0,4217
81	11980	15	19	0,00	0,495	0,2879	0,3766
82	12024	25	19	39,07	0,6162	0,3623	0,4883
83	4238	15	32	46,74	0,4761	0,3418	0,3848
84	10303	15	21	33,26	0,4028	0,3332	0,3716
85	19296	50	8	42,04	0,4313	0,4496	0,4242
86	13467	25	17	9,09	0,482	0,331	0,3826
87	12139	25	19	30,02	0,5816	0,3518	0,4622
88	10306	25	21	40,17	0,4376	0,3631	0,387
89	12021	15	19	24,56	0,5603	0,3248	0,4386
90	12409	25	20	41,43	0,6289	0,3638	0,4962
91	4239	25	32	36,13	0,4169	0,3597	0,3821
92	4229	37,5	32	3,23	0,162	0,3507	0,3355
93	16953	37,5	11	110,18	0,6689	0,5685	0,6226
94	17371	25	10	87,92	0,6617	0,5187	0,6158
95	17014	15	11	7,37	0,3597	0,2908	0,3495
96	16630	25	11	4,08	0,3569	0,3288	0,3535
97	18558	50	9	4,67	0,3302	0,3578	0,3542
98	20781	37,5	7	30,74	0,3801	0,3915	0,383
99	21018	37,5	6	18,78	0,3353	0,3632	0,3579
100	21325	45	6	4,49	0,3222	0,3561	0,3519
101	23673	25	2	0,51	0,2515	0,3281	0,3299
102	23718	10	2	79,58	0,4645	0,458	0,4482
103	12403	15	20	16,56	0,5345	0,3043	0,4134
104	10301	15	21	44,35	0,4611	0,3411	0,3835
105	4226	25	32	57,68	0,5493	0,4074	0,4655
106	12500	15	19	65,68	0,6732	0,4083	0,5394
107	10124	25	22	28,42	0,3792	0,3491	0,368
108	12410	25	20	61,73	0,6722	0,4243	0,5496
109	12412	25	20	26,11	0,5698	0,3446	0,4513
110	12140	25	19	12,38	0,5175	0,3328	0,4029
111	750	37,5	40	25,26	0,3633	0,3766	0,3713
112	12137	15	19	17,40	0,5336	0,3075	0,4132
113	15839	10	12	12,84	0,3918	0,2788	0,3609
114	13339	37,5	16	14,34	0,4786	0,3564	0,3889
115	4246	75	32	0,00	0,08	0,4623	0,3595
116	13341	25	16	36,76	0,5757	0,3603	0,4614
117	OID599	25	17	49,98	0,6573	0,3663	0,5106
118	142	25	43	50,86	0,5056	0,3716	0,4015
119	14711	25	14	2,57	0,4159	0,3284	0,3738
120	17013	15	11	2,87	0,356	0,2886	0,3475
121	20779	37,5	7	29,92	0,3766	0,389	0,3808
122	20780	37,5	7	44,27	0,4056	0,4187	0,4027

123	21021	37,5	6	23,33	0,346	0,3722	0,3644
124	21020	37,5	6	12,83	0,3281	0,3544	0,3521
125	21230	30	6	9,44	0,3251	0,3422	0,3449
126	21479	50	5	7,85	0,3179	0,3599	0,353
127	11838	25	19	4,59	0,4993	0,329	0,3826
128	13879	15	16	37,26	0,5782	0,3365	0,4546
129	5544	10	31	57,26	0,5469	0,3703	0,4431
130	7158	15	26	87,86	0,7208	0,4955	0,619
131	21156	25	6	55,03	0,4168	0,3948	0,3964
132	10459	25	21	25,35	0,3638	0,3429	0,3599
133	16917	25	11	60,84	0,5715	0,4208	0,4939
134	12022	15	19	23,44	0,5559	0,323	0,4348
135	16944	37,5	11	76,63	0,6393	0,5368	0,6108
136	4232	25	32	37,09	0,4217	0,3606	0,3834
137	13522	15	16	20,21	0,5009	0,3162	0,3813
138	14728	37,5	14	65,04	0,6222	0,4999	0,6029
139	OID824	100	14	0,67	0,4151	0,5004	0,4162
140	22577	50	4	0,40	0,3039	0,3564	0,3493
141	OID28	37,5	23	58,11	0,5517	0,4685	0,5205
142	12237	25	19	1,85	0,4959	0,3283	0,3824
143	4444	15	32	8,77	0,2449	0,2918	0,3005
144	13514	15	18	14,33	0,5135	0,2967	0,3923
145	12503	25	19	87,20	0,7253	0,5164	0,6246
146	39	25	43	96,25	0,8275	0,5355	0,6307
147	5757	15	30	41,33	0,4439	0,3396	0,3812
148	218	15	40	40,28	0,4382	0,339	0,3802
149	10305	25	21	25,60	0,3651	0,3435	0,3607
150	13468	37,5	17	9,35	0,4826	0,3526	0,388
151	11674	10	20	3,60	0,5029	0,253	0,3782
152	12404	15	20	15,16	0,53	0,2982	0,4086
153	5756	15	30	27,09	0,3726	0,3279	0,3604
154	12136	15	19	19,51	0,541	0,3142	0,4209
155	12135	15	19	19,58	0,5413	0,3144	0,4211
156	9607	25	23	48,34	0,487	0,3662	0,3924
157	12405	25	20	18,78	0,542	0,3373	0,4271
158	15559	37,5	13	57,85	0,5942	0,4672	0,5513
159	4228	37,5	32	28,35	0,3789	0,3846	0,3801
160	143	25	43	64,67	0,5858	0,4349	0,5162
161	17263	37,5	10	2,69	0,3302	0,3505	0,3505
162	19156	50	8	33,18	0,395	0,4116	0,3954
163	24260	50	1	0,46	0,193	0,3564	0,3424
164	12026	25	19	15,58	0,5275	0,335	0,4133
165	707	15	40	78,53	0,6561	0,4606	0,5732

166	17372	25	10	30,78	0,3876	0,353	0,3721
167	12023	25	19	33,39	0,5943	0,3566	0,4725
168	216	25	40	58,99	0,5565	0,4131	0,4758
169	16516	25	9	9,68	0,3339	0,3313	0,3409
170	4243	25	32	70,27	0,6132	0,4524	0,5481
171	10300	15	21	29,82	0,3861	0,3306	0,366
172	13334	37,5	16	26,16	0,5272	0,3788	0,4285

Anexo 2: código fuente.

```
% UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
% MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA
% ELABORADO POR: ING. JUAN PABLO GUTIÉRREZ CELI

% TEMA: SISTEMA DE INFERENCIA DE LÓGICA DIFUSA PARA LA EVALUACIÓN
EL RIESGO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN DEL ALIMENTADOR PÍO
JARAMILLO DE LA CIUDAD DE LOJA

%% Lectura de los archivos .fis
FUNCIONHI=readfis('HI.fis');
FUNCIONFC=readfis('FC.fis');
FUNCIONIR=readfis('IR.fis');

%% Evaluación del Índice de Salud
ENTRADAHI=[Edad, Cargabilidad];
RESULTADOHI=evalfis(ENTRADAHI,FUNCIONHI);

%% Evaluación del factor de consecuencia
ENTRADAFC=[Capacidadkva, Cargabilidad];
RESULTADOFC=evalfis(ENTRADAFC,FUNCIONFC);

%% Evaluación del Índice de riesgo
ENTRAAIR=[RESULTADOHI, RESULTADOFC];
RESULTADOIR=evalfis(ENTRAAIR,FUNCIONIR);
```

Anexo 3: reglas de inferencia.

- Reglas de inferencia para obtener el índice de salud.

```
1. If (edad is nuevo) then (indice.salud is muy.bueno) (1)
2. If (edad is seminuevo) then (indice.salud is moderado) (1)
3. If (edad is viejo) then (indice.salud is muy.malo) (1)
4. If (cargabilidad is baja) then (indice.salud is muy.bueno) (1)
5. If (cargabilidad is media) then (indice.salud is moderado) (1)
6. If (cargabilidad is alta) then (indice.salud is muy.malo) (1)
7. If (edad is nuevo) and (cargabilidad is baja) then (indice.salud is muy.bueno) (1)
8. If (edad is nuevo) and (cargabilidad is media) then (indice.salud is bueno) (1)
9. If (edad is seminuevo) and (cargabilidad is baja) then (indice.salud is bueno) (1)
10. If (edad is seminuevo) and (cargabilidad is media) then (indice.salud is moderado) (1)
11. If (edad is viejo) and (cargabilidad is media) then (indice.salud is malo) (1)
12. If (edad is seminuevo) and (cargabilidad is alta) then (indice.salud is malo) (1)
13. If (edad is viejo) and (cargabilidad is alta) then (indice.salud is muy.malo) (1)
```

- Reglas de inferencia para obtener el factor de consecuencia.

```
1. If (capacidad is baja) then (fac.consecuencia is muy.bajo) (1)
2. If (capacidad is moderada) then (fac.consecuencia is moderado) (1)
3. If (capacidad is alta) then (fac.consecuencia is muy.alto) (1)
4. If (cargabilidad is baja) then (fac.consecuencia is muy.bajo) (1)
5. If (cargabilidad is media) then (fac.consecuencia is moderado) (1)
6. If (cargabilidad is alta) then (fac.consecuencia is muy.alto) (1)
7. If (capacidad is baja) and (cargabilidad is baja) then (fac.consecuencia is muy.bajo) (1)
8. If (capacidad is moderada) and (cargabilidad is media) then (fac.consecuencia is moderado) (1)
9. If (capacidad is alta) and (cargabilidad is alta) then (fac.consecuencia is muy.alto) (1)
10. If (capacidad is baja) and (cargabilidad is media) then (fac.consecuencia is bajo) (1)
11. If (capacidad is alta) and (cargabilidad is media) then (fac.consecuencia is alto) (1)
```

- Reglas de inferencia para obtener el índice de riesgo.

```
1. If (indice.salud is muy.bueno) then (indice.riesgo is muy.bajo) (1)
2. If (indice.salud is bueno) then (indice.riesgo is bajo) (1)
3. If (indice.salud is moderado) then (indice.riesgo is moderado) (1)
4. If (indice.salud is malo) then (indice.riesgo is alto) (1)
5. If (indice.salud is muy.malo) then (indice.riesgo is critico) (1)
6. If (fac.consecuencia is muy.bajo) then (indice.riesgo is muy.bajo) (1)
7. If (fac.consecuencia is bajo) then (indice.riesgo is bajo) (1)
8. If (fac.consecuencia is moderado) then (indice.riesgo is moderado) (1)
9. If (fac.consecuencia is alto) then (indice.riesgo is alto) (1)
10. If (fac.consecuencia is muy.alto) then (indice.riesgo is critico) (1)
11. If (indice.salud is muy.bueno) and (fac.consecuencia is muy.bajo) then (indice.riesgo is muy.bajo) (1)
12. If (indice.salud is bueno) and (fac.consecuencia is bajo) then (indice.riesgo is bajo) (1)
13. If (indice.salud is moderado) and (fac.consecuencia is moderado) then (indice.riesgo is moderado) (1)
14. If (indice.salud is malo) and (fac.consecuencia is alto) then (indice.riesgo is alto) (1)
15. If (indice.salud is muy.malo) and (fac.consecuencia is muy.alto) then (indice.riesgo is critico) (1)
16. If (indice.salud is muy.bueno) and (fac.consecuencia is bajo) then (indice.riesgo is bajo) (1)
17. If (indice.salud is bueno) and (fac.consecuencia is muy.bajo) then (indice.riesgo is bajo) (1)
18. If (indice.salud is muy.malo) and (fac.consecuencia is alto) then (indice.riesgo is alto) (1)
19. If (indice.salud is malo) and (fac.consecuencia is muy.alto) then (indice.riesgo is alto) (1)
20. If (indice.salud is moderado) and (fac.consecuencia is alto) then (indice.riesgo is alto) (1)
21. If (indice.salud is malo) and (fac.consecuencia is moderado) then (indice.riesgo is moderado) (1)
```

Anexo 4: clasificación de los transformadores por el índice de riesgo.

Nro, Transformador	Índice de Riesgo (RI)	
8135	63,85%	
39	63,07%	
12503	62,46%	
16953	62,26%	
7158	61,90%	ALTO
7443	61,88%	
17371	61,58%	
16944	61,08%	
14728	60,29%	
12407	51,73%	
143	51,62%	
OID599	51,06%	
13342	50,61%	
12025	50,02%	
9285	49,74%	
12409	49,62%	
16917	49,39%	
12024	48,83%	
12142	48,21%	
15568	48,09%	
13331	47,73%	
14090	47,58%	
216	47,58%	
12023	47,25%	
12402	46,63%	
4226	46,55%	
12139	46,22%	
12027	46,21%	
13341	46,14%	
820	45,76%	
13879	45,46%	
19879	45,22%	
12412	45,13%	
13335	45,04%	
23718	44,82%	
211	44,80%	
12406	44,49%	
5544	44,31%	
10718	44,09%	
14489	43,96%	
12021	43,86%	
12411	43,61%	
5755	43,55%	
12022	43,48%	
12408	43,11%	
13334	42,85%	
12141	42,78%	
12405	42,71%	
19296	42,42%	
10302	42,17%	

Nro, Transformador	Índice de Riesgo (RI)	
9750	26,01%	BAJO

Nro, Transformador	Índice de Riesgo (RI)	
OID279	59,12%	
6094	58,79%	
707	57,32%	
OID1649	56,00%	
215	55,77%	
15559	55,13%	
12410	54,96%	
4243	54,81%	MODERADO
13540	54,54%	
8071	54,24%	
12500	53,94%	
3374	53,68%	
17404	53,27%	
OID28	52,05%	
4233	51,91%	

12135	42,11%	20781	38,30%
12136	42,09%	13467	38,26%
4225	42,04%	11838	38,26%
12143	41,83%	12237	38,24%
147	41,71%	4239	38,21%
12020	41,67%	13522	38,13%
OID824	41,62%	5757	38,12%
18551	41,59%	9608	38,11%
12403	41,34%	9660	38,08%
12026	41,33%	20779	38,08%
12137	41,32%	218	38,02%
13336	40,91%	4228	38,01%
12404	40,86%	19198	37,87%
21533	40,45%	213	37,86%
12140	40,29%	11674	37,82%
20780	40,27%	11980	37,66%
13343	40,15%	4234	37,56%
142	40,15%	6095	37,48%
21156	39,64%	14708	37,46%
19156	39,54%	19597	37,44%
9607	39,24%	14353	37,39%
13514	39,23%	14711	37,38%
6849	39,05%	14709	37,37%
16967	39,04%	4244	37,29%
13332	38,98%	17372	37,21%
13339	38,89%	10303	37,16%
7157	38,87%	750	37,13%
13333	38,82%	18663	36,90%
13468	38,80%	10124	36,80%
10306	38,70%	5753	36,73%
5752	38,69%	10300	36,60%
905	38,51%	21021	36,44%
4238	38,48%	10461	36,14%
214	38,47%	15839	36,09%
5754	38,42%	10305	36,07%
13338	38,37%	5756	36,04%
6096	38,36%	10459	35,99%
13337	38,35%	16514	35,97%
10301	38,35%	4246	35,95%
4242	38,34%	21018	35,79%
4232	38,34%	10460	35,77%
13340	38,33%	21019	35,75%
13466	38,31%	18558	35,42%

16630 35,35%
21479 35,30%
21020 35,21%
21325 35,19%
17263 35,05%
9682 35,02%
17014 34,95%
22577 34,93%
17013 34,75%
18249 34,54%
21230 34,49%
826 34,44%
24260 34,24%
18511 34,18%
16516 34,09%
4229 33,55%
23673 32,99%
6208 32,92%
10039 30,61%

4444 30,05%

Anexo 5. Certificación de traducción del resumen

Loja, 20 de septiembre del 2022

Analí Carolina Rodríguez Castro, con cédula de identidad N°**1105669624**, poseedor del **NIVEL AVANZADO C1-INGLÉS**, con certificación WSE-UIO1-02-2021-00138.

Por medio de la presento **CERTIFICO:**

Que he realizado la traducción al idioma inglés del resumen del Trabajo de Titulación denominado “Sistema de inferencia de lógica difusa para la evaluación del riesgo de transformadores de distribución del alimentador Pío Jaramillo de la ciudad de Loja”, con autoría del Sr. Juan Pablo Gutiérrez Celi portador de la cédula de identidad N°1105166068.

Autorizo al interesado a hacer uso del presente para los fines que considere pertinente.

Analí Carolina Rodríguez Castro

C.I. 1105669624