



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

Evaluación del índice de riesgo de transformadores de distribución utilizando sistemas de inferencia difusa en el marco de la gestión de activos

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

AUTOR:

Ing. William Mauricio Rojas Cumbicus

DIRECTOR:

Ing. Rodolfo Pabel Merino Vivanco Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2022

Certificación

Loja, 16 de septiembre de 2022

Ing. Rodolfo Pabel Merino Vivanco Mg. Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifico:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del trabajo de Investigación: **“Evaluación del índice de riesgo de transformadores de distribución utilizando sistemas de inferencia difusa en el marco de la gestión de activos”** de autoría del estudiante **William Mauricio Rojas Cumbicus** previa a la obtención del título de **Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación.

Ing. Rodolfo Pabel Merino Vivanco Mg. Sc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **WILLIAM MAURICIO ROJAS CUMBICUS**, 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.



William Mauricio Rojas Cumbicus

Firma:

Cédula de Identidad: 1104755366

Fecha: 16/09/2022

Correo electrónico: williammau_rojas@hotmail.com

Teléfono o celular: 0960570707

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

Yo, **WILLIAM MAURICIO ROJAS CUMBICUS**, declaro ser autor del trabajo de titulación denominado: **“Evaluación del índice de riesgo de transformadores de distribución utilizando sistemas de inferencia difusa en el marco de la gestión de activos”**, 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 dieciséis días del mes de septiembre del dos mil veintidós.



William Mauricio Rojas Cumbicus

Firma:

Autor: William Mauricio Rojas Cumbicus

Cédula: 1104755366

Dirección: Loja (José Martínez Ruiz 365-10 y Miguel de Unamuno)

Correo Electrónico: williammau_rojas@hotmail.com

Celular: 0960570707

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de trabajo de titulación: Ing. Rodolfo Pabel Merino Vivanco Mg. Sc.

Dedicatoria

Este nuevo logro es dedicado a mi familia, principalmente a mis padres y mi hermano, quienes fueron los pilares fundamentales para cristalizar una nueva meta en mi vida. Gracias a su sacrificio y apoyo incondicional, siempre han sido mi motivación especial para consolidar mi formación académica y personal en el día a día. A ti Layla por enseñarme a ser un mejor ser humano y alegrar cada uno de mis días con tus ocurrencias.

Con dedicatoria especial a mi abuelito Polibio Cumbicus Cordero (+), quien lamentablemente tuvo que partir. Siempre estaré agradecido abuelito por tus enseñanzas, tus cuidados y tu inmenso cariño.

Con mención especial a mis amigos y demás personas que indirectamente aportaron a cumplir un nuevo paso en el marco de mi crecimiento personal.

William Mauricio Rojas Cumbicus

Agradecimientos

A Dios por haberme permitido lograr un nuevo objetivo, por haberme regalado el don de la vida, la perseverancia, el impulso y la sabiduría que necesité para cristalizar este proyecto.

A mis padres y mi hermano quienes han sido los artífices de mi formación, ya que con esfuerzo, sacrificio y enseñanzas diarias han hecho de mí un hombre de bien.

Al Ing. Rodolfo Pabel Merino por su admirable sabiduría, paciencia y predisposición para brindar desinteresadamente su apoyo para que este proyecto sea realizado de manera jerárquica y con validez técnica.

A la Universidad Nacional de Loja y en particular a quienes formaron parte del programa de Maestría en Electricidad mención en sistemas eléctricos de potencia, tanto planta administrativa como docente, por su guía durante todo el programa. A quienes desinteresadamente aportaron su criterio experto referente a los transformadores de distribución en las encuestas realizadas.

Gratitud infinita a quienes sin ser nombrados se saben actores de este trabajo, ya que sin su apoyo no se hubiese materializado este nuevo desafío.

William Mauricio Rojas Cumbicus

Índice de contenido

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización.	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice de contenido	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
4. Marco teórico	6
4.1. Capítulo 1: Índice de Riesgo en transformadores de distribución	6
4.1.1. Transformadores de distribución.....	6
4.1.1.1. Mantenimiento en transformadores de distribución.....	6
4.1.2. Índice de Riesgo y gestión de activos	7
4.1.2.1. Índice de Salud.....	8
4.1.2.2. Factor de consecuencia.....	8
4.1.2.3. Gestión de activos	8
4.1.3. Sistema de Información Geográfica SIG	10
4.1.4. Metodología DELPHI	10
4.2. Capítulo 2: Lógica Difusa	12
4.2.1. Reglas de Inferencia	12
4.2.2. Inferencia Difusa	12
4.2.3. Funciones de Membresía.....	13
4.2.3.1. Función Triangular.....	13
4.2.3.2. Función trapezoidal	14
4.2.3.3. Variables lingüísticas	15
4.2.4. Método de Mamdani	15

4.2.5.	Sistema de Inferencia de lógica difusa.....	17
4.2.6.	Defuzzificación	18
4.2.6.1.	Centro de Gravedad (COG).....	18
4.2.6.2.	Centro de área (COA)	18
4.2.6.3.	Valor e Intervalo esperado (EV y EVI).....	18
4.2.6.4.	Media de máximos (MOM)	18
4.2.6.5.	Criterio máximo	18
4.2.7.	Fuzzy Logic Toolbox	19
5.	Metodología	20
5.1.	Método de la investigación	21
6.	Resultados	22
6.1.	Criterio experto	22
6.2.	Índice de salud.....	26
6.2.1.	Variable de entrada: Edad	26
6.2.2.	Variable de entrada: Cargabilidad.....	28
6.2.3.	Variable de salida: Índice de salud.....	29
6.3.	Factor de consecuencia.....	30
6.3.1.	Variable de entrada: Capacidad.....	30
6.3.2.	Variable de entrada: Número de Clientes	31
6.3.3.	Variable de entrada: Tipo de cliente	32
6.3.4.	Variable de entrada: Número de luminarias.....	33
6.3.5.	Factor de consecuencia.....	34
6.4.	Cálculo del índice de riesgo	35
6.5.	Categorización de resultados.....	37
6.5.1.	Categorización del índice de salud.....	37
6.5.2.	Categorización del factor de consecuencia	38
6.5.3.	Categorización del índice de riesgo	39
6.6.	Análisis de los transformadores con el índice de riesgo alto	41
7.	Discusión	43
8.	Conclusiones	44
9.	Recomendaciones	45
10.	Bibliografía	46
11.	Anexos	47

Índice de Tablas

Tabla 1. Funciones de membresía de la variable edad (años).....	27
Tabla 2. Funciones de membresía de la variable cargabilidad (Porcentaje).....	28
Tabla 3. Funciones de membresía de la variable índice de salud	29
Tabla 4. Funciones de membresía de la variable capacidad (kilo volt ampere kVA).....	31
Tabla 5. Funciones de membresía de la variable Número de clientes	32
Tabla 6. Jerarquización de tipos de usuarios.....	32
Tabla 7. Funciones de membresía de la variable Número de luminarias.....	33
Tabla 8. Funciones de membresía de la variable: Factor de Consecuencia	34
Tabla 9. Funciones de membresía de la variable: Índice de Riesgo	35

Índice de Figuras

Figura 1. Elementos del sistema de gestión de activos según PAS 55-1:2008	10
Figura 2. Proceso general de la metodología Delphi	11
Figura 3. Componentes de una función de membresía.	13
Figura 4. Función de membresía triangular.	14
Figura 5. Función de membresía trapezoidal.	15
Figura 6. Componentes de una variable lingüística.	15
Figura 7. Sistema de inferencias con el método Mamdani	17
Figura 8. Modelo de una estructura FIS.....	17
Figura 9. Área de estudio.	20
Figura 10. Operalización de las variables y el proceso de investigación.....	21
Figura 11. Gráfico de resultados de la pregunta 1 de la encuesta	22
Figura 12. Gráfico de resultados de la pregunta 2 de la encuesta	23
Figura 13. Gráfico de resultados de la pregunta 3 de la encuesta	23
Figura 14. Gráfico de resultados de la pregunta 4 de la encuesta	24
Figura 15. Gráfico de resultados de la pregunta 5 de la encuesta	24
Figura 16. Gráfico de resultados de la pregunta 6 de la encuesta	25
Figura 17. Gráfico de resultados de la pregunta 7 de la encuesta	25
Figura 18. Gráfico de resultados de la jerarquización del tipo de usuario	25
Figura 19. Gráfico de resultados de la pregunta 8 de la encuesta	26
Figura 20. Esquema del sistema de inferencia para evaluar el índice de salud.....	26
Figura 21. Gráfico de dispersión de los datos de la variable Edad.	27
Figura 22. Funciones de Membresía de la variable de entrada Edad.....	28
Figura 23. Gráfico de dispersión de los datos de la variable cargabilidad.....	28
Figura 24. Funciones de membresía de la variable de entrada cargabilidad.....	29
Figura 25. Funciones de membresía de la variable de índice de salud.	29
Figura 26. Esquema del sistema de inferencia para evaluar el factor de consecuencia. .	30
Figura 27. Gráfico de dispersión de los datos de la variable capacidad.....	30
Figura 28. Funciones de membresía de la variable de entrada: capacidad (kilo volt ampere kVA).....	31
Figura 29. Gráfico de dispersión de los datos de la variable número de clientes	31
Figura 30. Funciones de membresía de la variable de entrada: Número de clientes.	32
Figura 31. Funciones de membresía de la variable de entrada: Tipo de Cliente.....	33

Figura 32. Gráfico de dispersión de los datos de la variable número de luminarias.....	33
Figura 33. Funciones de membresía de la variable de entrada: Número de luminarias..	34
Figura 34. Funciones de membresía de la variable: Factor de consecuencia.....	34
Figura 35. Esquema del sistema de inferencia para evaluar el índice de riesgo.	35
Figura 36. Funciones de membresía de la variable: Índice de riesgo	35
Figura 37. Superficie del índice de riesgo.....	36
Figura 38. Mapa de calor del índice de riesgo	36
Figura 39. Gráfico de dispersión de los resultados del índice de salud.	37
Figura 40. Categorización del índice de salud	38
Figura 41. Gráfico de dispersión de los resultados del factor de consecuencia	38
Figura 42. Categorización del factor de consecuencia.....	39
Figura 43. Índice de riesgo vs factor de consecuencia.....	39
Figura 44. Gráfico de dispersión del índice de riesgo.....	40
Figura 45. Categorización del índice de riesgo	40
Figura 46. Curva de tendencia del índice de riesgo. Valores de mayor a menor	41

Índice de Anexos

Anexo 1. Base de datos procesada del alimentador Celi Román.....	48
Anexo 2. Reglas difusas para el cálculo del índice de salud.....	57
Anexo 3. Reglas difusas para el cálculo del factor de consecuencia	58
Anexo 4. Reglas difusas para el cálculo del índice de riesgo	65
Anexo 5. Código utilizado en el software especializado	66
Anexo 6. Tablas de categorización del índice de salud.....	67
Anexo 7. Tablas de categorización del factor de consecuencia	71
Anexo 8. Tablas de categorización del índice de riesgo	75
Anexo 9. Encuesta propuesta para la obtención del criterio experto	79
Anexo 10. Certificado de traducción de resumen	85

1. Título

**“Evaluación del índice de riesgo de transformadores de distribución
utilizando sistemas de inferencia difusa en el marco de la gestión de activos”**

2. Resumen

En el presente trabajo de titulación se evalúa el índice de riesgo de los transformadores de distribución conectados al alimentador Celi Román pertenecientes a la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. EERSSA. El índice de riesgo de los transformadores de distribución se determina mediante la integración del índice de salud o estado de degradación de la unidad y el factor de consecuencia que determina las consecuencias de la indisponibilidad de los transformadores. Estas variables son calculadas con base en información comúnmente disponible en el sistema de información geográfica perteneciente a la EERSSA; la evaluación del índice de riesgo permite pronosticar la posible indisponibilidad futura del transformador y tomar los correctivos de forma oportuna. El método propuesto se basa en la creación de tres Sistemas de Inferencia Fuzzy, que basados en la integración del criterio de expertos mediante la metodología DELPHI permite la definición de los rangos de las funciones de pertenencia de las variables.

La evaluación del índice de riesgo permite a los operadores de sistemas eléctricos la implementación de la gestión de activos, optimizando recursos tanto en mantenimiento como en reemplazo, pronóstico de posibles fallas y la expansión o renovación del parque de transformadores de distribución.

Palabras Claves:

Lógica Difusa, transformadores de distribución, índice de riesgo, gestión de activos.

2.1. Abstract

In the present titling work, the risk index of the distribution transformers connected to the Celi Román feeder belonging to the Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. is evaluated. The risk index of the distribution transformers is determined by integrating the health index or state of degradation of the unit and the consequence factor that determines the consequences of the unavailability of the transformers. These variables are calculated based on information available in the geographic information system belonging to EERSSA. The evaluation of the risk index makes it possible to forecast the possible future unavailability of the transformer and take corrective measures in a timely manner. The proposed method is based on the creation of three Fuzzy Inference Systems, which was based on the integration of the criteria of experts through the DELPHI methodology, allowing the definition of the ranges of the membership functions of the variables.

The evaluation of the risk index allows electrical system operators to implement asset management, optimizing resources both in maintenance and replacement, forecasting of possible failures and the expansion or renewal of the distribution transformer fleet.

Keywords:

Fuzzy Logic, Distribution transformer, risk index, assets management.

3. Introducción

El presente proyecto se lleva a cabo con la intención de proponer un modelo de inferencia difusa para el análisis del índice de riesgo de los transformadores de distribución en el marco de la gestión de activos. Para ello se propone una metodología basada en lógica difusa para determinar el índice de salud y el factor de consecuencia, y con estos, el índice de riesgo de cada una de las unidades; esto como un enfoque a la previsibilidad del fallo de un transformador de distribución en función de su estado actual. A través de lo cual se puede gestionar la toma de decisiones con antelación.

Dentro del campo práctico se incluye el desarrollo de los sistemas de inferencia difusa para el análisis de la base de datos procesada en el software ingenieril relacionado a modelos de lógica difusa. Con lo cual se puede determinar el índice de salud, factor de consecuencia e índice de riesgo de cada uno de los transformadores de distribución; indicadores que se enfocan en el marco de la implementación de sistemas para gestión de activos al permitir cuantificar la condición del equipo en función de parámetros referentes a la degradación acumulativa de la vida útil; considerando a las unidades de transformación como los activos vitales de las redes eléctricas de distribución.

En el primer capítulo se especifican las generalidades conceptuales del índice de riesgo, índice de salud, factor de consecuencia, sistemas de información geográfica y la metodología Delphi que nos dará la pauta para la posterior toma de datos referentes al criterio experto referente a la temática.

En el segundo capítulo se realiza un análisis de la lógica difusa, conceptos y sus componentes principales que se relacionan directamente con el tema en estudio. En las que se destacan, los de funciones de membresía, variables lingüísticas, reglas difusas y la defuzzificación.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar un sistema de inferencia de lógica difusa para la evaluación del índice de riesgo de los transformadores de distribución conectados al alimentador Celi Román.

Objetivos específicos

- Identificar variables críticas para determinar parámetros de entrada para el sistema de inferencia de lógica difusa y analizar transformadora de distribución conectados al alimentador Celi Román
- Modelar el sistema de inferencia de lógica difusa para el análisis de la base de datos.
- Evaluar y categorizar el índice de salud, factor de consecuencia e índice de riesgo de los transformadores de distribución con el sistema de inferencia de lógica difusa

4. Marco teórico

4.1. Capítulo 1: Índice de Riesgo en transformadores de distribución

“La medida del riesgo varía en el tiempo ya que, en general, la probabilidad de la falla de un transformador aumenta a medida que envejece. Además, las consecuencias de su falla varían con los cambios que ocurren en el funcionamiento entorno de la unidad.” (Medina et al., 2022). Esta falla puede ocasionar la indisponibilidad definitiva del transformador de distribución y por ende el desabastecimiento del servicio eléctrico a los usuarios finales.

“Los transformadores de distribución tienen un impacto significativo en las pérdidas de sistemas de transmisión y distribución de energía de una empresa pública. Según un estudio realizado en EE. UU., los transformadores de distribución contribuyeron alrededor del 40% de las pérdidas por no generar en empresas públicas. A medida que la inversión en el sistema y los costos de energía continúan aumentando, las empresas eléctrica están cada vez más interesados en instalar transformadores energéticamente eficientes en sus redes de distribución.”(Georgilakis, 2009)

4.1.1. Transformadores de distribución

Los transformadores de distribución son la última fase para que los usuarios puedan hacer uso de la energía eléctrica. Estos transformadores son diseñados bajo las normas nacionales INEN 2120 y las normas internacionales ANSI/IEEE C57.12. (Preciado Mite & Rodas Herrera, 2015). De acuerdo a (Georgilakis, 2009), son usados en redes de distribución para transmitir la energía eléctrica desde la red de medio voltaje a la red de bajo voltaje correspondiente a los usuarios finales, y se encuentran en el rango de potencia de 50 a 1600 kVA.

Según (Harlow, 2012), “se llegó a un entendimiento de que el costo total de poseer un transformador constaba de dos importantes partes, el precio de compra y el costo de suplir las pérdidas térmicas del transformador durante un supuesto vida, que puede ser de 20 a 30 años. Para ser consistente, los costos futuros de las pérdidas deben ser llevados a el presente, de modo que los dos costos están ambos sobre una base de valor presente.”

4.1.1.1. Mantenimiento en transformadores de distribución

El mantenimiento del transformador es una actividad que se realiza en transformadores para reducir o eliminar los puntos débiles. Esta es una de las principales estrategias en la gestión de activos. El objetivo es aumentar el tiempo de vida útil de los

transformadores y disminuir sus tasas de falla, lo que evitará sus cortes y solucionará problemas.

En los últimos años, se han presentado muchas estrategias para el servicio y mantenimiento de los componentes del sistema de distribución, como el transformador; cada uno de ellos en función del financiamiento y la liquidez de la empresa de distribución para la toma de medidas sobre el proceso de planificación de acciones.

“Existen varios métodos de mantenimiento, como el mantenimiento preventivo, el mantenimiento correctivo, el mantenimiento basado en la condición, y mantenimiento basado en riesgos. Si la planificación del mantenimiento es una selección adecuada, puede reducir los costos de mantenimiento.” (Luangtriratana & Rungseevijitprapa, 2021)

“El proceso de gestión de mantenimiento podemos dividirlo en dos partes principales:

- i) La definición de la estrategia de mantenimiento;
- ii) La implementación de la estrategia de mantenimiento.

La primera de estas partes, el proceso de definición de la estrategia de mantenimiento, requiere la definición de los objetivos de mantenimiento como “input” del mismo. Obviamente, los objetivos de mantenimiento dimanan directamente del plan de negocio de la organización en cuestión. Diseñar estrategias de mantenimiento que estén alineadas con los planes de negocio es un aspecto clave y condiciona la consecución de los objetivos del mantenimiento y en última estancia los reseñados en el plan de negocio de la organización.

La segunda parte del proceso, la implementación de la estrategia tiene un distinto nivel de importancia y tienen que ver con nuestra habilidad para asegurar niveles adecuados de formación del personal, de preparación de los trabajos, con la selección de las herramientas adecuadas para realizar las diferentes tareas o, por ejemplo, con el diseño y consecución de la ejecución a tiempo de los diferentes programas de mantenimiento.”.(Parra & Crespo, 2012)

4.1.2. Índice de Riesgo y gestión de activos

El análisis estadístico muestra que las fallas tienen un comportamiento dinámico, variando año a año la criticidad de cada transformador.

“El análisis del índice riesgo en transformadores de distribución depende de aspectos netamente técnicos, ya que son unidades a las cuales escasamente se les realiza pruebas de rutina o mantenimientos preventivos; estos aspectos están asociados a la probabilidad de ocurrencia de una falla que produzca la indisponibilidad definitiva de la

unidad y las consecuencias respectivas. La medida de riesgo varía en general, la probabilidad de falla de un transformador se incrementa a medida que envejece, otra de las consecuencias de su falla, es la variación que se da con los cambios que suceden en el entorno de operación del transformador.”(Borja Arbito, 2019)

El índice de riesgo es un indicador útil para la toma de decisiones estratégicas sobre un activo, se determina a partir de las variables de trabajo asociadas a una unidad que permitan estimar el estado del mismo en cualquier momento, combinando el conocimiento adquirido acerca del activo y el criterio experto para la toma de decisiones.

4.1.2.1. Índice de Salud

El índice de salud en los transformadores es una herramienta útil para representar el estado de una unidad y cuantificar los diversos parámetros que afectan directa o indirectamente las características de envejecimiento y funcionamiento del mismo.

Según (Párraga Acosta, 2019), “cuando una flota de transformadores en servicio está envejeciendo, mayor atención se debe prestar a su disponibilidad y confiabilidad; por lo que la evaluación de su condición y riesgo son necesarias para mejorar el rendimiento del transformador, extender su vida útil, disminuir los costos y tomar las mejores decisiones técnicas y económicas respecto a la gestión del ciclo de vida.”

4.1.2.2. Factor de consecuencia

El factor de consecuencia es un indicador basado en la premisa de que, todo activo fallará en el futuro y tendrá consecuencias cuantificables en términos operativos y técnicos. Este indicador varía de acuerdo a cada transformador; variables como capacidad, cargabilidad, usuarios y luminarias conectadas determinan el estado del activo y permiten categorizar el nivel de consecuencia del mismo en el sistema. Algunas de las premisas considerables para denotar este factor son: confiabilidad, disponibilidad y seguridad del sistema, seguridad pública e impacto ambiental.

Según (Borja Arbito, 2019), “la evaluación del factor de consecuencia de la indisponibilidad de un transformador se basa en indicadores respecto a la afectación de calidad del suministro y la seguridad del entorno.”

4.1.2.3. Gestión de activos

La gestión de activos busca administrar todo el ciclo de vida de los activos de una organización con el fin de maximizar su valor. Existen beneficios como la reducción del riesgo y mejora de procesos, enfoque a largo plazo y sostenible para la toma de decisiones, apoya la gestión energética, mejora resultados financieros, etc.

Los activos se definen como un bien tangible o intangible que tiene una empresa de la que se espera tener un beneficio económico a futuro y estos varían de acuerdo a la naturaleza de la actividad que desarrolla la entidad.

La gestión de activos incluye una serie de diferentes acciones enfocadas en la cuantificación de un activo y su riesgo a lo largo de toda la vida útil, con lo que se pueda mejorar su rendimiento y obtener beneficio óptimo.

“Para activos importantes en un sistema eléctrico como los transformadores de distribución, existen varias técnicas, una de las más comunes es a través de estrategias de mantenimiento, sin embargo, estimar cuando una acción de mantenimiento es factible es bastante difícil, por lo tanto, se aplica el método de lógica difusa, utiliza la variable de condición de salud y modelos de tasa de falla utilizados para simular el funcionamiento de cada transformador.” (Germán et al., 2014)

La gestión de activos implica optimizar el ciclo de vida de los activos para maximizar el rendimiento de estos, no solo en un contexto de seguridad sino también en un contexto social y ambiental aceptable. Según (Parra & Crespo, 2012), “La gestión de mantenimiento forma parte de la moderna dirección de operaciones y se orienta a la utilización óptima de unos medios y recursos, con la finalidad de conservar y/o restituir la función de los equipos de producción a unas condiciones que les permitan cumplir con los objetivos requeridos durante unos determinados periodos de tiempo. En el año 2004, como una respuesta a la necesidad del sector industrial de contar con un estándar para la aplicación de la gestión de activos, se crea en Inglaterra la propuesta de norma PAS 55 (Publicly Available Specification). Posteriormente en el año 2009, la organización ISO propone el desarrollo de un estándar de Gestión de Activos (inicialmente basado en la propuesta de norma PAS 55), conocido hoy en día como el estándar ISO 55000 (en proceso de desarrollo), estas propuestas de estándares se han convertido en la referencia internacional en el área de gestión de activos.” Los elementos de un sistema de gestión de activos según PAS 55-1:2008 pueden visualizar en la Figura 1:

Figura 1.

Elementos del sistema de gestión de activos según PAS 55-1:2008



Fuente: (Parra & Crespo, 2012)

4.1.3. Sistema de Información Geográfica SIG

El Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés “Geographic Information System”) es una herramienta que permite controlar y administrar el sistema de distribución en todo su conjunto en espacio y tiempo en forma real, con información actualizada y precisa.

Se compone de un conjunto de elementos de hardware, software de procedimientos diseñados para adquirir, administrar, manipular, modelar visualizar datos referenciados en el espacio y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio. La información geográfica va a ser aquella información que tiene algún componente espacial, es decir, la ubicación; además, una información atribuida que nos detalle más sobre ese elemento en cuestión.

4.1.4. Metodología DELPHI

“El método Delphi es una técnica de recolección de información que permite obtener la opinión de un grupo de expertos a través de la consulta reiterada. Esta técnica, de carácter cualitativo, es recomendable cuando no se dispone de información suficiente para la toma de decisiones o es necesario, para nuestra investigación, recoger opiniones consensuadas y representativas de un colectivo de individuos. En este artículo se describen las características principales de la técnica y se detalla el proceso de consultas reiteradas en la aplicación de la técnica. Es una técnica muy versátil, ya que hace uso de la información que proviene tanto de la experiencia como de los conocimientos de los

participantes de un grupo, normalmente compuesto por expertos en la temática. Aunque existe una única metodología bajo este nombre, sus usos son muy diversos.

Se puede entender su utilidad frente a situaciones de incertidumbre o cuando se carece de información objetiva. Se trata de circunstancias en las que es apropiado utilizar el juicio experto, que con esta técnica aumenta su fiabilidad, ya que supera los sesgos y limitaciones de un solo individuo y permite basarse en el juicio intersubjetivo.” (Reguant-Álvarez, 2016).

Las fases más representativas utilizadas en la metodología Delphi, se muestran en la Figura 2.

Figura 2.

Proceso general de la metodología Delphi



Fuente: (Reguant-Álvarez, 2016), editado por: Autor

4.2. Capítulo 2: Lógica Difusa

La lógica que utiliza expresiones que no son ni completamente ciertas ni falsas, en un ambiente de incertidumbre o imprecisión. Según (González Redondo, 2013), “porque las cosas no son simplemente blancas o negras, todo depende del cristal con que se las mire, la capacidad de pensar del hombre y su interés por reflejar el mundo real ha contribuido a buscar una lógica que fuese más allá del clasicismo aristotélico en el cual los umbrales de decisión quedan bien definidos. La lógica difusa se encarga de representar las proposiciones del lenguaje humano con innumerables matices que no tienen un significado preciso, que no responden a un SI/NO o a un VERDADERO/FALSO.”

Es muy utilizada para predicción y optimización, en procesos donde se puede introducir el criterio experto en base a conceptos.

4.2.1. Reglas de Inferencia

Las reglas difusas (reglas difusas si-entonces) son capaces de modelar la opinión de expertos o el conocimiento de sentido común a menudo expresado en términos lingüísticos. La asociación intuitiva que existe entre los datos de entrada típicos dados y los datos de salida típicos es difícil de describir de una manera matemáticamente correcta, debido a lo incierto, naturaleza a menudo subjetiva de esta información. Las reglas difusas son herramientas que son capaces de modelar y utilizar dicho conocimiento.

Una regla difusa es un triplete (A, B, R) que consta de un antecedente $A \in F(X)$, una consecuencia $B \in F(X)$ que son variables lingüísticas, unidas a través de una relación difusa $R \in F(X \times Y)$.

Usando conjuntos difusos, una regla difusa se escribe de la siguiente manera:

Si x es A entonces y es B (Bede, 2013)

4.2.2. Inferencia Difusa

La inferencia difusa es el proceso de obtener una conclusión para una entrada dada que posiblemente nunca se había encontrado antes. La regla básica para un sistema de inferencia difusa es la regla de composición de la inferencia se basa en la regla clásica de Modus Ponens. Recordemos primero el clásico Modus Ponens de la lógica booleana:

premisa: si p entonces q

hecho: p

conclusión: q

Dada una regla difusa o una regla difusa base $R \in F(X \times Y)$, la composición regla de inferencia es una función $F: F(X) \rightarrow F(Y)$ determinada a través de una composición

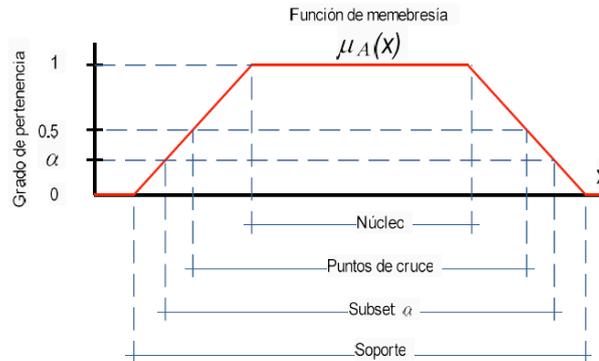
$B' = F(A') = A' \cdot R$, con $\cdot : F(x) \cdot F(X \times Y) \rightarrow F(Y)$ siendo una composición de relaciones difusas. (Bede, 2013)

4.2.3. Funciones de Membresía

La Figura 3 muestra los componentes principales de las funciones de membresía para la definición de sus rangos respectivos.

Figura 3.

Componentes de una función de membresía.



Fuente: (Borja Arbito, 2019)

- “Soporte del conjunto difuso A: es el subconjunto discreto cuyo valor de la función de membresía $\mu_A(x)$ es diferente de cero, $\mu_A(x) \neq 0$.”
- Puntos de cruce: es el subconjunto discreto de x tal que el valor de su función de membresía es igual o mayor a 0.5, $\mu_A(x) \geq 0.5$.
- Subconjunto α : es el subconjunto discreto de x tal que el valor de su función de membresía es igual o mayor que α , $\mu_A(x) \geq \alpha$.
- Núcleo: es el subconjunto de x cuyo valor en la función de membresía es uno, $\mu_A(x) = 1$.”(Borja Arbito, 2019)

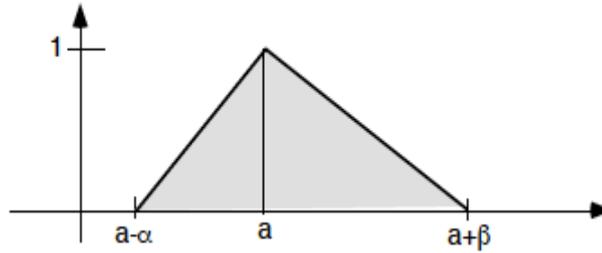
4.2.3.1. Función Triangular

Un conjunto difuso A se llama triangular con pico (o centro) α , límite izquierdo $\alpha > 0$ y límite derecho $\beta > 0$, como se muestra en la Figura 4. Su función de pertenencia tiene la siguiente forma:

$$A(t) = \begin{cases} 1 - (a - t)/\alpha & \text{si } a - \alpha \leq t \leq a \\ 1 - (t - a)/\beta & \text{si } a \leq t \leq a + \beta \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

Se usa la notación $A = (a, \alpha, \beta)$. (Fullér, 2013)

Figura 4.
Función de membresía triangular.



Fuente: (Fullér, 2013)

“La importancia de las variables difusas es que facilitan las transiciones graduales entre estados y, en consecuencia, poseen una capacidad natural para expresar y hacer frente a la observación e incertidumbres de medida. Variables tradicionales, a las que podemos referirnos como crujientes variables, no tienen esta capacidad. Aunque la definición de estados por conjuntos nítidos es matemáticamente correcta, no es realista frente a los inevitables errores de medición. A medida que cae en una vecindad cercana de cada frontera definida con precisión entre estados de una variable nítida se toma como apoyo probatorio para uno solo de los estados, en a pesar de la inevitable incertidumbre que implica esta decisión. La incertidumbre llega a su máximo en cada borde, donde cualquier medición debe considerarse como evidencia igual para los dos estados a ambos lados de la frontera.”(Klir, 1995)

Según (Medina et al., 2022), “para determinar el impacto, los márgenes o rangos de las entradas deben ser evaluados y establecidos por cada organización”

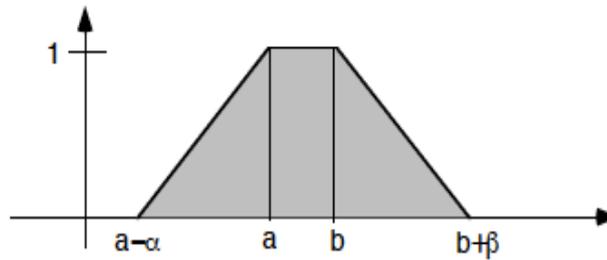
4.2.3.2. Función trapezoidal

Esta función de pertenencia trapezoidal tiene un intervalo de tolerancia $[a, b]$, límite izquierdo α y límite derecho β , como se muestra en la Figura 5; y su función de pertenencia tiene la forma:

$$A(t) = \begin{cases} \frac{1 - (a - t)/\alpha}{1} & \text{si } a - \alpha \leq t \leq a \\ \frac{1}{1} & \text{si } a \leq t \leq b \\ \frac{1 - (t - b)/\beta}{0} & \text{si } a \leq t \leq b + \beta \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

Se usa la notación $A = (a, b, \alpha, \beta)$. (Fullér, 2013)

Figura 5.
Función de membresía trapezoidal.



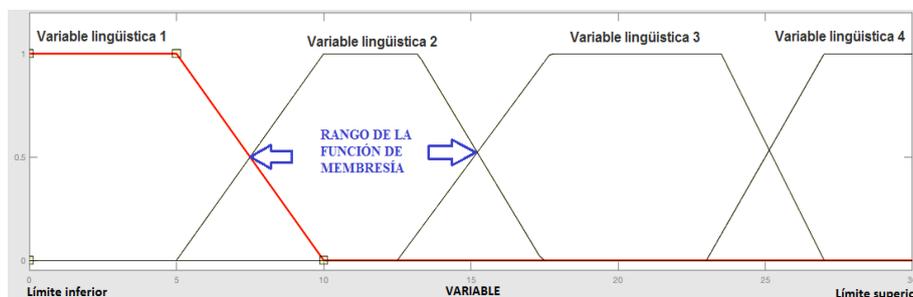
Fuente: (Fullér, 2013)

4.2.3.3. Variables lingüísticas

Según (Klir, 1995), las variables lingüísticas sirven para representar un contexto en particular, tal como pequeño, mediano, grande; y cuyos estados son números borrosos. Cada variable lingüística cuyos estados se expresan mediante términos lingüísticos interpretados como números borrosos específicos se define en términos de una variable base, cuyos valores son números reales dentro de un rango específico.

“Cada variable lingüística está totalmente caracterizada por un quintuple (v, T, X, g, m) en el que v es el nombre de la variable, T es el conjunto de términos lingüísticos de v que se refieren a una variable base cuyos valores oscilan sobre un conjunto universal, g es una regla sintáctica (una gramática) para generar términos lingüísticos, y m es una regla semántica que asigna a cada término lingüístico $t \in T$ su es decir, $m(t)$, que es un conjunto borroso en X (es decir, $m: T \rightarrow \mathcal{F}(X)$)” (Klir, 1995). Los componentes de la variable lingüística se muestran en la Figura 6.

Figura 6.
Componentes de una variable lingüística.



Fuente: Autor

4.2.4. Método de Mamdani

El método propuesto por Mamdani parte del conocimiento profundo del problema a ser resuelto, la comprensión extensiva de las entradas y salidas, y la definición de un conjunto claro de reglas que relacionen las variables de entrada con las de salida.

Según (Fullér, 2013), el procedimiento es:

- Selección de variables relevantes de entrada y salida.
- Determinación de un número de términos lingüísticos que describan los estados de las variables.
- Elegir funciones de membresía correctamente parametrizadas para entradas y salidas, las funciones de membresía representan los estados de las variables.
- Creación de un conjunto de reglas si-entonces que vinculen las entradas y las salidas.
- Mejorar las reglas mediante la solución de casos conocidos con respuestas esperadas.
- Refinar los parámetros de las funciones de membresía usando métodos de optimización.

Para interpretar de mejor manera, se asume un sistema con dos reglas de control difuso de la forma:

Regla 1:	Si x es A_1 e y es B_1	entonces z es C_1
Regla 2:	Si x es A_2 e y es B_2	entonces z es C_2
Hecho:	x es \bar{x}_0 e y es	
Consecuencia:		z es C

El sistema de inferencia difusa es modelado por el operador mínimo de Mamdani y el conectivo de la oración además es interpretado como anillo de las proposiciones y definido por el operador máximo.

Los niveles de activación de las reglas, indicados por α_i , $i = 1, 2$, se calculan mediante:

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$$

Las reglas de salida individuales son obtenidas por:

$$C'_1(\omega) = (\alpha_1 \wedge C_1(\omega)), C'_2(\omega) = (\alpha_2 \wedge C_2(\omega))$$

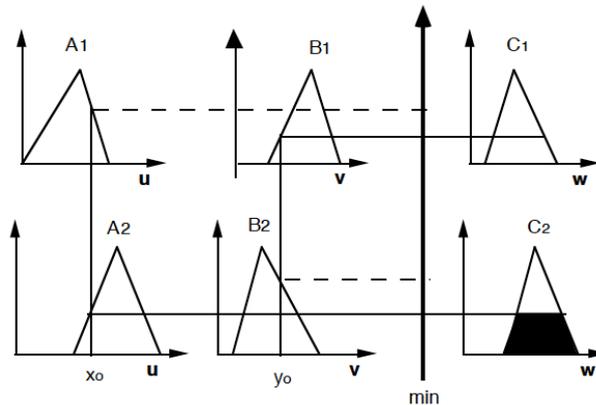
Luego, la salida general del sistema se calcula mediante un anillo de reglas de salida individuales.

$$C(\omega) = C'_1(\omega) \vee C'_2(\omega) = (\alpha_1 \wedge C_1(\omega)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(\omega))$$

Para finalizar se emplea cualquier estrategia desfuzzificadora para obtener la acción de control determinística requerida, tal como se muestra en la Figura 7.

Figura 7.

Sistema de inferencias con el método Mamdani



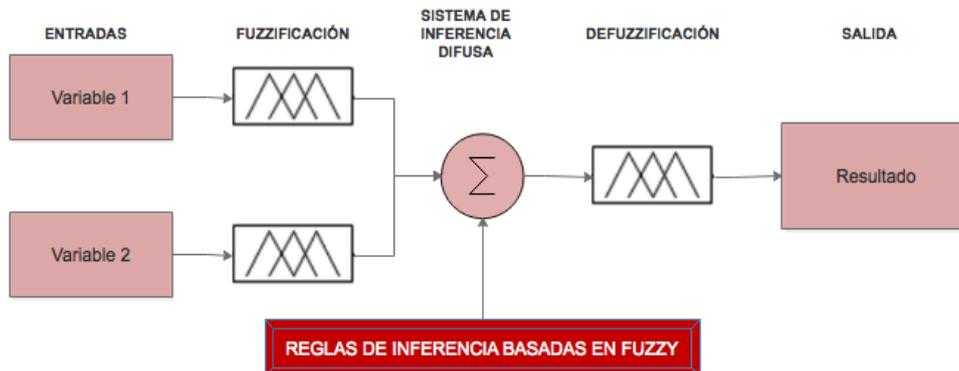
Fuente: (Fullér, 2013)

4.2.5. Sistema de Inferencia de lógica difusa

La estructura de un sistema de Inferencia de lógica difusa (FIS) se puede apreciar en la Figura 8.

Figura 8.

Modelo de una estructura FIS.



Fuente: Autor

Acorde a (Fullér, 2013) “el proceso de inferencia difusa consiste en:

- *Determinación de la relevancia o coincidencia de cada regla insertada con el actual valor(es) de entrada.*
- *Determinación de la salida de cada regla como subconjunto difuso del espacio de salida. Se denota estas salidas de reglas individuales como R_j .*
- *Agregación de las reglas individuales de salida para obtener la salida general del sistema difusa como subconjunto difuso del espacio de salida. Se denota esta salida global como R .*
- *Selección de alguna acción basada en el conjunto de salida.”*

4.2.6. Defuzzificación

(Bede, 2013) y (Hampel et al., 2013) señalan que la defuzzificación es el paso final en un algoritmo de control difuso. Dado que el sistema debe otorgar una salida representativa clara, se debe escoger el método adecuado, basado en la aplicación que estemos trabajando. Los más conocidos son:

4.2.6.1. Centro de Gravedad (COG)

Es el método más usado, en donde el valor seleccionado es el centro de gravedad del conjunto borroso $u \in F(X)$. Se tiene:

$$COG(u) = \frac{\int_w x \cdot u(x) dx}{\int_w u(x) dx}$$

4.2.6.2. Centro de área (COA)

Si $u \in F(\mathbb{R})$ entonces el número $COA(u)$ es definido como el punto de soporte de u que divide el área bajo la función de membresía en 2 parte iguales. Si $COA(u) = a$, entonces a satisface la condición.

$$\int_{-\infty}^a u(x) dx = \int_a^{\infty} u(x) dx$$

4.2.6.3. Valor e Intervalo esperado (EV y EVI)

Si u es un número difuso continuo entonces el valor esperado $EV(u)$ es el punto medio del intervalo esperado y está dado por:

$$EV(u) = \frac{1}{2} \int_0^1 (u_r^- + u_r^+) dr$$

El intervalo esperado es:

$$EVI(u) = \left[\int_0^1 (u_r^- dr) \int_0^1 u_r^+ dr \right]$$

4.2.6.4. Media de máximos (MOM)

Este defuzzificador selecciona el valor medio de los puntos donde el grado de la función de membresía alcanza el máximo.

$$MOM(u) = \frac{\int_{x \in U} x dx}{\int_{x \in U} dx}$$

4.2.6.5. Criterio máximo

Es un método utilizado para evitar problemas prácticos, la elección de la defuzzificación puede ser arbitraria, de manera que: $x \in U$ con:

$$U = \{x \in X | u(x) = \max_{t \in X} u(t)\}$$

4.2.7. Fuzzy Logic Toolbox

Es una herramienta que permite modelar comportamientos complejos del sistema mediante reglas lógicas simples y, posteriormente, implementar estas reglas en un sistema de inferencia difusa (FIS) de manera simple en el software especializado.

La interfaz gráfica de un FIS es sencilla y amigable lo que permite analizar, diseñar y simular controladores difusos de manera óptima mediante muchos métodos comunes, incluidos el clustering difuso y el aprendizaje neurodifuso adaptativo.

5.1. Método de la investigación

Durante el desarrollo de la investigación, se requiere el levantamiento y categorización de la base datos con la información disponible en el Sistema de Información Geográfico (SIG) de la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A., para desarrollar el análisis de los equipos utilizando lógica difusa.

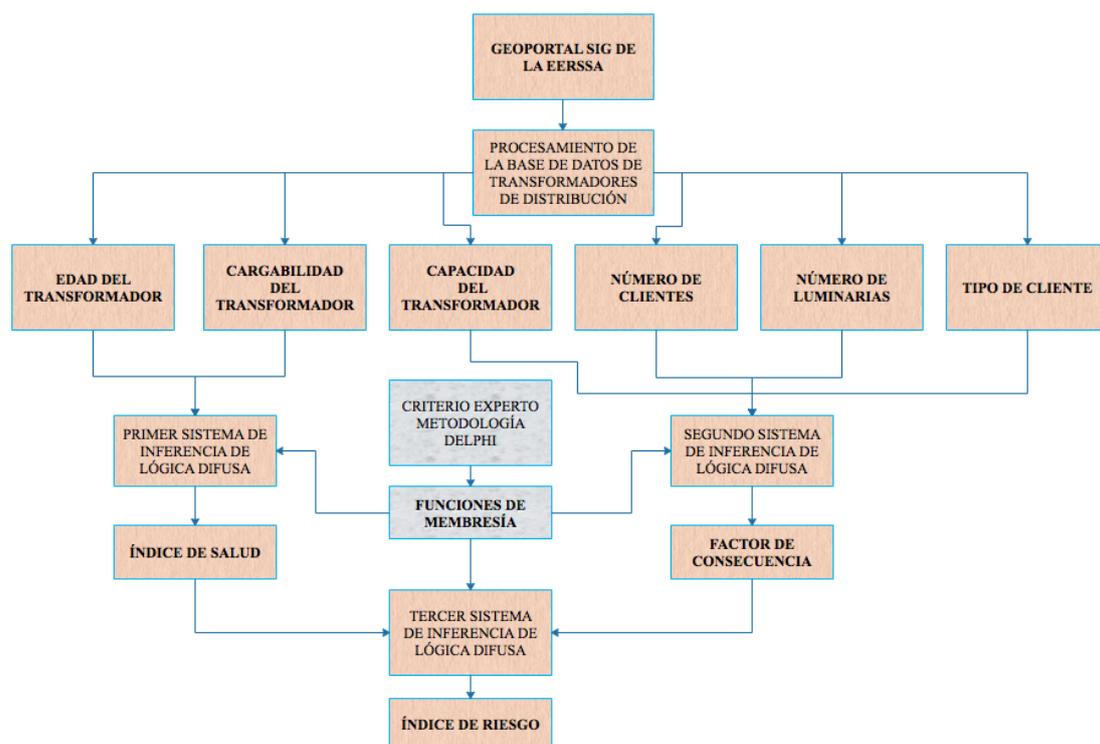
Para determinar las funciones de membresía de cada una de las variables en estudio, se realiza una encuesta que permite la obtención del criterio experto de profesionales inmersos en la temática, basado en sus conocimientos o a través de la experiencia.

La base de datos es llevada a análisis con el sistema de inferencia de lógica difusa, desarrollado en el software especializado, para obtener el índice de riesgo de cada uno de los transformadores. Esta información permitirá el desarrollo de un plan de gestión de activos con las medidas requeridas para garantizar la disponibilidad y fiabilidad de la red en todo momento.

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos, en la Figura 10 se presenta el esquema de la operacionalización de las variables y el proceso de investigación.

Figura 10.

Operalización de las variables y el proceso de investigación.



Fuente: Autor

6. Resultados

6.1. Criterio experto

Las variables de entrada empeladas en los sistemas de inferencia difusa (FIS) fueron definidas en función de la información disponible en el sistema de información geográfica (SIG) de la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (EERSSA) y la revisión del estado del arte. El total de transformadores de distribución de la base de datos procesada es 179 unidades, como se puede apreciar en la Tabla , del Anexo 1.

La información del sistema de información geográfica fue procesada con el fin de determinar datos inconsistentes, faltantes y así discriminar las variables requeridas. La base de datos se muestra en el Anexo 1, Tabla 1A.

Estos datos fueron procesados en gráficos que permitan visualizar la dispersión de los valores y con ello encuestar a los profesionales, su criterio experto en referencia a las funciones de membresía para cada una de las variables, tanto de entrada como de salida. Para la obtención del criterio experto con respecto al tratamiento de las variables y sus funciones de membresía, y al usar las bases de la metodología Delphi, se realiza una encuesta de aplicación enfocada en profesionales con experiencia en el campo de distribución, tanto miembros de empresas públicas como contratistas. El modelo de la encuesta utilizada se muestra en el Anexo 9, y tras aplicar la encuesta a 35 profesionales, se obtiene los siguientes gráficos de los resultados; de los cuales la opción a tomar en cuenta en la definición de las funciones de membresía será la de mayor porcentaje:

- *Pregunta 1*

La primera pregunta tiene enfoque en la edad del transformador de distribución. Con un porcentaje del 74,3 % se determina que las funciones de membresía de la variable de edad deben definirse en función de los datos obtenidos de la base de datos en estudio, tal como se muestra en la Figura 11.

Figura 11.

Gráfico de resultados de la pregunta 1 de la encuesta



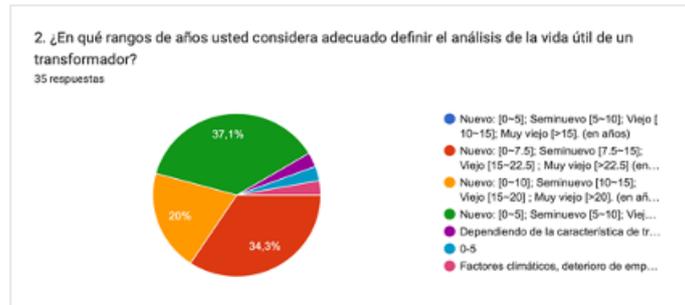
Fuente: Autor

- *Pregunta 2*

La segunda pregunta define los rangos de las funciones de membresía de la variable edad en: Nuevo: [0 ~ 5]; Seminuevo [5 ~ 10]; Viejo [10 ~ 15]; Muy viejo [$>$ 15]. (en años); con un porcentaje del 37,1 % tal como se muestra en la Figura 21.

Figura 12.

Gráfico de resultados de la pregunta 2 de la encuesta



Fuente: Autor

- *Pregunta 3*

La tercera pregunta permite definir los rangos de las funciones de membresía de la variable cargabilidad. Con un 54,3 %, la respuesta más relevante es: Muy Baja: [0 ~20]; Baja [20 ~ 40]; Moderada [40 ~ 60]; Alta [$>$ 60] (%); como se muestra en la Figura 13.

Figura 13.

Gráfico de resultados de la pregunta 3 de la encuesta



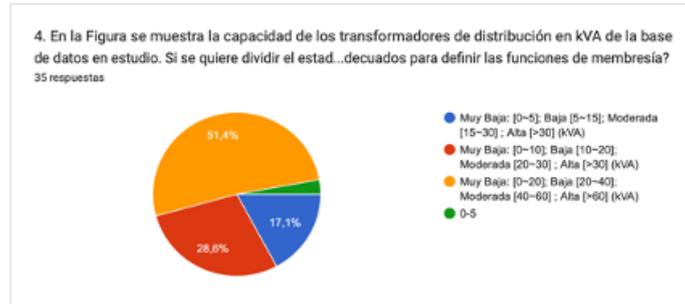
Fuente: Autor

- *Pregunta 4*

La cuarta pregunta analiza la variable capacidad y los mejores rangos para definir las respectivas funciones de membresía. Como se muestra en la Figura 14, con un porcentaje del 51,4 % la mejor respuesta seleccionada por los usuarios es: Muy Baja: [0 ~ 20]; Baja [20 ~ 40]; Moderada [40 ~ 60]; Alta [$>$ 60] (kVA).

Figura 14.

Gráfico de resultados de la pregunta 4 de la encuesta



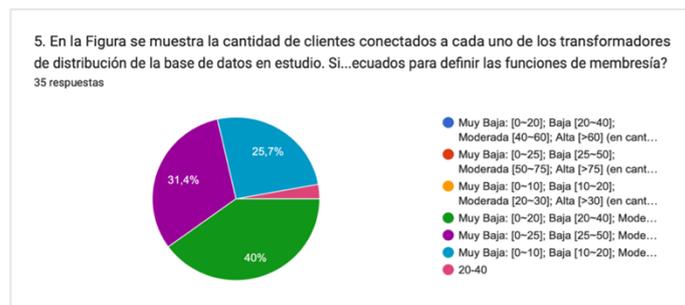
Fuente: Autor

- *Pregunta 5*

La quinta pregunta permite categorizar los rangos del número de clientes conectados transformador de distribución y por ende el alcance de afectación en caso de indisponibilidad de la unidad. Con un porcentaje del 40 %, la respuesta de mayor peso define las funciones de membresía en: Muy Baja: [0 ~ 20]; Baja [20 ~ 40]; Moderada [40 ~ 60]; Alta [> 60] (en cantidad); como se muestra en la Figura 15.

Figura 15.

Gráfico de resultados de la pregunta 5 de la encuesta



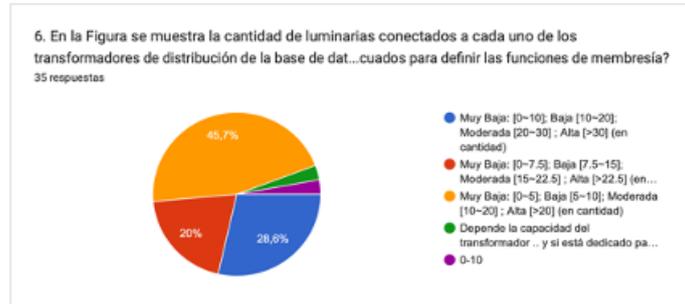
Fuente: Autor

- *Pregunta 6*

La sexta pregunta permite definir las funciones de membresía de la variable número de luminarias conectadas al transformador de distribución y con ello el grade de afectación a los usuarios finales en caso del fallo de la unidad. Como se muestra en la Figura 25, la respuesta de mayor acogida es: Muy Baja: [0 ~ 5]; Baja [5 ~ 10]; Moderada [10 ~ 20]; Alta [> 20] (en cantidad) con un porcentaje del 45,7 %.

Figura 16.

Gráfico de resultados de la pregunta 6 de la encuesta



Fuente: Autor

- *Pregunta 7*

La séptima pregunta hace referencia a la necesidad o no necesidad de jerarquizar el tipo de usuario conectado a al transformador de distribución como una variable para determinar el factor de consecuencia. La respuesta es SI con un 77,1 %, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17.

Gráfico de resultados de la pregunta 7 de la encuesta

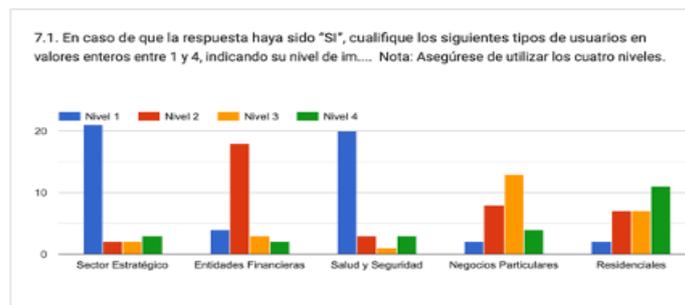


Fuente: Autor

Dado el resultado afirmativo, se procede a encuestar en referencia al nivel que se les colocaría a los diferentes tipos de usuarios que se encuentran en la base de datos en estudio. Los resultados se presentan en la Figura 18.

Figura 18.

Gráfico de resultados de la jerarquización del tipo de usuario



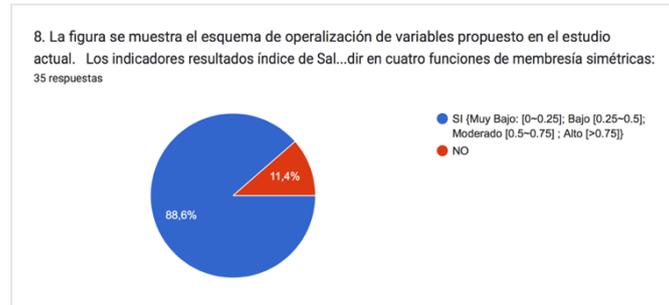
Fuente: Autor

- *Pregunta 8*

La octava pregunta hace referencia a la definición de cuatro funciones de membresía simétricas para los indicadores índice de salud, factor de consecuencia e índice de riesgo. La respuesta es SI con un 88,6 %. Los resultados se presentan en la Figura 19.

Figura 19.

Gráfico de resultados de la pregunta 8 de la encuesta



Fuente: Autor

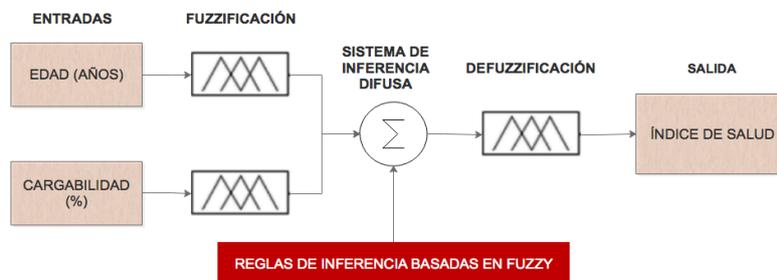
Con estos resultados, se puede definir de manera adecuada las funciones de membresía englobando el criterio experto en base a la experiencia de personal y conocimiento involucrado directamente con las redes de distribución.

6.2. Índice de salud

Para el cálculo del índice de salud se utiliza un proceso de fuzzificación las variables edad (años) y cargabilidad (%) de cada uno de los transformadores de distribución pertenecientes al alimentador Celi Román, tal como se muestra en la Figura 20.

Figura 20.

Esquema del sistema de inferencia para evaluar el índice de salud.



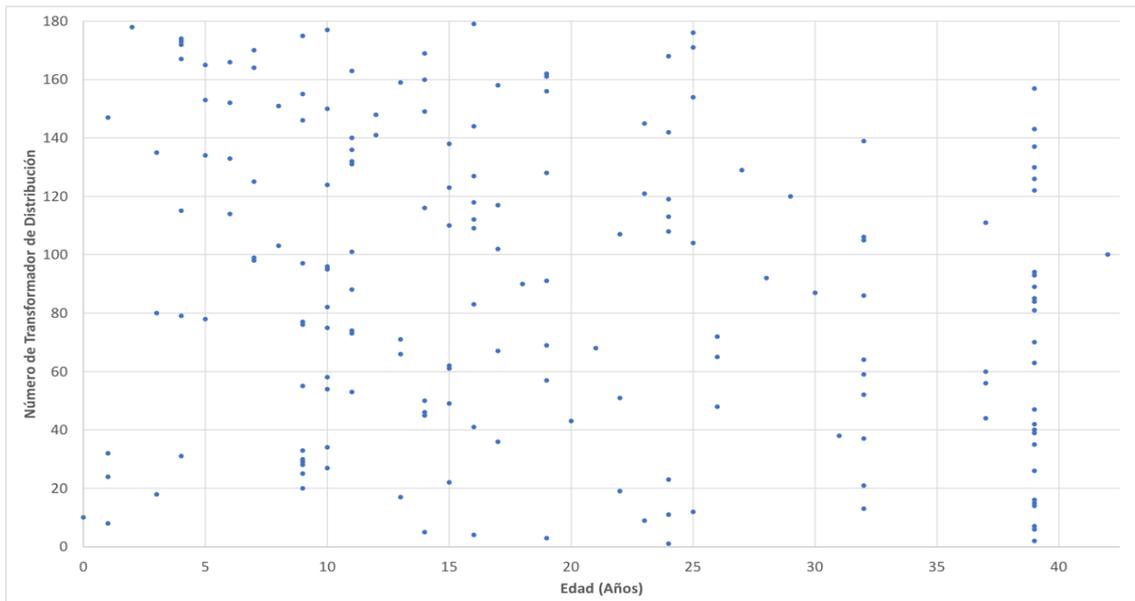
Fuente: Autor

6.2.1. Variable de entrada: Edad

De acuerdo a la base de datos obtenida, se realiza la representación gráfica de los valores disponibles para la variable edad y así obtener rangos de análisis adecuados. Tal como se muestra en la Figura 21.

Figura 21.

Gráfico de dispersión de los datos de la variable Edad.



Fuente: Autor

De acuerdo a los resultados de la pregunta 2 de la sección 6.1, variable edad es categorizada mediante cuatro funciones de membresía (rangos en años) como se muestra en la Tabla 1.

La cualificación de las variables lingüísticas de cada una de las funciones de membresía son propuestas por el autor, en base a criterio propio, así como a términos utilizados comúnmente, encontradas en la revisión del estado del arte.

Tabla 1.

Funciones de membresía de la variable edad (años)

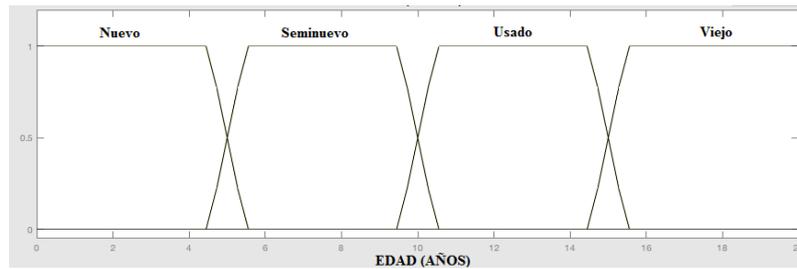
CUALIFICACIÓN	EDAD [AÑOS]
Nuevo	0 – 5
Seminuevo	5 – 10
Viejo	10 – 15
Muy viejo	> 15

Fuente: Autor

Las funciones de membresía de la variable de entrada edad se muestran gráficamente en la Figura 22.

Figura 22.

Funciones de Membresía de la variable de entrada Edad.



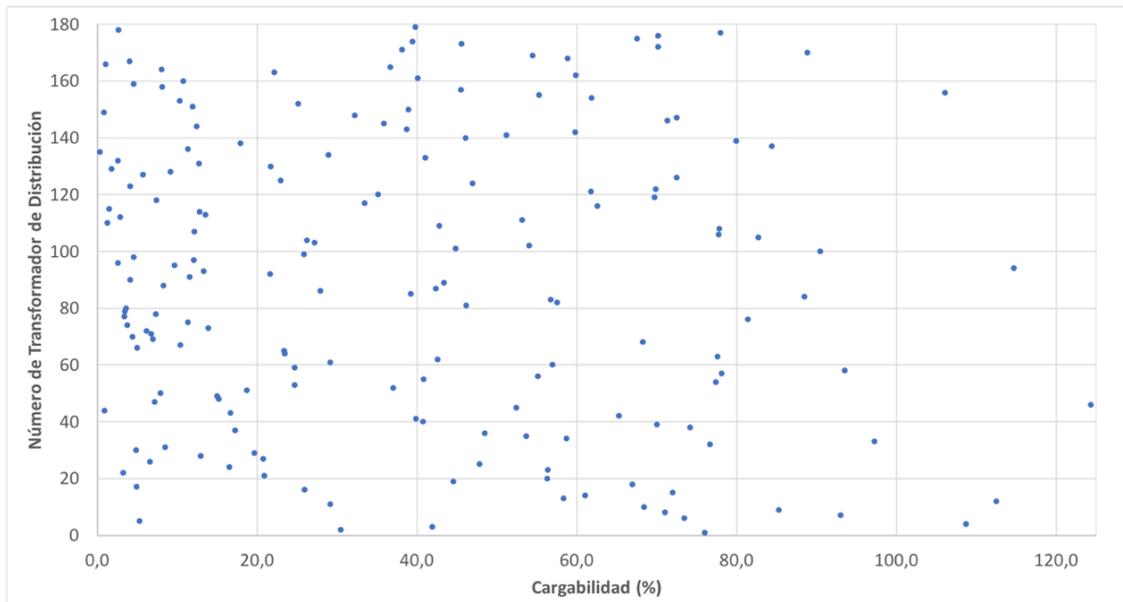
Fuente: Autor

6.2.2. Variable de entrada: Cargabilidad

Los datos de la variable cargabilidad se muestran en la Figura 23, y son categorizados en función del porcentaje de cargabilidad del transformador de distribución mediante cuatro funciones de membresía acorde a los resultados mostrados en la pregunta 3 de la sección 6.1 . Las cuatro funciones de membresía utilizadas se muestran en la Tabla 2.

Figura 23.

Gráfico de dispersión de los datos de la variable cargabilidad.



Fuente: Autor

Tabla 2.

Funciones de membresía de la variable cargabilidad (Porcentaje)

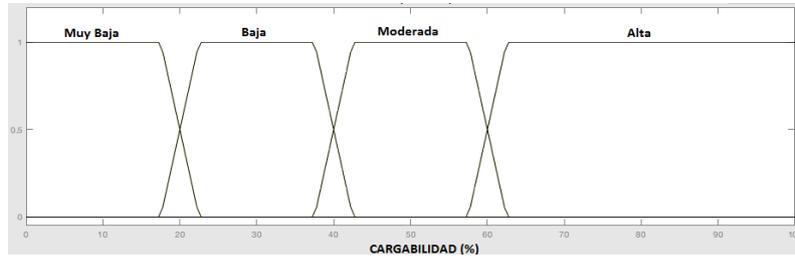
CUALIFICACIÓN	CARGABILIDAD [PORCENTAJE %]
Muy baja	0 – 20
Baja	20 - 40
Moderada	40 - 60
Alta	> 60

Fuente: Autor

Las funciones de membresía de la variable de entrada cargabilidad se muestran gráficamente en la Figura 24.

Figura 24.

Funciones de membresía de la variable de entrada cargabilidad.



Fuente: Autor

6.2.3. Variable de salida: Índice de salud

La variable índice de salud es categorizada mediante cuatro funciones de membresía simétricas, acorde al resultado obtenido en la pregunta 8 de la sección 6.1, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.

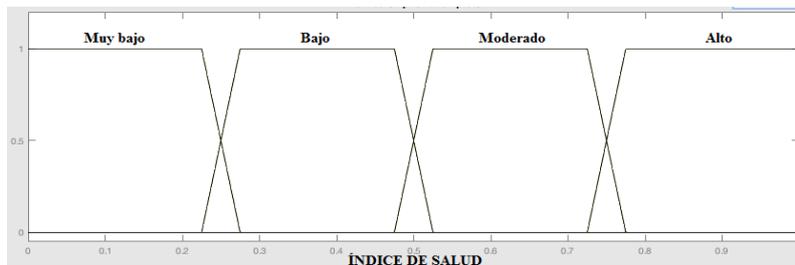
Funciones de membresía de la variable índice de salud

CUALIFICACIÓN	ÍNDICE DE SALUD [0~1]
Muy bajo	0 – 0,25
Bajo	0,25 – 0,5
Moderado	0,5 – 0,75
Alto	0,75 - 1

Las funciones de membresía de la variable índice de salud se muestran gráficamente en la Figura 25.

Figura 25.

Funciones de membresía de la variable de índice de salud.



Fuente: Autor

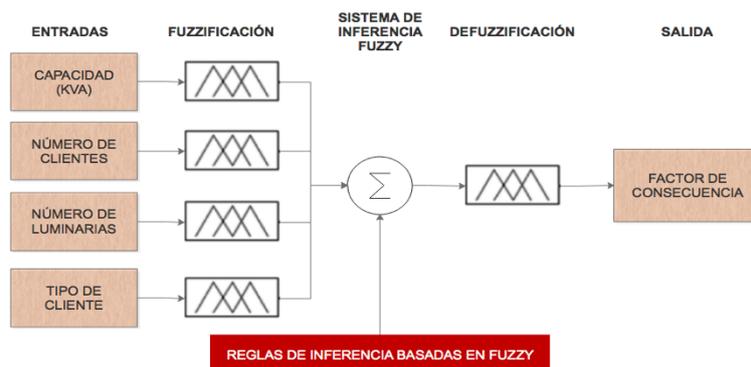
De acuerdo a la Figura 10, la variable índice de salud funciona como variable de salida para el primer sistema de inferencia difusa y, posteriormente, se convierte en una variable de entrada en el tercer sistema de inferencia difusa que permite la determinación del índice de riesgo del transformador de distribución.

6.3. Factor de consecuencia

Para el cálculo del factor de consecuencia se utiliza un proceso de fuzzificación con las variables capacidad (kilo volt ampere kVA), número de clientes, número de luminarias y tipo de cliente de cada uno de los transformadores de distribución pertenecientes al alimentador Celi Román, y posterior aplicación de reglas de inferencia difusa indicadas en el Anexo 3, tal como se muestra en la Figura 26. Cada una de las reglas difusas tiene un peso relativo que influye directamente en la salida esperada.

Figura 26.

Esquema del sistema de inferencia para evaluar el factor de consecuencia.



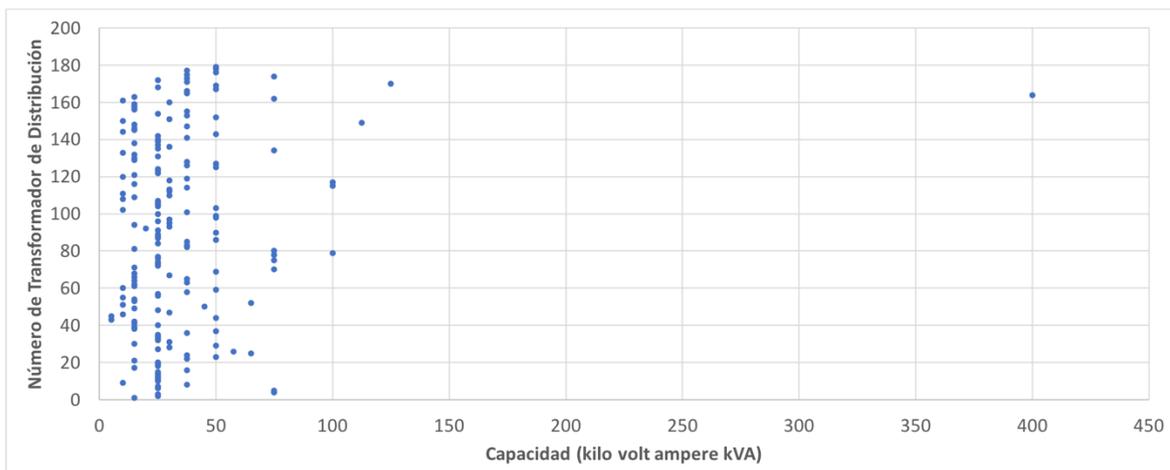
Fuente: Autor

6.3.1. Variable de entrada: Capacidad

La variable capacidad es categorizada en función de la capacidad en kilo volt ampere (kVA) del transformador de distribución, cuyos datos se muestran en la Figura 27. Los resultados de la pregunta 4 de la sección 6.1, definen las cuatro funciones de membresía como se muestra en la Tabla 4.

Figura 27.

Gráfico de dispersión de los datos de la variable capacidad



Fuente: Autor

Tabla 4.

Funciones de membresía de la variable capacidad (kilo volt ampere kVA)

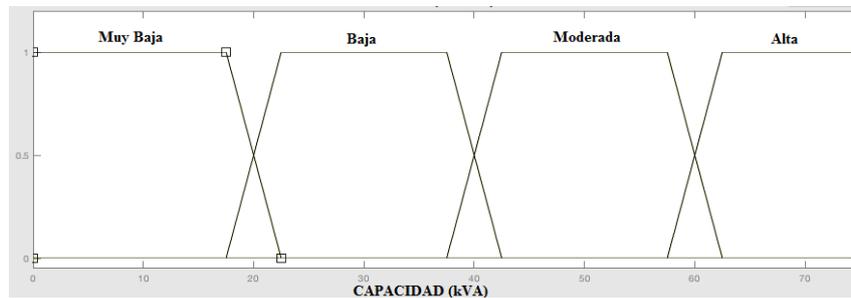
CUALIFICACIÓN	CAPACIDAD [KILO VOLT AMPERE (kVA)]
Muy baja	0 – 20
Baja	20 - 40
Moderada	40 - 60
Alta	> 60

Fuente: Autor

Las funciones de membresía de la variable de entrada capacidad se muestran gráficamente en la Figura 28.

Figura 28.

Funciones de membresía de la variable de entrada: capacidad (kilo volt ampere kVA).



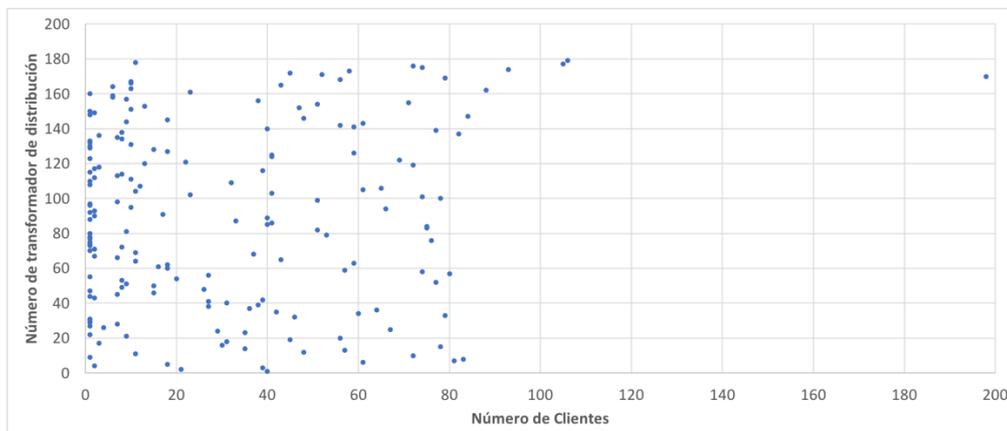
Fuente: Autor

6.3.2. Variable de entrada: Número de Clientes

En la Figura 29 se muestran el gráfico de dispersión de la base de datos referente a la variable número de clientes.

Figura 29.

Gráfico de dispersión de los datos de la variable número de clientes



Fuente: Autor

La variable número de clientes es categorizada mediante cuatro funciones de membresía de acuerdo a los resultados de la pregunta 5 de la sección 6.1, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5.

Funciones de membresía de la variable Número de clientes

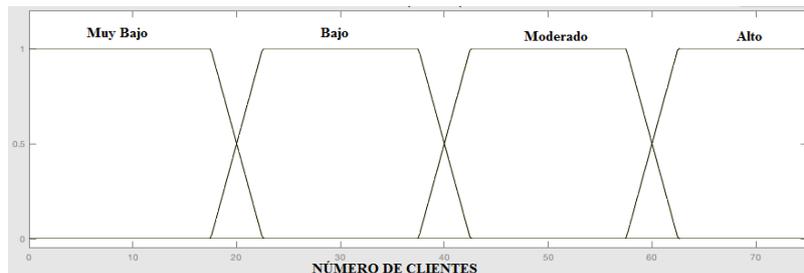
CUALIFICACIÓN	NÚMERO DE CLIENTES
Muy bajo	0 - 20
Bajo	20 - 40
Moderado	40 - 600
Alto	> 60

Fuente: Autor

Las funciones de membresía de la variable de entrada número de clientes se muestran gráficamente en la Figura 30.

Figura 30.

Funciones de membresía de la variable de entrada: Número de clientes.



Fuente: Autor

6.3.3. Variable de entrada: Tipo de cliente

Los usuarios son jerarquizados en su función de su importancia y/o priorización ante una posible desconexión por falla del transformador de distribución, con los resultados de la pregunta 7 de la sección 6.1, tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6.

Jerarquización de tipos de usuarios

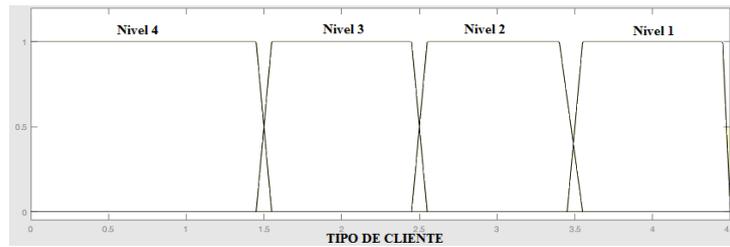
CUALIFICACIÓN	TIPO DE CLIENTE
Nivel 1	Sector Estratégico, Salud y Seguridad
Nivel 2	Entidades financieras
Nivel 3	Negocios Particulares
Nivel 4	Residenciales

Fuente: Autor

Las funciones de membresía de la variable de entrada tipo de clientes se muestran gráficamente en la Figura 31.

Figura 31.

Funciones de membresía de la variable de entrada: Tipo de Cliente

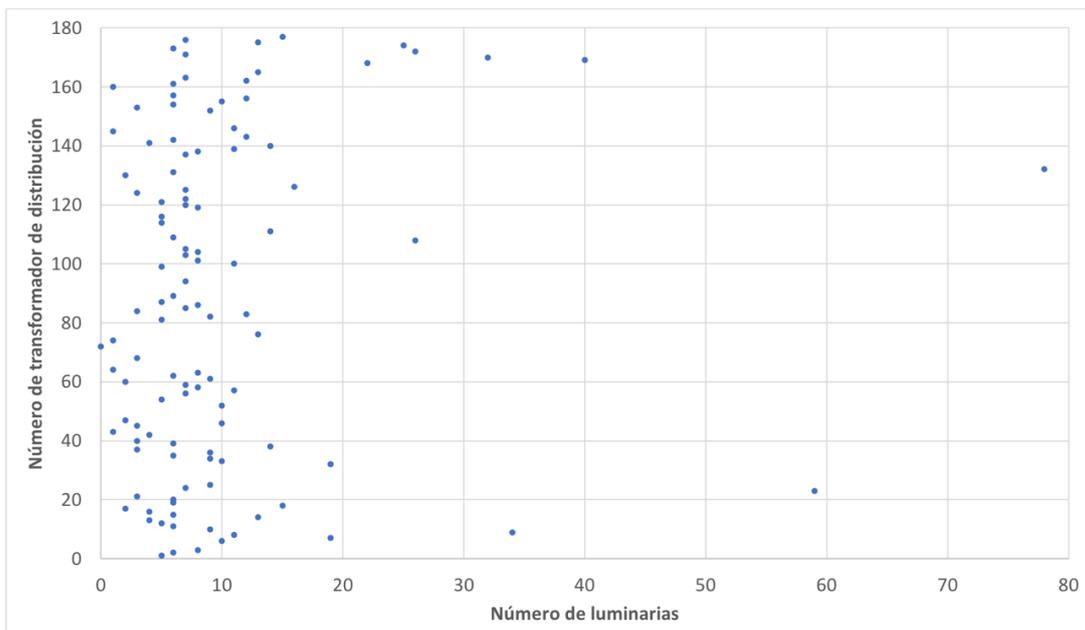


Fuente: Autor

6.3.4. Variable de entrada: Número de luminarias

En la Figura 32, se muestran el gráfico de dispersión de la base de datos referente a la variable número de luminarias.

Figura 32. Gráfico de dispersión de los datos de la variable número de luminarias



Fuente: Autor

La variable número de luminarias es categorizada mediante cuatro funciones de membresía, conforme los resultados de la pregunta 6 de la sección 6.1, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7.

Funciones de membresía de la variable Número de luminarias

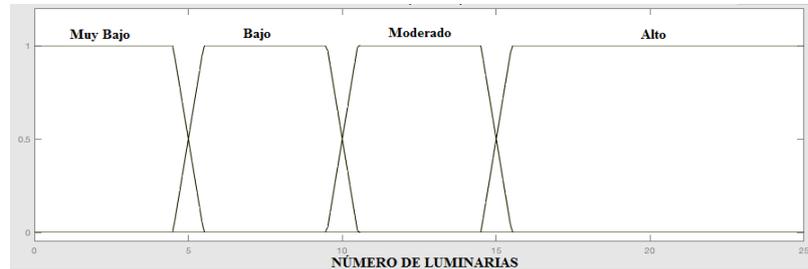
CUALIFICACIÓN	NÚMERO DE LUMINARIAS
Muy bajo	0 – 5
Bajo	5 - 10
Moderado	10 – 15
Alto	> 15

Fuente: Autor

Las funciones de membresía de la variable de entrada número de luminarias se muestran gráficamente en la Figura 33.

Figura 33.

Funciones de membresía de la variable de entrada: Número de luminarias.



Fuente: Autor

6.3.5. Factor de consecuencia

La variable factor de consecuencia es categorizada mediante cuatro funciones de membresía simétricas, acorde al resultado obtenido en la pregunta 8 de la sección 6.1, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8.

Funciones de membresía de la variable: Factor de Consecuencia

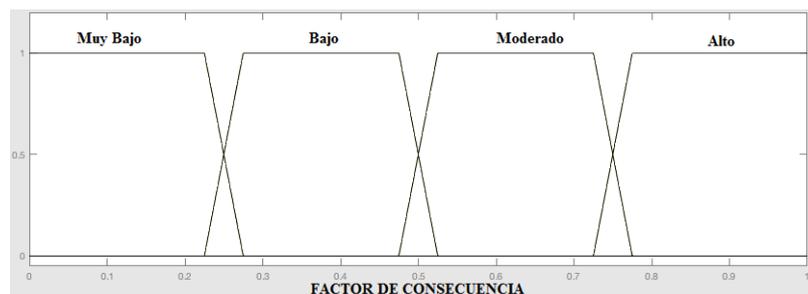
CUALIFICACIÓN	FACTOR DE CONSECUENCIA
Muy baja	0 – 0,25
Baja	0,25 – 0,5
Moderada	0,5 – 0,75
Alta	0,75 - 1

Fuente: Autor

Las funciones de membresía de la variable factor de consecuencia se muestran gráficamente en la Figura 34.

Figura 34.

Funciones de membresía de la variable: Factor de consecuencia.



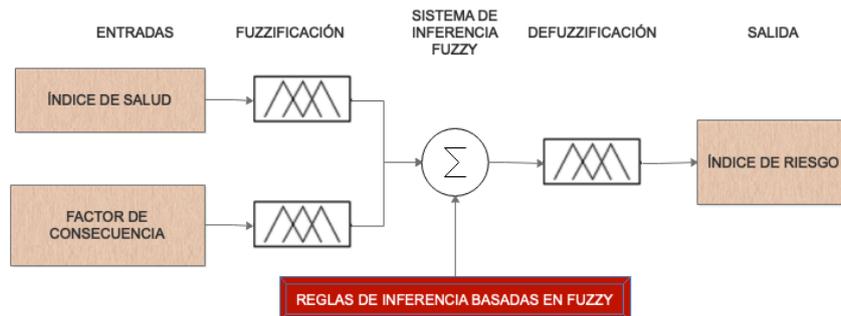
Fuente: Autor

6.4. Cálculo del índice de riesgo

Para el cálculo del índice de riesgo se utiliza un tercer proceso de fuzzificación con las variables índice de salud, calculada con el primer sistema de inferencia difusa y factor de consecuencia, calculado con el segundo sistema de inferencia difusa, de cada uno de los transformadores de distribución pertenecientes al alimentador Celi Román, tal como se muestra en la Figura 35.

Figura 35.

Esquema del sistema de inferencia para evaluar el índice de riesgo.



Fuente: Autor

La variable índice de riesgo es categorizada mediante cuatro funciones de membresía simétricas, acorde al resultado obtenido en la pregunta 8 de la sección 6.1, como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9.

Funciones de membresía de la variable: Índice de Riesgo

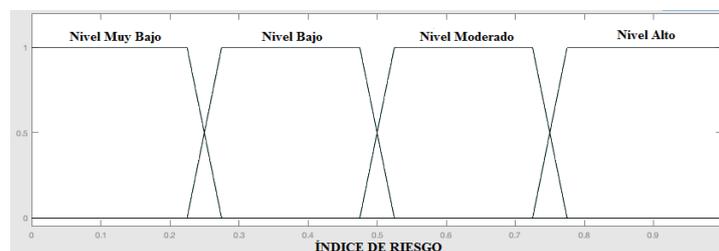
CUALIFICACIÓN	ÍNDICE DE RIESGO
Nivel muy bajo	0 – 0,25
Nivel Bajo	0,25 – 0,5
Nivel Moderado	0,5 – 0,75
Nivel Alto	0,75 - 1

Fuente: Autor

Las funciones de membresía de la variable de índice de riesgo se muestran gráficamente en la Figura 36.

Figura 36.

Funciones de membresía de la variable: Índice de riesgo

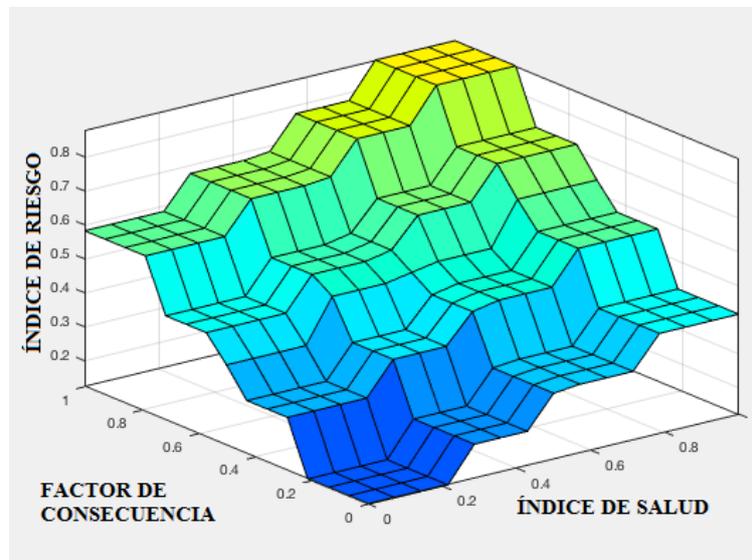


Fuente: Autor

Las reglas difusas definidas para el cálculo del índice de riesgo se muestran en el Anexo 4.

La Figura 37 muestra la superficie generada para determinar el índice de riesgo es función de las variables índice de salud y factor de consecuencia.

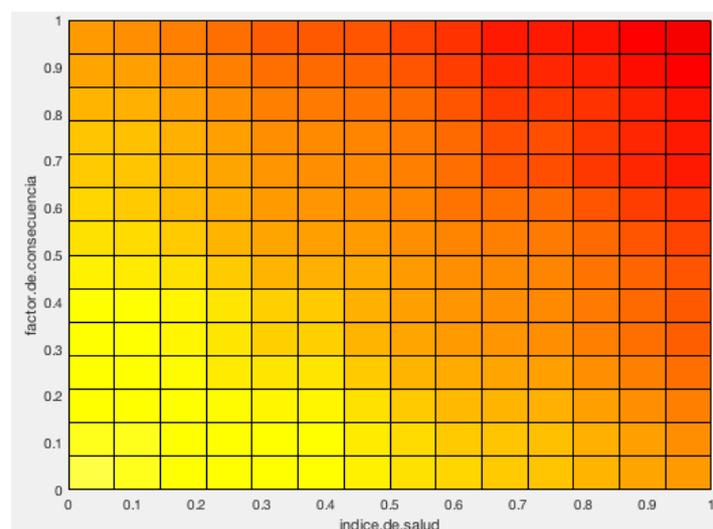
Figura 37.
Superficie del índice de riesgo



Fuente: Autor

La superficie 2D del índice de riesgo desarrollada en función de las variables índice de salud y factor de consecuencia se muestra en la Figura 38, en donde se puede evidenciar el mapa de color en función del aumento del índice de riesgo de los transformadores de distribución.

Figura 38.
Mapa de calor del índice de riesgo



Fuente: Autor

6.5. Categorización de resultados

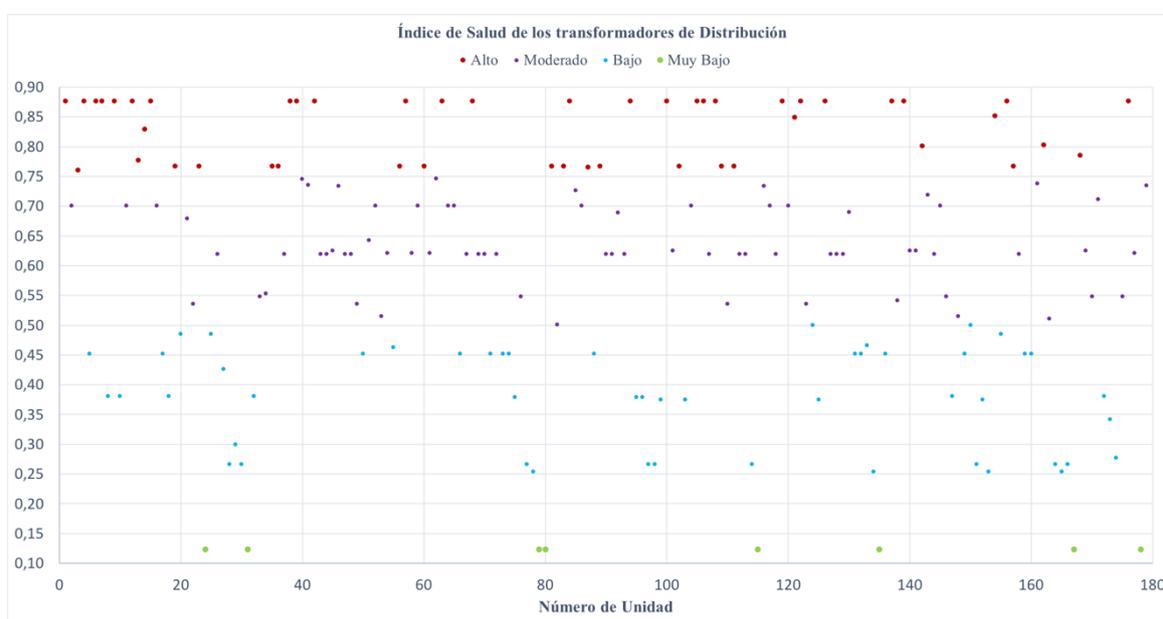
Tras definir las funciones de membresía y las reglas difusas respectivas, se procede a evaluar los tres sistemas de inferencia difusa a la vez en el software especializado con el código mostrado en el Anexo 6, permitiendo el cálculo del índice de riesgo, factor de consecuencia y el índice de riesgo de cada uno de los transformadores de distribución de la base de datos en estudio. Los resultados se presentan en la Tabla del Anexo 1.

6.5.1. Categorización del índice de salud

En la Figura 39 se muestran un gráfico de dispersión con los datos de índice de salud de los transformadores de distribución de la base de datos obtenidos de la aplicación del primer sistema de inferencia difusa.

Figura 39.

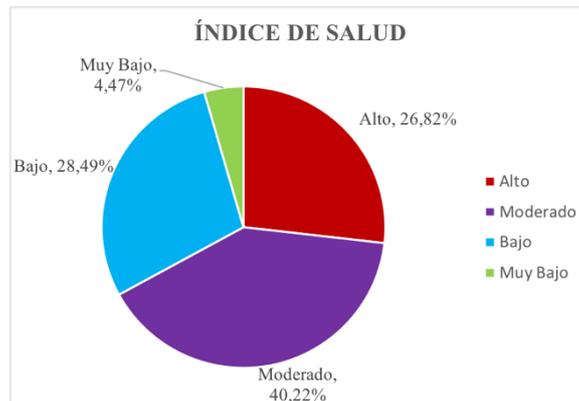
Gráfico de dispersión de los resultados del índice de salud.



Fuente: Autor

Luego de aplicar el primer sistema de inferencia, como se muestra en el Anexo 6, De los resultados se obtiene un total de 48 transformadores de distribución con un índice de salud alto (véase Tabla 6A), 72 transformadores de distribución con un índice de salud moderado (véase Tabla 6B), 51 transformadores de distribución con un índice de salud bajo (véase Tabla 6C) y 8 transformadores de distribución con un índice de salud muy bajo (véase Tabla 6D). Estos datos se expresan gráficamente en la Figura 40.

Figura 40.
Categorización del índice de salud

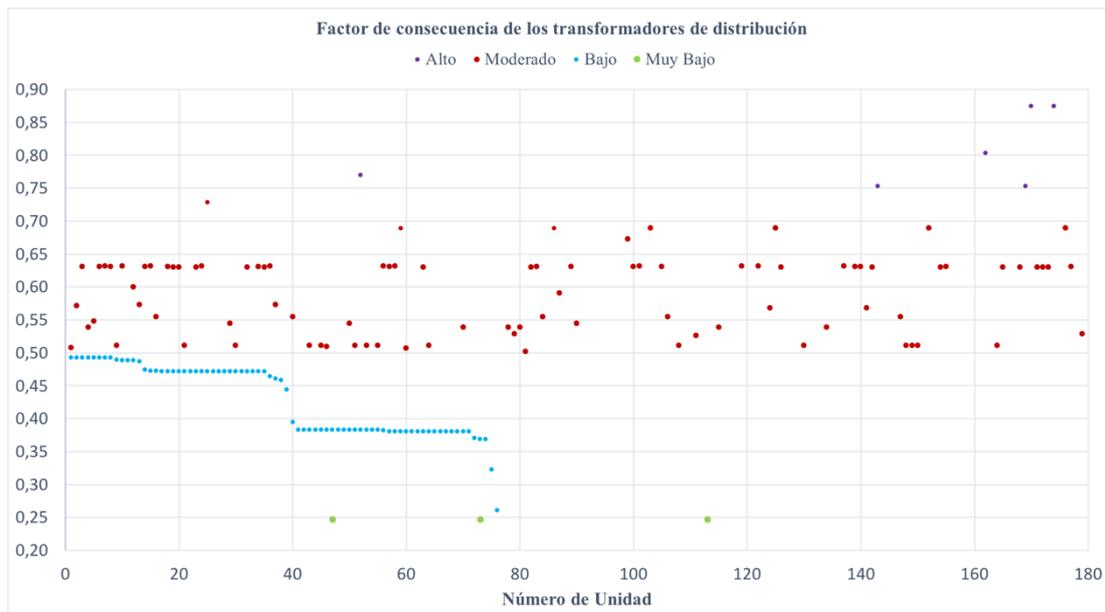


Fuente: Autor

6.5.2. Categorización del factor de consecuencia

En la Figura 41 se muestran un gráfico de dispersión con los datos del factor de consecuencia de los transformadores de distribución de la base de datos obtenidos de la aplicación del primer sistema de inferencia difusa.

Figura 41.
Gráfico de dispersión de los resultados del factor de consecuencia



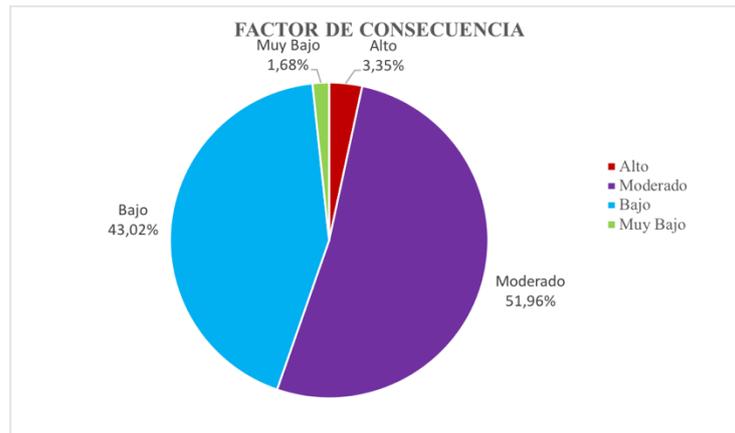
Fuente: Autor

Luego de aplicar el segundo sistema de inferencia, como se muestra en el anexo 7, se obtiene un total de 6 transformadores de distribución con un factor de consecuencia alto (véase Tabla 7A), 93 transformadores de distribución con un factor de consecuencia moderado (véase Tabla 7B), 77 transformadores de distribución con un factor de consecuencia bajo (véase Tabla 7C) y 3 transformadores de distribución con un factor de

consecuencia muy bajo (véase Tabla 7D. Estos datos se expresan gráficamente en la Figura 40.

Figura 42.

Categorización del factor de consecuencia



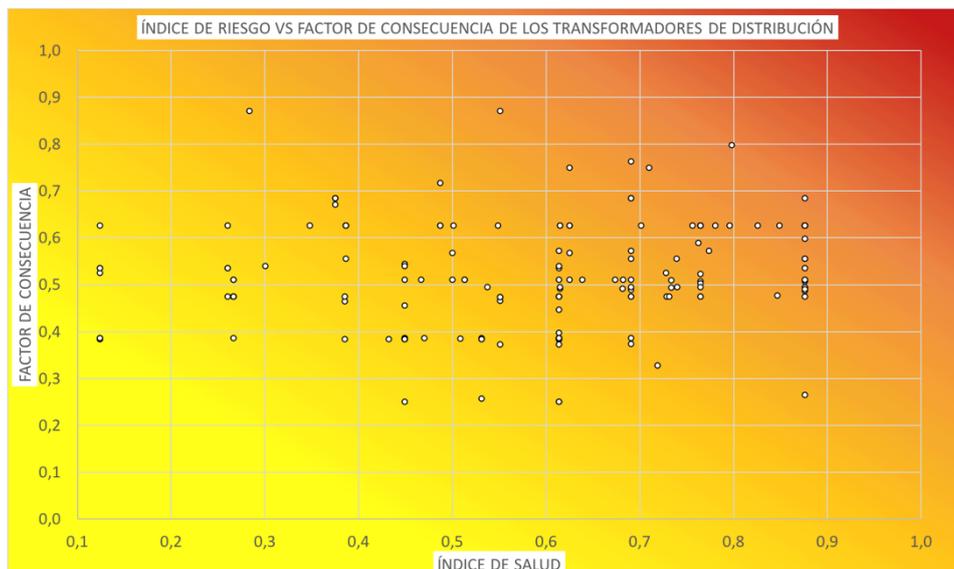
Fuente: Autor

6.5.3. Categorización del índice de riesgo

En la Figura 43 de mejor manera los resultados de índice de salud y factor de consecuencia obtenidos luego de la aplicación del primer y segundo sistema de inferencia difusa. Estos resultados se expresan sobre el mapa de calor mostrado en la Figura 38.

Figura 43.

Índice de riesgo vs factor de consecuencia



Fuente: Autor

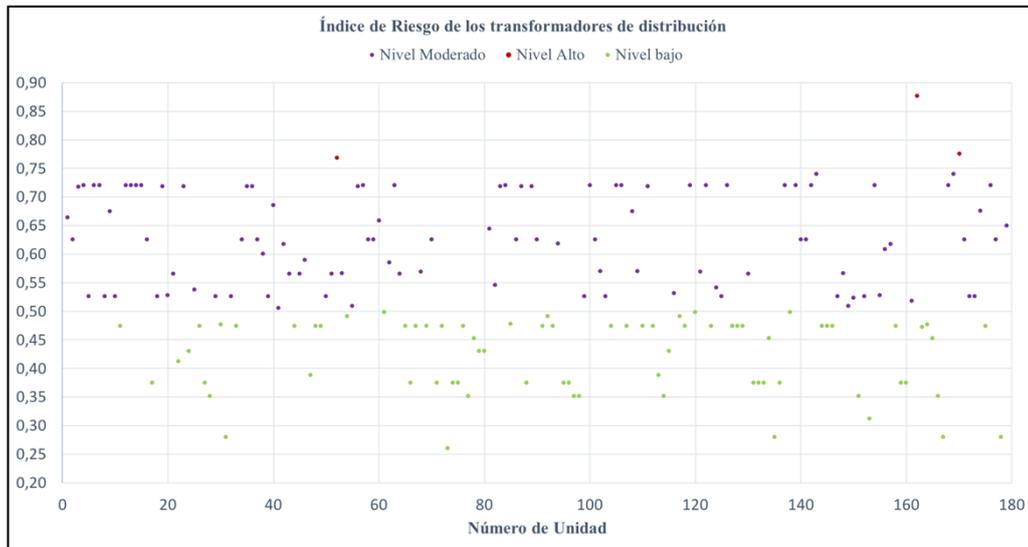
Esto permite tener una visión global del estado del índice de riesgo para cada uno de los transformadores de distribución de la base de datos.

El tercer sistema de inferencia difusa permite determinar el valor del índice de riesgo de las unidades en estudio y, con el cual, se puede definir el nivel de riesgo a través de las funciones de membresía previamente establecidas en la Tabla 9.

En la Figura 44 se muestra el gráfico de dispersión con los valores del índice de riesgo obtenidos luego de aplicar el tercer sistema de inferencia difusa.

Figura 44.

Gráfico de dispersión del índice de riesgo

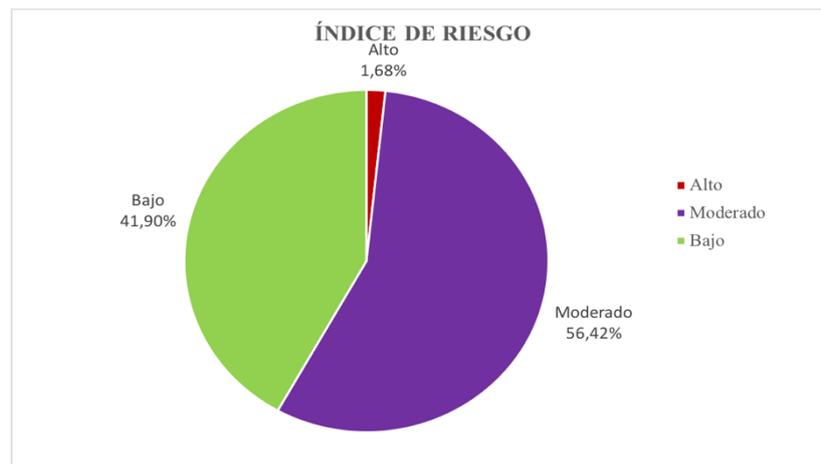


Fuente: Autor

En el Anexo 8 se muestran las tablas con los diferentes niveles de índice de riesgo obtenidos. Se obtiene 3 transformadores de distribución con un índice de riesgo alto (véase Tabla), 101 transformadores de distribución con un índice de riesgo moderado (véase Tabla 8B) y 75 transformadores de distribución con un nivel de riesgo bajo (véase Tabla 8C). Estos datos se expresan gráficamente en la Figura 40.

Figura 45.

Categorización del índice de riesgo

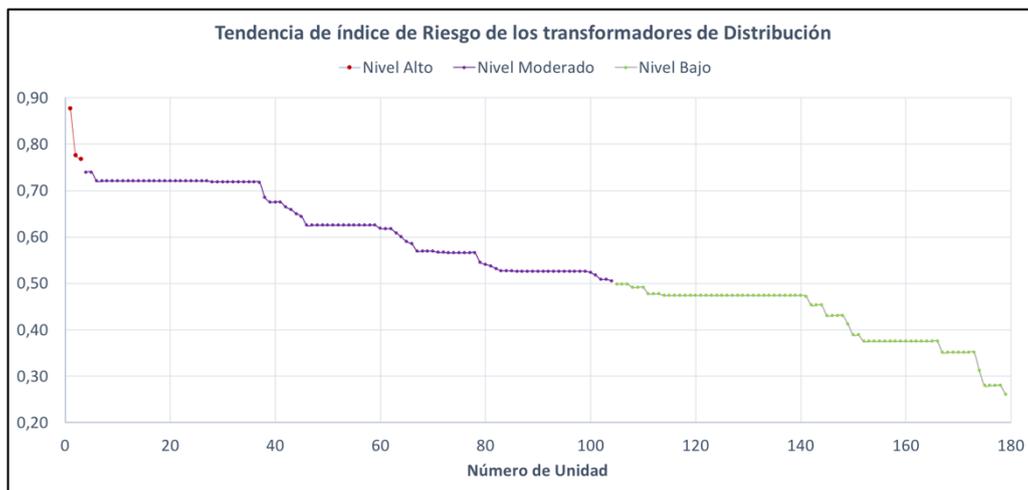


Fuente: Autor

En la Figura 46 se muestra una curva de tendencia del índice de riesgo más alto, hasta el índice de riesgo más bajo mostrando el estado del riesgo de cada una de los transformadores de distribución de la base de datos en estudio.

Figura 46.

Curva de tendencia del índice de riesgo. Valores de mayor a menor



Fuente: Autor

6.6. Análisis de los transformadores con el índice de riesgo alto

Los transformadores de distribución con un nivel alto de índice de riesgo alto son el 11233, 18645 y 3998; todos pertenecientes a la EERSSA.

En el caso del transformador de distribución 3998, se trata de una unidad modelo 1990, que explica una condición crítica y requiere un cambio en corto plazo.

El transformador de distribución 11233 tiene una cargabilidad del 59,90 %, 88 usuarios residenciales conectados, abastece a 12 luminarias y tiene una edad de 19 años. Condiciones que, de acuerdo a los rangos de las funciones de membresía utilizadas, conllevan a obtener un nivel alto de índice de riesgo con un valor de 0,8770.

En el caso del transformador de distribución 3998, se trata de una unidad modelo 1990, que explica una condición crítica de salud y requiere un cambio en corto plazo. Además, abastece una cantidad de 77 clientes residenciales y 10 luminarias. Se categoriza con un nivel alto de índice de riesgo con un valor de 0,7689.

La unidad de transformación 18645 tiene una capacidad de 124 kVA, una cargabilidad del 88,83 %, 198 clientes residenciales conectados y 32 luminarias conectadas, con lo que su factor de consecuencia es alto con un valor de 0,8747. Pese a ser una unidad de 7 años, y de acuerdo a los rangos de las funciones de membresía utilizadas, se obtiene un nivel alto de índice de riesgo con un valor de 0,77761.

Actualmente los cambios de unidades de transformación se realizan luego del fallo, sin mantenimientos adecuados durante la vida útil del mismo. Tras no contar con pruebas de rutina y sin mantenimientos, la incertidumbre del fallo crece. Con el cálculo del índice de riesgo a través de las variables disponibles de cada uno de los transformadores de distribución, se podrá determinar el plan de gestión de activos adecuado para garantizar la fiabilidad y disponibilidad del suministro eléctrico en todo momento al usuario final, reduciendo los costos por compra y sustituciones de último momento al anticipar las unidades que estarían próximas a fallar.

La gestión de activos depende exclusivamente de la empresa y sus políticas; la cual se reserva el derecho de gestionar los niveles de riesgo adecuados acorde a sus necesidades y facilidades.

7. Discusión

Se logró desarrollar un sistema de inferencia difusa que permite obtener el índice de riesgo de un transformador de distribución, en base a variables presentes en el SIG de la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. para el alimentador Celi Román. Esta base de datos fue procesada de manera que se obtenga todos los datos requeridos.

La metodología Delphi es aplicada para definir las funciones de membresía de cada una de las variables en estudio en base al criterio de expertos en la temática de redes de distribución.

El primer sistema de inferencia difusa relaciona las variables edad y cargabilidad del transformador de distribución y, mediante un método Mamdani aplicado en el software especializado a través de 24 reglas de inferencia difusa y una defuzzificación centroide, permite determinar el índice de salud de la unidad.

El segundo sistema de inferencia relaciona las variables que puedan determinar la posibilidad de falla-consecuencia del transformador de distribución, tales como: capacidad, número de clientes, número de luminarias y el tipo de luminarias. Nuevamente con ayuda del software especializado, se construye un método Mamdani con 272 reglas de inferencia difusa y una defuzzificación centroide para determinar el factor de consecuencia de la unidad.

El sistema de inferencia final, relaciona las variables: índice de salud y factor de consecuencia, obtenidos en los sistemas de inferencia previos, determinando la condición del transformador de distribución y a través de ellos, cuantificar el índice de riesgo de la unidad. Se utiliza el mismo método Mamdani, con 24 reglas difusas y una defuzzificación centroide.

8. Conclusiones

El indicador índice de salud de cada uno de los transformadores de distribución del alimentador Celi Román se determina a través de las variables edad y cargabilidad, las cuales permiten determinar el estado de envejecimiento de cada una de las unidades. El indicador factor de consecuencia se determina a partir de las variables capacidad, número de clientes, número de luminarias y tipo de cliente, las cuales determinan el nivel de afectación en caso de falla del transformador de distribución. El índice de riesgo se obtiene a partir de los resultados obtenidos de los indicadores previos. Las funciones de pertenencia de cada variable se definen a partir del criterio experto obtenido tras la aplicación de la encuesta propuesta en lo enmarcado dentro de la metodología Delphi propuesta.

Se modela tres sistemas de inferencia de lógica difusa (FIS) para analizar la base de datos procesada. El primer FIS permite determinar el índice de salud a través de las variables edad, cargabilidad y las 24 reglas difusas. El segundo sistema FIS permite determinar el factor de consecuencia del transformador en función de las variables capacidad, número de clientes, número de luminarias y tipo de cliente, así como 272 reglas difusas. El último sistema de inferencia de lógica difusa, evalúa los valores de índice de salud y factor de consecuencia obtenidos en los sistemas de inferencia previos y las 24 reglas difusas propuestas.

Al aplicar el sistema de inferencia difusa propuesto, se determina 3 transformadores de distribución con un índice de riesgo alto, 101 transformadores de distribución con un índice de riesgo moderado y 75 transformadores de distribución con un nivel de riesgo bajo. Considerando que a los transformadores de distribución no se le realizan pruebas de rutina, el modelo propuesto para determinar el índice de riesgo permite combinar las variables de entrada disponibles para obtener una jerarquización de las unidades. Con lo cual se puede gestionar acciones de adquisición y sustitución adecuadas reduciendo el riesgo de indisponibilidad de la unidad de transformación y por ende el abastecimiento a los usuarios finales.

9. Recomendaciones

Utilizar una mayor cantidad de variables puede ayudar a determinar de manera más precisa los factores índices de salud y factor de consecuencia del transformador de distribución y, a través de estos factores, determinar el índice de riesgo. Pero se debe tener cuidado en el momento de definir las reglas difusas ya que su cantidad crece exponencialmente en función del número de variables y se puede llegar a caer en ambigüedades.

Definir niveles de sistemas de inferencia entre más variables, pero agrupadas en subsistemas de inferencia, permitiría construir modelos más precisos reduciendo la cantidad de reglas de inferencia difusa requeridas.

Para determinar las consecuencias de una falla inesperada del transformador de distribución con nivel alto de riesgo, se debe realizar un estudio económico con las condiciones actuales de la unidad, cargas conectadas y el valor de la reposición de la unidad.

Esta metodología puede ser complementada en un futuro con los sistemas SCADA, permitiendo evaluar el estado de los transformadores de la red de distribución en tiempo real y, a su vez, reducir los costos por adquisición y mantenimiento con el incremento en la disponibilidad de la unidad instalada.

10. Bibliografía

- [1]. Bede, B. (2013). *Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic*.
- [2]. Borja Arbito, W. P. (2019). *METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL FACTOR DE CONSECUENCIA DE LA FALLA FINAL DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN* UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA]. Cuenca-Ecuador.
- [3]. Fullér, R. (2013). *Introduction to Neuro-Fuzzy Systems*. Physica-Verlag HD. <https://books.google.com.ec/books?id=7cQPBwAAQBAJ>
- [4]. Georgilakis, P. S. (2009). *Spotlight on Modern Transformer Design*. Springer London. <https://books.google.com.ec/books?id=8EwKkAEACAAJ>
- [5]. Germán, M. O., Molina, J. D., Romero, A. A., Gómez, H. D., & García, E. (2014, 10-13 Sept. 2014). Power asset management: Methods and experiences in Colombian power system. 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA),
- [6]. González Redondo, M. J. (2013). *La Lógica Fuzzy y su Aplicación en la Limitación de Recursos* Unievrnsidad Politécnica de Calencia].
- [7]. Hampel, R., Wagenknecht, M., & Chaker, N. (2013). *Fuzzy Control: Theory and Practice*. Physica-Verlag HD. <https://books.google.com.ec/books?id=HWhEAAAAQBAJ>
- [8]. Harlow, J. H. (2012). *Electric Power Transformer Engineering, Third Edition*. Taylor & Francis. <https://books.google.com.ec/books?id=h2Es9vpaKhQC>
- [9]. Klir, G. Y., Bo. (1995). *FUZZY SETS AND FUZZY LOGIC Theory and Applications*.
- [10]. Luangtriratana, S., & Rungseevijitprapa, W. (2021, 10-12 March 2021). A Development on Asset Management System for Distribution Power Transformers. 2021 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON),
- [11]. Medina, R. D., Zaldivar, D. A., Romero, A. A., Zuñiga, J., & Mombello, E. E. (2022). A fuzzy inference-based approach for estimating power transformers risk index. *Electric Power Systems Research*, 209, 108004. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108004>
- [12]. Parra, C., & Crespo, A. (2012). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos*. INGECON.
- [13]. Párraga 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* UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ]. Huancayo-Perú.
- [14]. Preciado Mite, G. J., & Rodas Herrera, J. A. (2015). *Diseño para la construcción de los transformadores de distribución monofásicos tipo tanque*
- [15]. Reguant-Álvarez, M. T.-F., M. (2016). El método Delphi. *REIRE, Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 9(1). <https://doi.org/10.1344/reire2016.9.1916>

11. Anexos

Anexo 1: Base de datos procesada del alimentador Celi Román

En la Tabla 1A se muestra la base de datos procesada de los transformadores de distribución conectados en el alimentador en estudio, con las variables que serán de utilizad en cada uno de los sistemas de inferencia.

Tabla 1A.

Base de datos procesada del alimentador Celi Román

Unidad	Capacidad [kilo volt ampere (kVA)]	No. Transformador	Cargabilidad (porcentaje %)	Luminarias	Clientes	Comentarios	Tipo de cliente	Modelo	Edad	IS	FC	IR
1	15	8223	76,00	5	40	EERSSA	4	1998	24	0,88	0,51	0,66
2	25	419	30,48	6	21	EERSSA	4	1983	39	0,70	0,57	0,63
3	25	11323	41,94	8	39	EERSSA	4	2003	19	0,76	0,63	0,72
4	75	12711	108,70	0	2	Jorge Ramírez	3	2006	16	0,88	0,54	0,72
5	75	14129	5,26	0	18	Edif. Vista Real	3	2008	14	0,45	0,55	0,53
6	25	373	73,47	10	61	EERSSA	4	1983	39	0,88	0,63	0,72
7	25	380	92,97	19	81	EERSSA	4	1983	39	0,88	0,63	0,72
8	37,5	23748	71,02	11	83	EERSSA	4	2021	1	0,38	0,63	0,53
9	10	8829	85,26	34	1	EERSSA	4	1999	23	0,88	0,51	0,68
10	25	24391	68,42	9	72	EERSSA	4	2022	0	0,38	0,63	0,53
11	25	8668	29,14	6	11	EERSSA	4	1998	24	0,70	0,47	0,47
12	25	7235	112,46	5	48	EERSSA	4	1997	25	0,88	0,60	0,72
13	25	3696	58,32	4	57	EERSSA	4	1990	32	0,78	0,57	0,72
14	25	430	61,07	13	35	EERSSA	4	1983	39	0,83	0,63	0,72
15	25	376	71,96	6	78	EERSSA	4	1983	39	0,88	0,63	0,72
16	37,5	435	25,96	4	30	EERSSA	4	1983	39	0,70	0,55	0,63

Unidad	Capacidad [kilo volt ampere (kVA)]	No. Transformador	Cargabilidad (porcentaje %)	Luminarias	Clientes	Comentarios	Tipo de cliente	Modelo	Edad	IS	FC	IR
17	15	14866	4,91	2	3	Sr. Luis Matute	3	2009	13	0,45	0,38	0,38
18	25	22212	66,95	15	31	EERSSA	4	2019	3	0,38	0,63	0,53
19	25	9240	44,55	6	45	EERSSA	4	2000	22	0,77	0,63	0,72
20	25	17379	56,29	6	56	EERSSA	4	2013	9	0,48	0,63	0,53
21	15	3422	20,91	3	9	EERSSA	4	1990	32	0,68	0,51	0,57
22	37,5	13618	3,23	0	1	Banco Pichincha	2	2007	15	0,54	0,25	0,41
23	50	7845	56,36	59	35	EERSSA	4	1998	24	0,77	0,63	0,72
24	37,5	23803	16,48	7	29	EERSSA	4	2021	1	0,12	0,63	0,43
25	65	16889	47,82	9	67	Bco. 3	4	2013	9	0,48	0,73	0,54
26	57,5	422	6,59	0	4	Clínica Santa María Abierta	1	1983	39	0,62	0,37	0,47
27	25	17074	20,76	0	1	Banco Rumiñahui	3	2012	10	0,43	0,38	0,38
28	30	17198	12,91	0	7	EERSSA	4	2013	9	0,27	0,47	0,35
29	50	17642	19,64	0	1	EERSSA	4	2013	9	0,30	0,54	0,53
30	15	17912	4,84	0	1	EERSSA	4	2013	9	0,27	0,51	0,48
31	30	22044	8,49	0	1	Hnos. Palacios Soto	3	2018	4	0,12	0,38	0,28
32	25	23735	76,67	19	46	EERSSA	4	2021	1	0,38	0,63	0,53
33	25	17370	97,26	10	79	EERSSA	1	2013	9	0,55	0,46	0,47
34	25	16899	58,69	9	60	EERSSA	4	2012	10	0,55	0,63	0,63
35	25	412	53,64	6	42	EERSSA	4	1983	39	0,77	0,63	0,72
36	37,5	12323	48,45	9	64	EERSSA	4	2005	17	0,77	0,63	0,72
37	50	3926	17,26	3	36	EERSSA	4	1990	32	0,62	0,57	0,63

Unidad	Capacidad [kilo volt ampere (kVA)]	No. Transformador	Cargabilidad (porcentaje %)	Luminarias	Clientes	Comentarios	Tipo de cliente	Modelo	Edad	IS	FC	IR
38	15	4387	74,18	14	27	EERSSA	4	1991	31	0,88	0,49	0,60
39	15	371	70,04	6	38	Municipio de Loja	1	1983	39	0,88	0,26	0,53
40	25	372	40,72	3	31	EERSSA	4	1983	39	0,75	0,55	0,69
41	15	12881	39,86	0	27	EERSSA	4	2006	16	0,74	0,47	0,51
42	15	379	65,26	4	39	EERSSA	4	1983	39	0,88	0,49	0,62
43	5	10775	16,63	1	2	EERSSA	4	2002	20	0,62	0,51	0,57
44	50	14738	0,88	0	1	Yanbal	3	1985	37	0,62	0,38	0,47
45	5	14093	52,42	3	7	EERSSA	4	2008	14	0,63	0,51	0,57
46	10	14434	124,32	10	15	EERSSA	4	2008	14	0,73	0,51	0,59
47	30	447	7,16	2	1	Brigada 7 Loja	1	1983	39	0,62	0,25	0,39
48	25	6935	15,20	0	26	Bahía Gran Colombia	3	1996	26	0,62	0,44	0,47
49	15	13743	14,95	0	8	Particular J.A.	3	2007	15	0,54	0,38	0,47
50	45	14167	7,91	0	15	EERSSA	4	2008	14	0,45	0,54	0,53
51	10	9550	18,74	0	9	EERSSA	4	2000	22	0,64	0,51	0,57
52	65	3998	37,05	10	77	EERSSA	4	1990	32	0,70	0,77	0,77
53	15	16244	24,70	0	8	EERSSA	4	2011	11	0,52	0,51	0,57
54	15	16833	77,40	5	20	EERSSA	4	2012	10	0,62	0,49	0,49
55	10	18107	40,84	0	1	EERSSA	4	2013	9	0,46	0,51	0,51
56	25	1885	55,12	7	27	EERSSA	4	1985	37	0,77	0,63	0,72
57	25	11366	78,11	11	80	EERSSA	4	2003	19	0,88	0,63	0,72
58	37,5	16950	93,53	8	74	EERSSA	4	2012	10	0,62	0,63	0,63
59	50	3927	24,67	7	57	EERSSA	4	1990	32	0,70	0,69	0,63
60	10	1443	56,95	2	18	EERSSA	4	1985	37	0,77	0,51	0,66

Unidad	Capacidad [kilo volt ampere (kVA)]	No. Transformador	Cargabilidad (porcentaje %)	Luminarias	Clientes	Comentarios	Tipo de cliente	Modelo	Edad	IS	FC	IR
61	15	13921	29,12	9	16	EERSSA	4	2007	15	0,62	0,49	0,50
62	15	13902	42,60	6	18	EERSSA	4	2007	15	0,75	0,49	0,58
63	37,5	403	77,59	8	59	EERSSA	4	1983	39	0,88	0,63	0,72
64	15	4195	23,44	1	11	EERSSA	4	1990	32	0,70	0,51	0,57
65	37,5	6938	23,41	0	43	Mercado Gran Colombia	1	1996	26	0,70	0,37	0,47
66	15	14787	4,98	0	7	Sr. Ángel Pizarro	3	2009	13	0,45	0,38	0,38
67	30	12459	10,42	0	2	Servicio de Torno Reina del Cisne	3	2005	17	0,62	0,38	0,47
68	15	9963	68,28	3	37	EERSSA	4	2001	21	0,88	0,47	0,57
69	50	12378	6,99	0	11	Edgar Garrido	3	2003	19	0,62	0,38	0,47
70	75	895	4,41	0	1	Colegio ITSDAB	3	1983	39	0,62	0,54	0,63
71	15	14925	6,74	0	2	Sr. José Romero	3	2009	13	0,45	0,38	0,38
72	25	6830	6,15	0	8	COMPROLACSA	3	1996	26	0,62	0,38	0,47
73	25	15956	13,89	0	1	Clínica Astudillo	1	2011	11	0,45	0,25	0,26
74	25	16342	3,71	1	1	HERED. LUIS DELGADO CASTIL	3	2011	11	0,45	0,38	0,38
75	75	16632	11,35	0	1	COOPMEGO	2	2012	10	0,38	0,46	0,38
76	25	17387	81,43	13	76	EERSSA	1	2013	9	0,55	0,47	0,47
77	25	17956	3,41	0	1	EERSSA	4	2013	9	0,27	0,47	0,35
78	75	21072	7,33	0	1	Mavesa Loja	3	2017	5	0,25	0,54	0,45
79	100	21860	3,45	0	53	Medilab	1	2018	4	0,12	0,53	0,43
80	75	22381	3,59	0	1	Dipac-Manta S.A.	3	2019	3	0,12	0,54	0,43
81	15	406	46,18	5	9	EERSSA	4	1983	39	0,77	0,50	0,64

Unidad	Capacidad [kilo volt ampere (kVA)]	No. Transformador	Cargabilidad (porcentaje %)	Luminarias	Clientes	Comentarios	Tipo de cliente	Modelo	Edad	IS	FC	IR
82	37,5	16942	57,52	9	51	EERSSA	4	2012	10	0,50	0,63	0,55
83	37,5	13411	56,70	12	75	EERSSA	4	2006	16	0,77	0,63	0,72
84	25	432	88,46	3	75	EERSSA	4	1983	39	0,88	0,55	0,72
85	37,5	443	39,21	7	40	Brigada de Infantería N° 7 Loja	1	1983	39	0,73	0,32	0,48
86	50	3925	27,92	8	41	EERSSA	4	1990	32	0,70	0,69	0,63
87	25	5598	42,36	5	33	EERSSA	4	1992	30	0,77	0,59	0,72
88	25	15770	8,25	0	1	Cuenca Chamba	3	2011	11	0,45	0,38	0,38
89	25	357	43,37	6	40	EERSSA	4	1983	39	0,77	0,63	0,72
90	50	12018	4,13	0	2	Pablo Villegas	4	2004	18	0,62	0,54	0,63
91	25	11212	11,54	0	17	Complejo El Alba	4	2003	19	0,62	0,47	0,47
92	20	6104	21,63	0	1	BCO. 2 6105	4	1994	28	0,69	0,49	0,49
93	30	427	13,33	0	2	BCO. 3 428, 429	4	1983	39	0,62	0,47	0,47
94	15	360	114,67	7	66	EERSSA	4	1983	39	0,88	0,49	0,62
95	30	16700	9,65	0	10	Sr. Quelvin González	3	2012	10	0,38	0,38	0,38
96	25	16627	2,57	0	1	EERSSA	4	2012	10	0,38	0,47	0,38
97	30	18070	12,04	0	1	EERSSA	4	2013	9	0,27	0,47	0,35
98	50	18858	4,51	0	7	Edificio Hannover	3	2015	7	0,27	0,38	0,35
99	50	19267	25,87	5	51	EERSSA	4	2015	7	0,38	0,67	0,53
100	25	128	90,44	11	78	EERSSA	4	1980	42	0,88	0,63	0,72
101	37,5	16215	44,80	8	74	EERSSA	4	2011	11	0,63	0,63	0,63

Unidad	Capacidad [kilo volt ampere (kVA)]	No. Transformador	Cargabilidad (porcentaje %)	Luminarias	Clientes	Comentarios	Tipo de cliente	Modelo	Edad	IS	FC	IR
102	10	12322	54,00	0	23	EERSSA	4	2005	17	0,77	0,47	0,57
103	50	18967	27,16	7	41	EERSSA	4	2014	8	0,38	0,69	0,53
104	25	7250	26,23	8	11	EERSSA	4	1997	25	0,70	0,47	0,47
105	25	3775	82,74	7	61	EERSSA	4	1990	32	0,88	0,63	0,72
106	25	3381	77,77	0	65	EERSSA	4	1990	32	0,88	0,55	0,72
107	25	9233	12,17	0	12	Direx Loja	3	2000	22	0,62	0,38	0,47
108	10	8914	77,79	26	1	EERSSA	4	1998	24	0,88	0,51	0,68
109	15	13148	42,81	6	32	EERSSA	4	2006	16	0,77	0,47	0,57
110	30	13874	1,26	0	1	Diésel Full Car	3	2007	15	0,54	0,38	0,47
111	10	1303	53,16	14	10	EERSSA	4	1985	37	0,77	0,53	0,72
112	30	13239	2,88	0	2	PARTICULAR	4	2006	16	0,62	0,47	0,47
113	30	8694	13,51	0	7	Municipio	1	1998	24	0,62	0,25	0,39
114	37,5	21515	12,80	5	8	EERSSA	4	2016	6	0,27	0,47	0,35
115	100	21493	1,49	0	1	Ing. Andrés Frändoli	3	2018	4	0,12	0,54	0,43
116	15	14075	62,60	5	39	Conjunto Residencial Alela	4	2008	14	0,73	0,49	0,53
117	100	12588	33,47	0	2	Área de salud N° 3	1	2005	17	0,70	0,49	0,49
118	30	12712	7,37	0	3	Jaime Jaramillo	3	2006	16	0,62	0,38	0,47
119	37,5	8692	69,75	8	72	EERSSA	4	1998	24	0,88	0,63	0,72
120	10	5959	35,16	7	13	EERSSA	4	1993	29	0,70	0,49	0,50
121	15	3028	61,75	5	22	EERSSA	4	1999	23	0,85	0,47	0,57
122	25	382	69,89	7	69	EERSSA	4	1983	39	0,88	0,63	0,72
123	25	13702	4,13	0	1	Luis Alberto León	3	2007	15	0,54	0,38	0,47

Unidad	Capacidad [kilo volt ampere (kVA)]	No. Transformador	Cargabilidad (porcentaje %)	Luminarias	Clientes	Comentarios	Tipo de cliente	Modelo	Edad	IS	FC	IR
124	25	16901	46,95	3	41	EERSSA	4	2012	10	0,50	0,57	0,54
125	50	19294	22,95	7	41	EERSSA	4	2015	7	0,38	0,69	0,53
126	37,5	236	72,48	16	59	EERSSA	4	1983	39	0,88	0,63	0,72
127	50	12855	5,75	0	18	Edificio Castillo Blanco	3	2006	16	0,62	0,39	0,47
128	37,5	11262	9,18	0	15	Urb. San Rafael	4	2003	19	0,62	0,47	0,47
129	15	6491	1,75	0	1	PARTICULAR	3	1995	27	0,62	0,38	0,47
130	15	366	21,68	2	1	Colegio Adolfo V.	4	1983	39	0,69	0,51	0,57
131	25	16343	12,72	6	10	Hered. Luis Castillo Delgado	3	2011	11	0,45	0,38	0,38
132	15	16296	2,60	78	1	EERSSA	3	2011	11	0,45	0,46	0,38
133	10	20139	41,05	0	1	Concecel	3	2016	6	0,47	0,38	0,38
134	75	20900	28,93	0	8	Ing. David Benítez	3	2017	5	0,25	0,54	0,45
135	25	22504	0,34	0	7	Condominio Bella Sofía	3	2019	3	0,12	0,38	0,28
136	30	24263	11,37	0	3	Sr. Mario Allano	3	2011	11	0,45	0,38	0,38
137	25	384	84,42	7	82	EERSSA	4	1983	39	0,88	0,63	0,72
138	15	13920	17,89	8	8	EERSSA	4	2007	15	0,54	0,49	0,50
139	25	4047	79,92	11	77	EERSSA	4	1990	32	0,88	0,63	0,72
140	25	16077	46,11	14	40	EERSSA	4	2011	11	0,63	0,63	0,63
141	37,5	15647	51,17	4	59	EERSSA	4	2010	12	0,63	0,57	0,63
142	25	8339	59,79	6	56	EERSSA	4	1998	24	0,80	0,63	0,72
143	50	414	38,69	12	61	EERSSA	4	1983	39	0,72	0,75	0,74
144	10	13124	12,42	0	9	Condominios	3	2006	16	0,62	0,38	0,47

Unidad	Capacidad [kilo volt ampere (kVA)]	No. Transformador	Cargabilidad (porcentaje %)	Luminarias	Clientes	Comentarios	Tipo de cliente	Modelo	Edad	IS	FC	IR
145	15	8799	35,86	1	18	Urb. San Rafael	3	1999	23	0,70	0,38	0,47
146	15	17396	71,30	11	48	EERSSA	1	2013	9	0,55	0,37	0,47
147	37,5	23802	72,48	0	84	EERSSA	4	2021	1	0,38	0,55	0,53
148	15	15112	32,21	0	1	-	4	2010	12	0,52	0,51	0,57
149	112,5	14472	0,83	0	2	BCO. 3 14473, 14474	4	2008	14	0,45	0,51	0,51
150	10	17090	38,95	0	1	EERSSA	4	2012	10	0,50	0,51	0,52
151	30	18281	11,93	0	10	EERSSA	4	2014	8	0,27	0,47	0,35
152	50	19817	25,14	9	47	EERSSA	4	2016	6	0,38	0,69	0,53
153	37,5	20833	10,30	3	13	EERSSA	4	2017	5	0,25	0,47	0,31
154	25	7228	61,81	6	51	EERSSA	4	1997	25	0,85	0,63	0,72
155	37,5	17363	55,24	10	71	EERSSA	4	2013	9	0,48	0,63	0,53
156	15	11322	106,04	12	38	EERSSA	4	2003	19	0,88	0,49	0,61
157	15	425	45,47	6	9	EERSSA	4	1983	39	0,77	0,49	0,62
158	15	12325	8,14	0	6	Hugo Castillo	3	2005	17	0,62	0,38	0,47
159	15	14901	4,56	0	6	Habitacional Sevilla	3	2009	13	0,45	0,38	0,38
160	30	14116	10,74	1	1	Z Car Rectificadora	3	2008	14	0,45	0,38	0,38
161	10	11581	40,11	6	23	EERSSA	4	2003	19	0,74	0,47	0,52
162	75	11233	59,90	12	88	EERSSA	4	2003	19	0,80	0,80	0,88
163	15	16341	22,11	7	10	HERED. LUIS DELGADO CASTIL	3	2011	11	0,51	0,38	0,47
164	400	19433	8,03	0	6	EERSSA	4	2015	7	0,27	0,51	0,48

Unidad	Capacidad [kilo volt ampere (kVA)]	No. Transformador	Cargabilidad (porcentaje %)	Luminarias	Clientes	Comentarios	Tipo de cliente	Modelo	Edad	IS	FC	IR
165	37,5	20832	36,69	13	43	EERSSA	4	2017	5	0,25	0,63	0,45
166	37,5	21286	1,01	0	10	Conjunto Habitacional Lomas del Pedestal	4	2016	6	0,27	0,47	0,35
167	50	21659	4,06	0	10	Sr. José Caraguay	3	2018	4	0,12	0,38	0,28
168	25	8599	58,86	22	56	EERSSA	4	1998	24	0,79	0,63	0,72
169	50	14521	54,48	40	79	EERSSA	4	2008	14	0,63	0,75	0,74
170	125	18645	88,83	32	198	EERSSA	4	2015	7	0,55	0,87	0,78
171	37,5	7699	38,15	7	52	EERSSA	4	1997	25	0,71	0,63	0,63
172	25	21568	70,15	26	45	EERSSA	4	2018	4	0,38	0,63	0,53
173	37,5	21542	45,59	6	58	EERSSA	4	2018	4	0,34	0,63	0,53
174	75	21544	39,41	25	93	EERSSA	4	2018	4	0,28	0,87	0,68
175	37,5	17361	67,51	13	74	EERSSA	1	2013	9	0,55	0,47	0,47
176	50	7562	70,17	7	72	EERSSA	4	1997	25	0,88	0,69	0,72
177	37,5	16957	77,95	15	105	EERSSA	4	2012	10	0,62	0,63	0,63
178	50	23471	2,67	0	11	Victor Hugo Betancourt	3	2020	2	0,12	0,38	0,28
179	50	13277	39,81	0	106	Mercado Reina del Cisne	1	2006	16	0,73	0,53	0,65

Fuente: Autor

Anexo 2: Reglas difusas para el cálculo del índice de salud

En la Tabla 2A. se muestra las reglas difusas utilizadas para el primer sistema de inferencia que permite el cálculo del índice de salud.

Tabla 2A.

Reglas difusas para el cálculo del índice de salud

NÚMERO DE REGLA	SI		ENTONCES	Peso
	Edad (años)	Cargabilidad (porcentaje %)	Índice de salud	
1	Nuevo	-	Muy Bajo	1
2	Seminuevo	-	Bajo	1
3	Viejo	-	Moderado	1
4	Muy Viejo	-	Alto	1
5	Nuevo	Muy Baja	Muy Bajo	1
6	Seminuevo	Baja	Bajo	1
7	Viejo	Moderada	Moderado	1
8	Muy Viejo	Alta	Alto	1
9	Nuevo	Baja	Bajo	0,75
10	Nuevo	Moderada	Moderado	0,75
11	Nuevo	Alta	Alto	0,5
12	Seminuevo	Muy Baja	Muy Bajo	0,75
13	Seminuevo	Moderada	Moderado	0,75
14	Seminuevo	Alta	Alto	0,5
15	Viejo	Muy Baja	Muy Bajo	0,5
16	Viejo	Baja	Bajo	0,75
17	Viejo	Alta	Alto	0,75
18	Muy Viejo	Muy Baja	Muy Bajo	0,5
19	Muy Viejo	Baja	Bajo	0,5
20	Muy Viejo	Moderada	Moderado	0,75
21	-	Muy Baja	Muy Bajo	0,5
22	-	Baja	Bajo	0,5
23	-	Moderada	Moderado	0,5
24	-	Alta	Alto	0,5

Fuente: Autor

Anexo 3: Reglas difusas para el cálculo del factor de consecuencia

En la Tabla 3A. se muestran las reglas difusas utilizadas en el segundo sistema de inferencia difusa para el cálculo del actor de consecuencia.

Tabla 3A.

Reglas difusas para determinar el factor de consecuencia

NÚMERO DE REGLA	SI				ENTONCES	Peso
	Capacidad	Número de clientes	Número de luminarias	Tipo de cliente	Factor de consecuencia	
1	Muy baja	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	1
2	Muy baja	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
3	Muy baja	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
4	Muy baja	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
5	Muy baja	Muy bajo	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
6	Muy baja	Muy bajo	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
7	Muy baja	Muy bajo	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
8	Muy baja	Muy bajo	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
9	Muy baja	Muy bajo	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
10	Muy baja	Muy bajo	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
11	Muy baja	Muy bajo	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
12	Muy baja	Muy bajo	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
13	Muy baja	Muy bajo	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
14	Muy baja	Muy bajo	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
15	Muy baja	Muy bajo	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
16	Muy baja	Muy bajo	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
17	Muy baja	Bajo	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
18	Muy baja	Bajo	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
19	Muy baja	Bajo	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
20	Muy baja	Bajo	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
21	Muy baja	Bajo	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
22	Muy baja	Bajo	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
23	Muy baja	Bajo	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
24	Muy baja	Bajo	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
25	Muy baja	Bajo	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
26	Muy baja	Bajo	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
27	Muy baja	Bajo	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
28	Muy baja	Bajo	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
29	Muy baja	Bajo	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
30	Muy baja	Bajo	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
31	Muy baja	Bajo	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
32	Muy baja	Bajo	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
33	Muy baja	Moderado	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7

NÚMERO DE REGLA	SI				ENTONCES	Peso
	Capacidad	Número de clientes	Número de luminarias	Tipo de cliente	Factor de consecuencia	
34	Muy baja	Moderado	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
35	Muy baja	Moderado	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
36	Muy baja	Moderado	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
37	Muy baja	Moderado	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
38	Muy baja	Moderado	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
39	Muy baja	Moderado	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
40	Muy baja	Moderado	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
41	Muy baja	Moderado	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
42	Muy baja	Moderado	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
43	Muy baja	Moderado	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
44	Muy baja	Moderado	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
45	Muy baja	Moderado	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
46	Muy baja	Moderado	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
47	Muy baja	Moderado	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
48	Muy baja	Moderado	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
49	Muy baja	Alto	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
50	Muy baja	Alto	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
51	Muy baja	Alto	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
52	Muy baja	Alto	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
53	Muy baja	Alto	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
54	Muy baja	Alto	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
55	Muy baja	Alto	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
56	Muy baja	Alto	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
57	Muy baja	Alto	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
58	Muy baja	Alto	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
59	Muy baja	Alto	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
60	Muy baja	Alto	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
61	Muy baja	Alto	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
62	Muy baja	Alto	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
63	Muy baja	Alto	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
64	Muy baja	Alto	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
65	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
66	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
67	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
68	Baja	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
69	Baja	Muy bajo	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
70	Baja	Muy bajo	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
71	Baja	Muy bajo	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
72	Baja	Muy bajo	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
73	Baja	Muy bajo	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7

NÚMERO DE REGLA	SI				ENTONCES	
	Capacidad	Número de clientes	Número de luminarias	Tipo de cliente	Factor de consecuencia	Peso
74	Baja	Muy bajo	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
75	Baja	Muy bajo	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
76	Baja	Muy bajo	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
77	Baja	Muy bajo	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
78	Baja	Muy bajo	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
79	Baja	Muy bajo	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
80	Baja	Muy bajo	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
81	Baja	Bajo	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
82	Baja	Bajo	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
83	Baja	Bajo	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
84	Baja	Bajo	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
85	Baja	Bajo	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
86	Baja	Bajo	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
87	Baja	Bajo	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
88	Baja	Bajo	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
89	Baja	Bajo	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
90	Baja	Bajo	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
91	Baja	Bajo	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
92	Baja	Bajo	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
93	Baja	Bajo	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
94	Baja	Bajo	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
95	Baja	Bajo	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
96	Baja	Bajo	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
97	Baja	Moderado	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
98	Baja	Moderado	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
99	Baja	Moderado	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
100	Baja	Moderado	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
101	Baja	Moderado	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
102	Baja	Moderado	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
103	Baja	Moderado	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
104	Baja	Moderado	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
105	Baja	Moderado	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
106	Baja	Moderado	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
107	Baja	Moderado	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
108	Baja	Moderado	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
109	Baja	Moderado	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
110	Baja	Moderado	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
111	Baja	Moderado	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
112	Baja	Moderado	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
113	Baja	Alto	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7

NÚMERO DE REGLA	SI				ENTONCES	Peso
	Capacidad	Número de clientes	Número de luminarias	Tipo de cliente	Factor de consecuencia	
114	Baja	Alto	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
115	Baja	Alto	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
116	Baja	Alto	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
117	Baja	Alto	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
118	Baja	Alto	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
119	Baja	Alto	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
120	Baja	Alto	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
121	Baja	Alto	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
122	Baja	Alto	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
123	Baja	Alto	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
124	Baja	Alto	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
125	Baja	Alto	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
126	Baja	Alto	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
127	Baja	Alto	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
128	Baja	Alto	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
129	Moderada	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
130	Moderada	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
131	Moderada	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
132	Moderada	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
133	Moderada	Muy bajo	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
134	Moderada	Muy bajo	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
135	Moderada	Muy bajo	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
136	Moderada	Muy bajo	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
137	Moderada	Muy bajo	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
138	Moderada	Muy bajo	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
139	Moderada	Muy bajo	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
140	Moderada	Muy bajo	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
141	Moderada	Muy bajo	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
142	Moderada	Muy bajo	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
143	Moderada	Muy bajo	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
144	Moderada	Muy bajo	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
145	Moderada	Bajo	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
146	Moderada	Bajo	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
147	Moderada	Bajo	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
148	Moderada	Bajo	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
149	Moderada	Bajo	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
150	Moderada	Bajo	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
151	Moderada	Bajo	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
152	Moderada	Bajo	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
153	Moderada	Bajo	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7

NÚMERO DE REGLA	SI				ENTONCES	Peso
	Capacidad	Número de clientes	Número de luminarias	Tipo de cliente	Factor de consecuencia	
154	Moderada	Bajo	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
155	Moderada	Bajo	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
156	Moderada	Bajo	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
157	Moderada	Bajo	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
158	Moderada	Bajo	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
159	Moderada	Bajo	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
160	Moderada	Bajo	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
161	Moderada	Moderado	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
162	Moderada	Moderado	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
163	Moderada	Moderado	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
164	Moderada	Moderado	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
165	Moderada	Moderado	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
166	Moderada	Moderado	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
167	Moderada	Moderado	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
168	Moderada	Moderado	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
169	Moderada	Moderado	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
170	Moderada	Moderado	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
171	Moderada	Moderado	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
172	Moderada	Moderado	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
173	Moderada	Moderado	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
174	Moderada	Moderado	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
175	Moderada	Moderado	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
176	Moderada	Moderado	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
177	Moderada	Alto	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
178	Moderada	Alto	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
179	Moderada	Alto	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
180	Moderada	Alto	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
181	Moderada	Alto	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
182	Moderada	Alto	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
183	Moderada	Alto	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
184	Moderada	Alto	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
185	Moderada	Alto	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
186	Moderada	Alto	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
187	Moderada	Alto	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
188	Moderada	Alto	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
189	Moderada	Alto	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
190	Moderada	Alto	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
191	Moderada	Alto	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
192	Moderada	Alto	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
193	Alta	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7

NÚMERO DE REGLA	SI				ENTONCES	
	Capacidad	Número de clientes	Número de luminarias	Tipo de cliente	Factor de consecuencia	Peso
194	Alta	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
195	Alta	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
196	Alta	Muy bajo	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
197	Alta	Muy bajo	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
198	Alta	Muy bajo	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
199	Alta	Muy bajo	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
200	Alta	Muy bajo	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
201	Alta	Muy bajo	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
202	Alta	Muy bajo	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
203	Alta	Muy bajo	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
204	Alta	Muy bajo	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
205	Alta	Muy bajo	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
206	Alta	Muy bajo	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
207	Alta	Muy bajo	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
208	Alta	Muy bajo	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
209	Alta	Bajo	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
210	Alta	Bajo	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
211	Alta	Bajo	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
212	Alta	Bajo	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
213	Alta	Bajo	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
214	Alta	Bajo	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
215	Alta	Bajo	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
216	Alta	Bajo	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
217	Alta	Bajo	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
218	Alta	Bajo	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
219	Alta	Bajo	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
220	Alta	Bajo	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
221	Alta	Bajo	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
222	Alta	Bajo	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
223	Alta	Bajo	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
224	Alta	Bajo	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
225	Alta	Moderado	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
226	Alta	Moderado	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
227	Alta	Moderado	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
228	Alta	Moderado	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
229	Alta	Moderado	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
230	Alta	Moderado	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
231	Alta	Moderado	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
232	Alta	Moderado	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
233	Alta	Moderado	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7

NÚMERO DE REGLA	SI				ENTONCES	Peso
	Capacidad	Número de clientes	Número de luminarias	Tipo de cliente	Factor de consecuencia	
234	Alta	Moderado	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
235	Alta	Moderado	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
236	Alta	Moderado	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
237	Alta	Moderado	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
238	Alta	Moderado	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
239	Alta	Moderado	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
240	Alta	Moderado	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
241	Alta	Alto	Muy bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
242	Alta	Alto	Muy bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
243	Alta	Alto	Muy bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
244	Alta	Alto	Muy bajo	Nivel 4	Alto	0,7
245	Alta	Alto	Bajo	Nivel 1	Muy bajo	0,7
246	Alta	Alto	Bajo	Nivel 2	Bajo	0,7
247	Alta	Alto	Bajo	Nivel 3	Moderado	0,7
248	Alta	Alto	Bajo	Nivel 4	Alto	0,7
249	Alta	Alto	Moderado	Nivel 1	Muy bajo	0,7
250	Alta	Alto	Moderado	Nivel 2	Bajo	0,7
251	Alta	Alto	Moderado	Nivel 3	Moderado	0,7
252	Alta	Alto	Moderado	Nivel 4	Alto	0,7
253	Alta	Alto	Alto	Nivel 1	Muy bajo	0,7
254	Alta	Alto	Alto	Nivel 2	Bajo	0,7
255	Alta	Alto	Alto	Nivel 3	Moderado	0,7
256	Alta	Alto	Alto	Nivel 4	Alto	0,7
257	Muy Baja	-	-	-	Muy bajo	0,75
258	Baja	-	-	-	Bajo	0,75
259	Moderada	-	-	-	Moderado	0,75
260	Alta	-	-	-	Alto	0,75
261	-	Muy bajo	-	-	Muy bajo	0,75
262	-	Bajo	-	-	Bajo	0,75
263	-	Moderado	-	-	Moderado	0,75
264	-	Alto	-	-	Alto	0,75
265	-	-	Muy bajo	-	Muy bajo	0,3
266	-	-	Bajo	-	Bajo	0,3
267	-	-	Moderado	-	Moderado	0,3
268	-	-	Alto	-	Alto	0,3
269	-	-	-	Nivel 1	Muy bajo	0,8
270	-	-	-	Nivel 2	Bajo	0,8
271	-	-	-	Nivel 3	Moderado	0,8
272	-	-	-	Nivel 4	Alto	0,8

Fuente: Autor

Anexo 4: Reglas difusas para el cálculo del índice de riesgo

En la Tabla 4A. se muestran las reglas difusas utilizadas en el último sistema de inferencia difusa para el cálculo del índice de riesgo.

Tabla 4A.

Reglas difusas para el cálculo del índice de riesgo

NÚMERO DE REGLA	SI		ENTONCES	
	Índice de salud	Factor de consecuencia	Índice de riesgo	Peso
1	Muy Bajo	Muy Bajo	Nivel Muy Bajo	1
2	Bajo	Bajo	Nivel Bajo	1
3	Moderado	Moderado	Nivel Moderado	1
4	Alto	Alto	Nivel Alto	1
5	Muy Bajo	Bajo	Nivel Bajo	0,8
6	Muy Bajo	Moderado	Nivel Moderado	0,8
7	Muy Bajo	Alto	Nivel Alto	0,8
8	Bajo	Muy Bajo	Nivel Muy Bajo	0,8
9	Bajo	Moderado	Nivel Moderado	0,8
10	Bajo	Alto	Nivel Alto	0,8
11	Moderado	Muy Bajo	Nivel Muy Bajo	0,8
12	Moderado	Bajo	Nivel Bajo	0,8
13	Moderado	Alto	Nivel Alto	0,8
14	Alto	Muy Bajo	Nivel Muy Bajo	0,8
15	Alto	Bajo	Nivel Bajo	0,8
16	Alto	Moderado	Nivel Moderado	0,8
17	Muy Bajo	-	Nivel Muy Bajo	0,5
18	Bajo	-	Nivel Bajo	0,5
19	Moderado	-	Nivel Moderado	0,5
20	Alto	-	Nivel Alto	0,5
21	-	Muy Bajo	Nivel Muy Bajo	0,5
22	-	Bajo	Nivel Bajo	0,5
23	-	Moderado	Nivel Moderado	0,5
24	-	Alto	Nivel Alto	0,5

Fuente: Autor

Anexo 5: Código utilizado en el software especializado

```
%% UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
%% MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
%% Mención en Sistemas Eléctricos de Potencia
%% Autor: Ing. William Mauricio Rojas Cumbicus
%% Director de Tesis: Ing. Rodolfo Pabel Merino Vivanco Mg. Sc.
%% EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO DE TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN
%% UTILIZANDO SISTEMAS DE INFERENCIA DIFUSA EN EL MARCO DE LA
GESTIÓN DE ACTIVOS

%% Definir Funciones
FUNCION_IS=readfis('IS.fis');
FUNCION_FC=readfis('FC.fis');
FUNCION_IR=readfis('IR.fis');

%% Evaluación del Índice de Salud
ENTRADA_IS=[Edad, Cargabilidad];
RESULTADO_IS=evalfis(ENTRADA_IS,FUNCION_IS);

%% Evaluación del factor de consecuencia
ENTRADA_FC=[Capacidad, Clientes, Luminarias, Tipo];
RESULTADO_FC=evalfis(ENTRADA_FC,FUNCION_FC);

%% Evaluación del índice de riesgo
ENTRADA_IR=[RESULTADO_IS, RESULTADO_FC];
RESULTADO_IR=evalfis(ENTRADA_IR,FUNCION_IR)
```

Anexo 6: Tablas de categorización del índice de salud

Luego de aplicar el primer sistema de inferencia, se determina el índice de riesgo de cada uno de los transformadores de distribución de la base de datos en estudio. Estos valores son categorizados, y como resultado, en la Tabla 6A se muestran todos los transformadores con un índice de salud alto, en la Tabla 6B se muestran los transformadores de distribución con un índice de salud moderado, en la Tabla 6C se muestran los transformadores de distribución con un índice de salud bajo y en la tabla 6D los transformadores de distribución con un índice de salud muy bajo.

Índice de salud: Alto

Tabla 6A.

*Transformadores de distribución
con un índice de salud alto*

Unidad	No. Transformador	Índice de salud
1	8223	0,8771
4	12711	0,8771
6	373	0,8771
7	380	0,8771
9	8829	0,8771
12	7235	0,8771
15	376	0,8771
38	4387	0,8771
39	371	0,8771
42	379	0,8771
57	11366	0,8771
63	403	0,8771
68	9963	0,8771
84	432	0,8771
94	360	0,8771
100	128	0,8771
105	3775	0,8771
106	3381	0,8771
108	8914	0,8771
119	8692	0,8771
122	382	0,8771
126	236	0,8771
137	384	0,8771

Unidad	No. Transformador	Índice de salud
139	4047	0,8771
156	11322	0,8771
176	7562	0,8771
154	7228	0,8516
121	3028	0,8496
14	430	0,8298
162	11233	0,8031
142	8339	0,8010
168	8599	0,7852
13	3696	0,7776
19	9240	0,7677
23	7845	0,7677
35	412	0,7677
36	12323	0,7677
56	1885	0,7677
60	1443	0,7677
81	406	0,7677
83	13411	0,7677
89	357	0,7677
102	12322	0,7677
109	13148	0,7677
111	1303	0,7677
157	425	0,7677
87	5598	0,7659
3	11323	0,7605

Fuente: Autor

Índice de salud: Moderado

Tabla 6B.

*Transformadores de Distribución
con un índice de salud moderado*

Unidad	No. Transformador	Índice de salud
62	13902	0,7459
40	372	0,7455
161	11581	0,7382
41	12881	0,7351
179	13277	0,7345
46	14434	0,7340
116	14075	0,7340
85	443	0,7265
143	414	0,7189
171	7699	0,7109
2	419	0,7008
11	8668	0,7008
16	435	0,7008
52	3998	0,7008
59	3927	0,7008
64	4195	0,7008
65	6938	0,7008
86	3925	0,7008
104	7250	0,7008
117	12588	0,7008
120	5959	0,7008
145	8799	0,7008
130	366	0,6900
92	6104	0,6894
21	3422	0,6791
51	9550	0,6428
45	14093	0,6250
101	16215	0,6250
140	16077	0,6250
141	15647	0,6250
169	14521	0,6250
54	16833	0,6210
58	16950	0,6210
61	13921	0,6210
177	16957	0,6210

Unidad	No. Transformador	Índice de salud
26	422	0,6194
37	3926	0,6194
43	10775	0,6194
44	14738	0,6194
47	447	0,6194
48	6935	0,6194
67	12459	0,6194
69	12378	0,6194
70	895	0,6194
72	6830	0,6194
90	12018	0,6194
91	11212	0,6194
93	427	0,6194
107	9233	0,6194
112	13239	0,6194
113	8694	0,6194
118	12712	0,6194
127	12855	0,6194
128	11262	0,6194
129	6491	0,6194
144	13124	0,6194
158	12325	0,6194
34	16899	0,5532
33	17370	0,5480
76	17387	0,5480
146	17396	0,5480
170	18645	0,5480
175	17361	0,5480
138	13920	0,5414
22	13618	0,5356
49	13743	0,5356
110	13874	0,5356
123	13702	0,5356
53	16244	0,5153
148	15112	0,5153
163	16341	0,5111
82	16942	0,5010

Fuente: Autor

Índice de salud: bajo

Tabla 6C.

*Transformadores de distribución
con un índice de salud bajo*

Unidad	No. Transformador	Índice de salud
124	16901	0,5000
150	17090	0,5000
20	17379	0,4847
25	16889	0,4847
155	17363	0,4847
133	20139	0,4660
55	18107	0,4628
5	14129	0,4520
17	14866	0,4520
50	14167	0,4520
66	14787	0,4520
71	14925	0,4520
73	15956	0,4520
74	16342	0,4520
88	15770	0,4520
131	16343	0,4520
132	16296	0,4520
136	24263	0,4520
149	14472	0,4520
159	14901	0,4520
160	14116	0,4520
27	17074	0,4265
8	23748	0,3806
10	24391	0,3806
18	22212	0,3806
32	23735	0,3806
147	23802	0,3806
172	21568	0,3806
75	16632	0,3790
95	16700	0,3790
96	16627	0,3790
99	19267	0,3750

Unidad	No. Transformador	Índice de salud
103	18967	0,3750
125	19294	0,3750
152	19817	0,3750
173	21542	0,3418
29	17642	0,2991
174	21544	0,2768
28	17198	0,2660
30	17912	0,2660
77	17956	0,2660
97	18070	0,2660
98	18858	0,2660
114	21515	0,2660
151	18281	0,2660
164	19433	0,2660
166	21286	0,2660
78	21072	0,2541
134	20900	0,2541
153	20833	0,2541
165	20832	0,2541

Fuente: Autor

Índice de salud: muy bajo

Tabla 6D.

*Transformadores de distribución
con un índice de salud muy bajo*

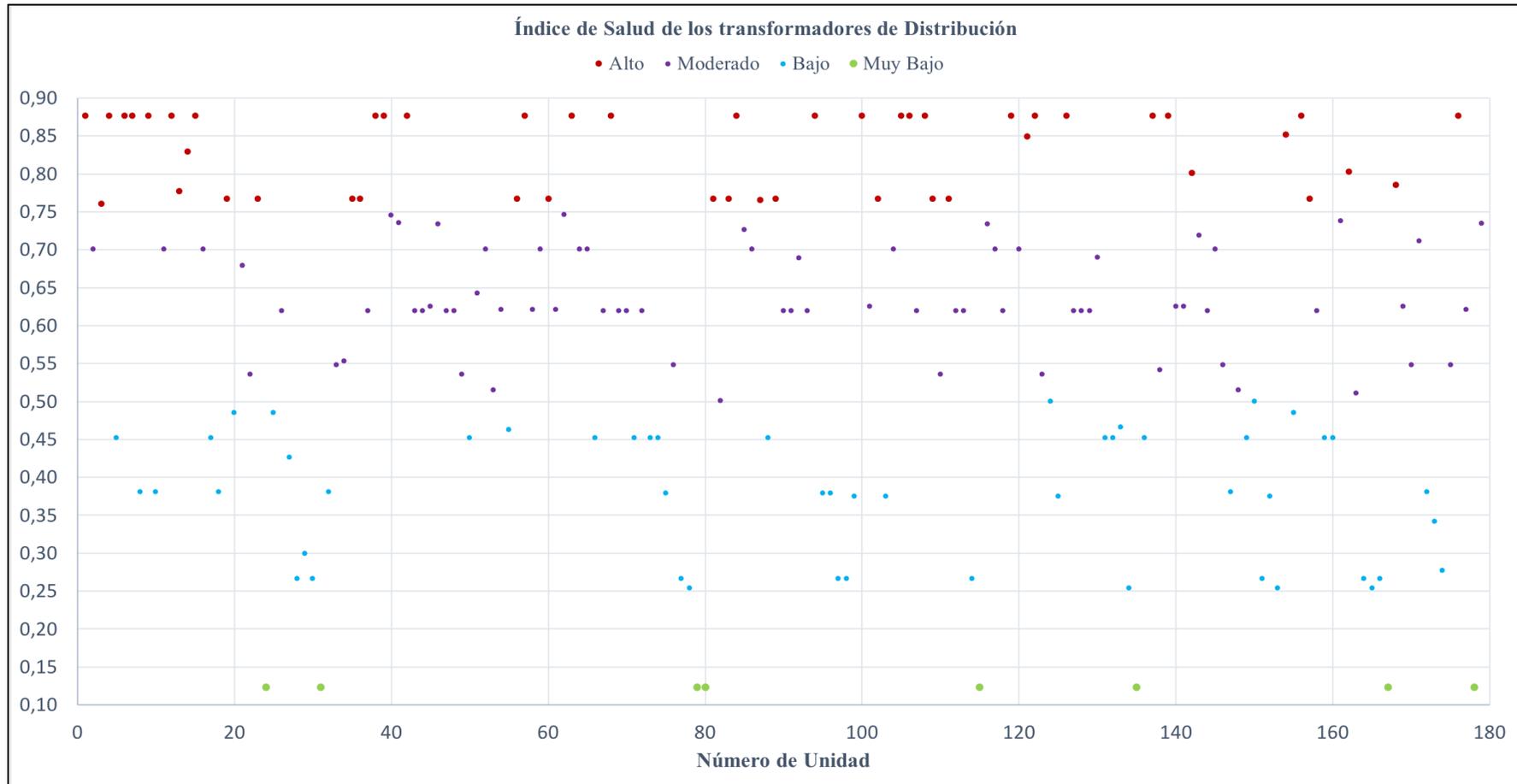
Unidad	No. Transformador	Índice de salud
24	23803	0,1229
31	22044	0,1229
79	21860	0,1229
80	22381	0,1229
115	21493	0,1229
135	22504	0,1229
167	21659	0,1229
178	23471	0,1229

Fuente: Autor

En la figura 6A, se muestra el gráfico de dispersión de los valores de índice de salud obtenidos.

Figura 6A.

Gráfico de dispersión del índice de salud



Fuente: Autor

Anexo 7: Tablas de categorización del factor de consecuencia

Luego de aplicar el segundo sistema de inferencia, se determina el índice de riesgo de cada uno de los transformadores de distribución de la base de datos en estudio. Estos valores son categorizados, y como resultado, en la Tabla 7A se muestran todos los transformadores con un factor de consecuencia alto, en la Tabla 7B se muestran los transformadores de distribución con un factor de consecuencia moderado, en la Tabla 7C se muestran los transformadores de distribución con un factor de consecuencia bajo y en la tabla 7D los transformadores de distribución con un factor de consecuencia muy bajo.

Factor de consecuencia: Alto

Tabla 7A.

Transformadores de distribución con un factor de consecuencia alto

Unidad	No. Transformador	Factor de Consecuencia
170	18645	0,8747
174	21544	0,8747
162	11233	0,8037
52	3998	0,7697
143	414	0,7534
169	14521	0,7534

Fuente: Autor

Factor de consecuencia: Moderado

Tabla 7B.

Transformadores de distribución con un factor de consecuencia moderado.

Unidad	No. Transformador	Factor de Consecuencia
25	16889	0,7285
59	3927	0,6896
86	3925	0,6896
103	18967	0,6896
125	19294	0,6896

Unidad	No. Transformador	Factor de Consecuencia
152	19817	0,6896
176	7562	0,6896
99	19267	0,6727
7	380	0,6316
10	24391	0,6316
15	376	0,6316
24	23803	0,6316
36	12323	0,6316
56	1885	0,6316
58	16950	0,6316
101	16215	0,6316
119	8692	0,6316
122	382	0,6316
137	384	0,6316
18	22212	0,6312
155	17363	0,6312
177	16957	0,6312
3	11323	0,6309
6	373	0,6309
105	3775	0,6309
8	23748	0,6307
14	430	0,6307
57	11366	0,6307
83	13411	0,6307
100	128	0,6307
139	4047	0,6307
34	16899	0,6305
89	357	0,6305
140	16077	0,6305

Unidad	No. Transformador	Factor de Consecuencia
63	403	0,6301
126	236	0,6301
35	412	0,6298
173	21542	0,6298
19	9240	0,6297
20	17379	0,6297
23	7845	0,6297
32	23735	0,6297
82	16942	0,6297
142	8339	0,6297
154	7228	0,6297
165	20832	0,6297
168	8599	0,6297
171	7699	0,6297
172	21568	0,6297
12	7235	0,6000
87	5598	0,5903
13	3696	0,5730
37	3926	0,5730
2	419	0,5716
124	16901	0,5684
141	15647	0,5684
16	435	0,5543
40	372	0,5543
84	432	0,5543
106	3381	0,5543
147	23802	0,5543
5	14129	0,5477
29	17642	0,5442
50	14167	0,5442
90	12018	0,5442
4	12711	0,5388
70	895	0,5388
78	21072	0,5388
80	22381	0,5388
115	21493	0,5388
134	20900	0,5388
79	21860	0,5285
179	13277	0,5285
111	1303	0,5263
9	8829	0,5114

Unidad	No. Transformador	Factor de Consecuencia
21	3422	0,5114
30	17912	0,5114
43	10775	0,5114
45	14093	0,5114
51	9550	0,5114
53	16244	0,5114
55	18107	0,5114
64	4195	0,5114
108	8914	0,5114
130	366	0,5114
148	15112	0,5114
149	14472	0,5114
150	17090	0,5114
164	19433	0,5114
46	14434	0,5098
1	8223	0,5080
60	1443	0,5065
81	406	0,5017

Fuente: Autor

Factor de consecuencia: Bajo

Tabla 7C.

Transformadores de distribución con un factor de consecuencia bajo.

Unidad	No. Transformador	Factor de Consecuencia
61	13921	0,4929
62	13902	0,4929
94	360	0,4929
120	5959	0,4929
138	13920	0,4929
157	425	0,4929
42	379	0,4928
116	14075	0,4928
156	11322	0,4896
54	16833	0,4887
92	6104	0,4887
117	12588	0,4886

Unidad	No. Transformador	Factor de Consecuencia
38	4387	0,4866
121	3028	0,4744
76	17387	0,4724
175	17361	0,4724
11	8668	0,4715
28	17198	0,4715
41	12881	0,4715
68	9963	0,4715
77	17956	0,4715
91	11212	0,4715
93	427	0,4715
96	16627	0,4715
97	18070	0,4715
102	12322	0,4715
104	7250	0,4715
109	13148	0,4715
112	13239	0,4715
114	21515	0,4715
128	11262	0,4715
151	18281	0,4715
153	20833	0,4715
161	11581	0,4715
166	21286	0,4715
33	17370	0,4643
75	16632	0,4612
132	16296	0,4582
48	6935	0,4437
127	12855	0,3947
17	14866	0,3829
44	14738	0,3829
49	13743	0,3829
66	14787	0,3829
69	12378	0,3829
71	14925	0,3829
98	18858	0,3829
129	6491	0,3829
133	20139	0,3829
144	13124	0,3829
158	12325	0,3829
159	14901	0,3829
167	21659	0,3829

Unidad	No. Transformador	Factor de Consecuencia
178	23471	0,3829
145	8799	0,3826
163	16341	0,3818
27	17074	0,3805
31	22044	0,3805
67	12459	0,3805
72	6830	0,3805
74	16342	0,3805
88	15770	0,3805
95	16700	0,3805
107	9233	0,3805
110	13874	0,3805
118	12712	0,3805
123	13702	0,3805
131	16343	0,3805
135	22504	0,3805
136	24263	0,3805
160	14116	0,3805
65	6938	0,3703
26	422	0,3684
146	17396	0,3684
85	443	0,3227
39	371	0,2603
22	13618	0,2543

Fuente: Autor

Factor de consecuencia: Muy bajo

Tabla 7D.

Transformadores de distribución un factor de consecuencia muy bajo

Unidad	No. Transformador	Factor de Consecuencia
47	447	0,2466
73	15956	0,2466
113	8694	0,2466

Fuente: Autor

Anexo 8: Tablas de categorización del índice de riesgo

Luego de aplicar el último sistema de inferencia, se determina el índice de riesgo de cada uno de los transformadores de distribución de la base de datos en estudio. Estos valores son categorizados, y como resultado, en la Tabla 8A se muestran todos los transformadores con un índice de riesgo alto, en la Tabla 8B se muestran los transformadores de distribución con un índice de riesgo moderado y en la Tabla 8C se muestran los transformadores de distribución con un índice de riesgo bajo.

Nivel de Riesgo alto

Tabla 8A.

Transformadores de distribución con un índice de riesgo de nivel alto

Unidad	Número de transformador	Índice de Riesgo
162	11233	0,8771
170	18645	0,7761
52	3998	0,7690

Fuente: Autor

Nivel de Riesgo Moderado

Tabla 8B.

Transformadores de distribución con un índice de riesgo de nivel moderado

Unidad	Número de transformador	Índice de Riesgo
143	414	0,7397
169	14521	0,7397
4	12711	0,7202
6	373	0,7202
7	380	0,7202
12	7235	0,7202
13	3696	0,7202
14	430	0,7202
15	376	0,7202
57	11366	0,7202
63	403	0,7202

Unidad	Número de transformador	Índice de Riesgo
84	432	0,7202
100	128	0,7202
105	3775	0,7202
106	3381	0,7202
119	8692	0,7202
122	382	0,7202
126	236	0,7202
137	384	0,7202
139	4047	0,7202
142	8339	0,7202
154	7228	0,7202
168	8599	0,7202
176	7562	0,7202
19	9240	0,7187
23	7845	0,7187
35	412	0,7187
36	12323	0,7187
56	1885	0,7187
83	13411	0,7187
89	357	0,7187
111	1303	0,7187
87	5598	0,7184
3	11323	0,7174
40	372	0,6858
174	21544	0,6754
9	8829	0,6751
108	8914	0,6751
1	8223	0,6640
60	1443	0,6588
179	13277	0,6499
81	406	0,6440

Unidad	Número de transformador	Índice de Riesgo
2	419	0,6250
16	435	0,6250
34	16899	0,6250
37	3926	0,6250
58	16950	0,6250
59	3927	0,6250
70	895	0,6250
86	3925	0,6250
90	12018	0,6250
101	16215	0,6250
140	16077	0,6250
141	15647	0,6250
171	7699	0,6250
177	16957	0,6250
94	360	0,6181
42	379	0,6177
157	425	0,6172
156	11322	0,6085
38	4387	0,6000
46	14434	0,5895
62	13902	0,5848
102	12322	0,5695
109	13148	0,5695
68	9963	0,5693
121	3028	0,5693
53	16244	0,5666
148	15112	0,5666
21	3422	0,5657
43	10775	0,5657
45	14093	0,5657
51	9550	0,5657
64	4195	0,5657
130	366	0,5657
82	16942	0,5455
124	16901	0,5411
25	16889	0,5374
116	14075	0,5318
20	17379	0,5274
155	17363	0,5274
39	371	0,5264
5	14129	0,5263

Unidad	Número de transformador	Índice de Riesgo
8	23748	0,5263
10	24391	0,5263
18	22212	0,5263
29	17642	0,5263
32	23735	0,5263
50	14167	0,5263
99	19267	0,5263
103	18967	0,5263
125	19294	0,5263
147	23802	0,5263
152	19817	0,5263
172	21568	0,5263
173	21542	0,5263
150	17090	0,5232
161	11581	0,5176
55	18107	0,5088
149	14472	0,5088
41	12881	0,5056

Fuente: Autor

Nivel de Riesgo Bajo

Tabla 8C.

Transformadores de distribución con un índice de riesgo de nivel bajo

Unidad	Número de Transformador	Índice de Riesgo
61	13921	0,4985
120	5959	0,4985
138	13920	0,4985
54	16833	0,4914
92	6104	0,4914
117	12588	0,4912
85	443	0,4778
30	17912	0,4771
164	19433	0,4771
11	8668	0,4737
26	422	0,4737
33	17370	0,4737
44	14738	0,4737

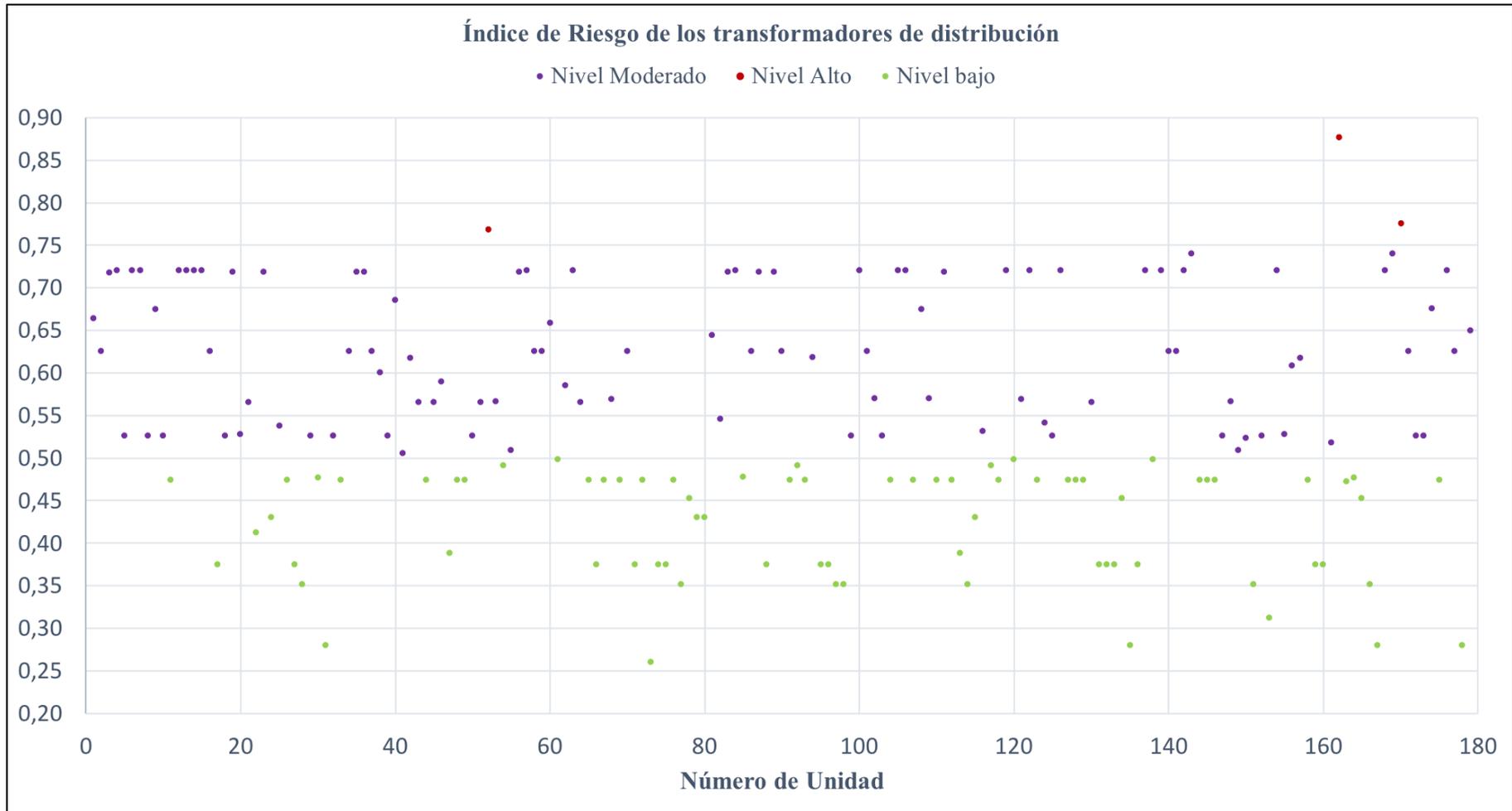
Unidad	Número de Transformador	Índice de Riesgo	Unidad	Número de Transformador	Índice de Riesgo
48	6935	0,4737	47	447	0,3886
49	13743	0,4737	113	8694	0,3886
65	6938	0,4737	17	14866	0,3750
67	12459	0,4737	27	17074	0,3750
69	12378	0,4737	66	14787	0,3750
72	6830	0,4737	71	14925	0,3750
76	17387	0,4737	74	16342	0,3750
91	11212	0,4737	75	16632	0,3750
93	427	0,4737	88	15770	0,3750
104	7250	0,4737	95	16700	0,3750
107	9233	0,4737	96	16627	0,3750
110	13874	0,4737	131	16343	0,3750
112	13239	0,4737	132	16296	0,3750
118	12712	0,4737	133	20139	0,3750
123	13702	0,4737	136	24263	0,3750
127	12855	0,4737	159	14901	0,3750
128	11262	0,4737	160	14116	0,3750
129	6491	0,4737	28	17198	0,3515
144	13124	0,4737	77	17956	0,3515
145	8799	0,4737	97	18070	0,3515
146	17396	0,4737	98	18858	0,3515
158	12325	0,4737	114	21515	0,3515
175	17361	0,4737	151	18281	0,3515
163	16341	0,4723	166	21286	0,3515
78	21072	0,4529	153	20833	0,3125
134	20900	0,4529	31	22044	0,2798
165	20832	0,4529	135	22504	0,2798
24	23803	0,4307	167	21659	0,2798
79	21860	0,4307	178	23471	0,2798
80	22381	0,4307	73	15956	0,2603
115	21493	0,4307			
22	13618	0,4120			

Fuente: Autor

En la Figura 8A se muestra el gráfico de dispersión con los valores de índice de riesgo obtenidos para cada uno de los transformadores de distribución.

Figura 8A.

Gráfico de dispersión del índice de riesgo



Fuente: Autor

Anexo 9. Encuesta propuesta para la obtención del criterio experto

Criterio Experto

EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO SISTEMAS DE INFERENCIA DIFUSA EN EL MARCO DE LA GESTIÓN DE ACTIVOS

***Obligatorio**

1. Correo *
2. Nombre *
3. Lugar de Trabajo *
4. Cargo *
5. Experiencia (Años) *

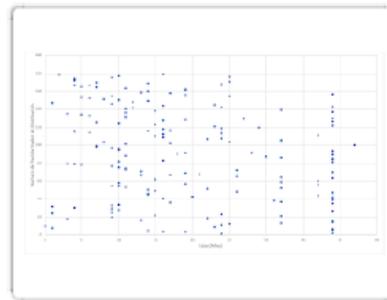
El análisis mediante lógica difusa permite dividir una variable en subcategorías conocidas como funciones de membresía y poder definir su estado en función de los rangos establecidos.



1. **La edad del transformador de distribución** es uno de los indicadores del estado actual de la unidad.

Considera usted que las funciones de membresía deben definirse en función de:

Marca solo un óvalo.



Edad promedio del transformador

Datos obtenidos de la base de datos en estudio

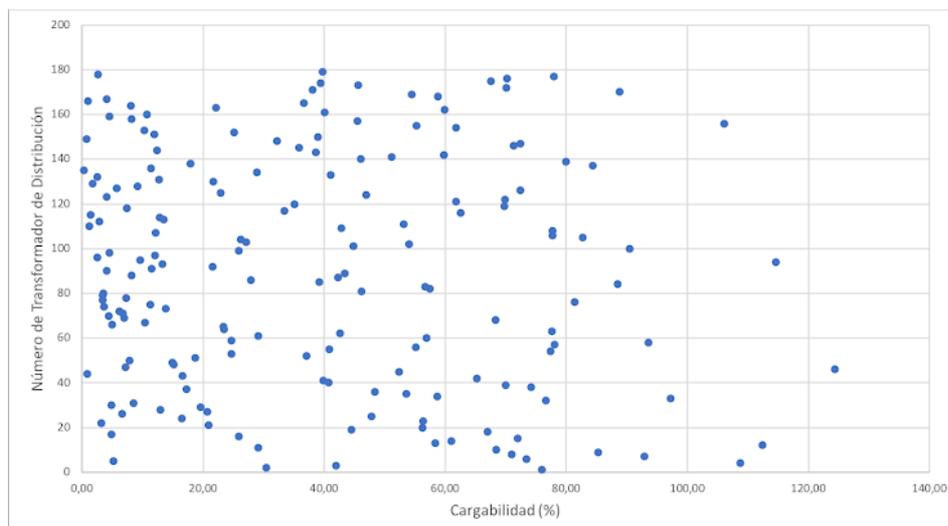
2. ¿En qué rangos de años usted considera adecuado definir el análisis de la vida útil de un transformador?

Marca solo un óvalo.

Nuevo: [0~5]; Seminuevo [5~10]; Viejo [10~15]; Muy viejo [>15]. (en años) Nuevo: [0~7.5]; Seminuevo [7.5~15]; Viejo [15~22.5]; Muy viejo [>22.5] (en años) Nuevo: [0~10]; Seminuevo [10~15]; Viejo [15~20]; Muy viejo [>20]. (en años)

Otro: _____

3. En la Figura se muestra la **cargabilidad de los transformadores de distribución en %** de la base de datos en estudio. Si se quiere dividir el estado de la variable en cuatro funciones membresía, ¿Qué rangos considera adecuados para definir las funciones de membresía?



Marca solo un óvalo.

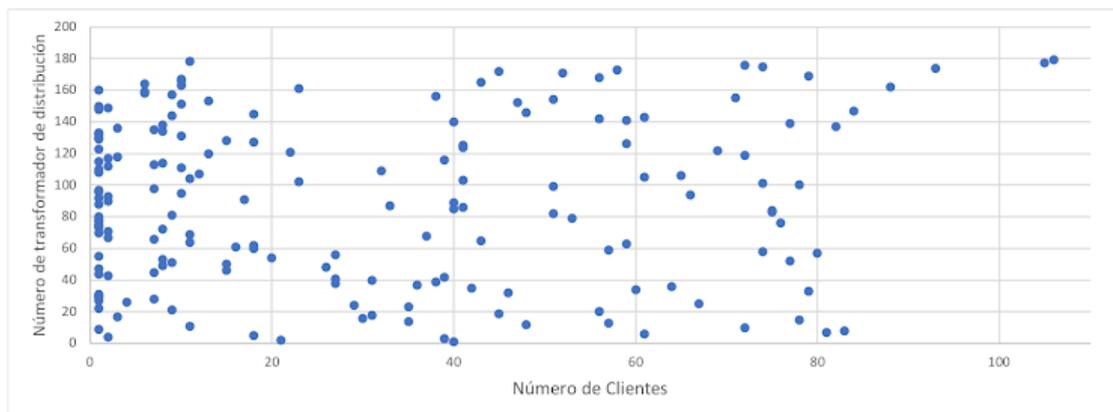
Muy Baja: [0,10]; Baja [10,30]; Moderada [30,50]; Alta [>50] (%)

Muy Baja: [0,20]; Baja [20,40]; Moderada [40,60]; Alta [>60] (%)

Muy Baja: [0,25]; Baja [25,50]; Moderada [50,75]; Alta [>75] (%)

Otro: _____

4. En la Figura se muestra la **capacidad de los transformadores de distribución en kVA** de la base de datos en estudio. Si se quiere dividir el estado de la variable en cuatro funciones membresía, ¿Qué rangos considera adecuados para definir las funciones de membresía?



Marca solo un óvalo.

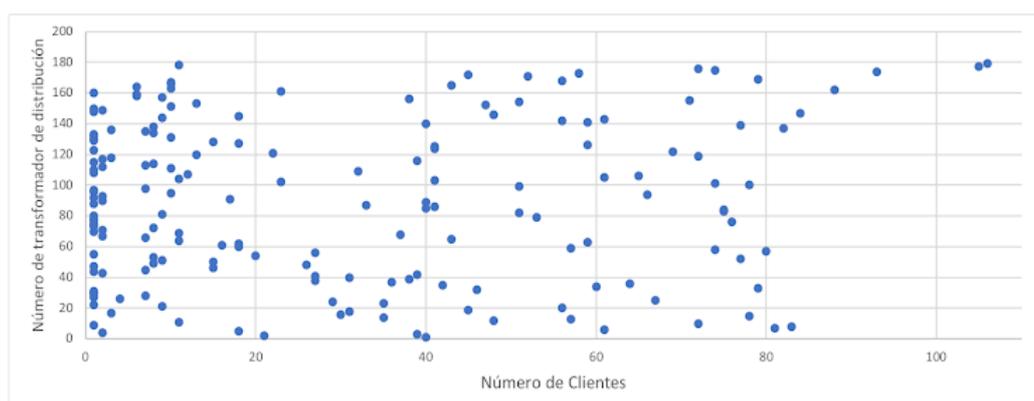
Muy Baja: [0~5]; Baja [5~15]; Moderada [15~30]; Alta [>30] (kVA) Muy Baja:

[0~10]; Baja [10~20]; Moderada [20~30] ; Alta [>30] (kVA) Muy Baja: [0~20]; Baja

[20~40]; Moderada [40~60] ; Alta [>60] (kVA)

Otro: _____

5. En la Figura se muestra la **cantidad de clientes conectados a cada uno de los transformadores de distribución** de la base de datos en estudio. Si se quiere dividir el estado de la variable en cuatro funciones membresía, ¿Qué rangos considera adecuados para definir las funciones de membresía?



Marca solo un óvalo.

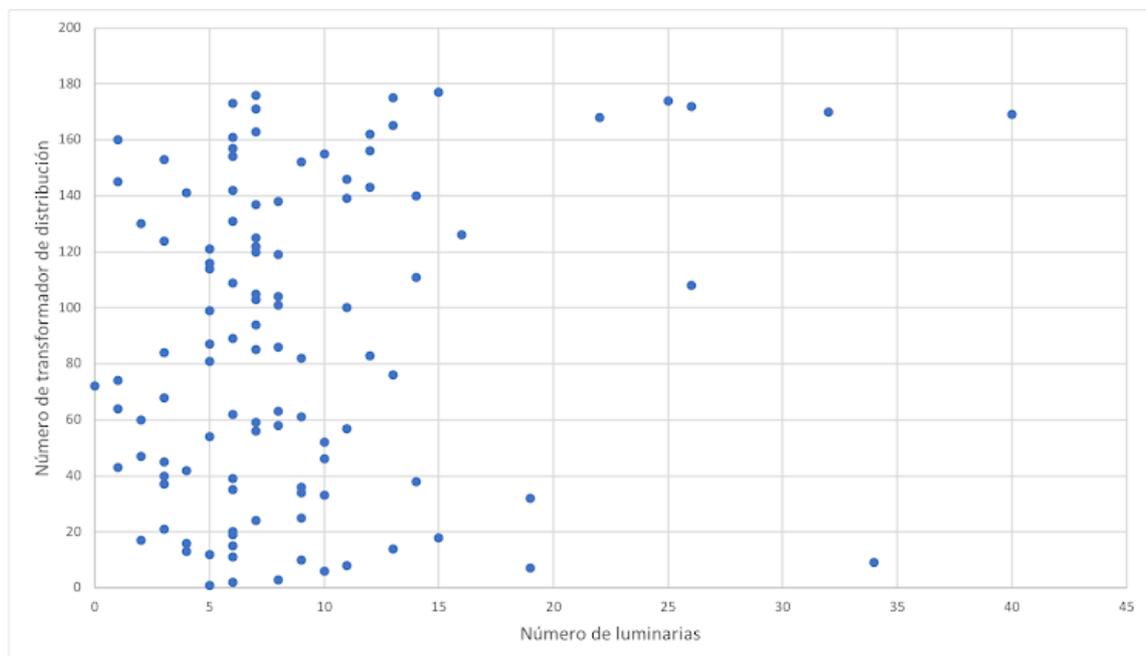
Muy Baja: [0~20]; Baja [20~40]; Moderada [40~60]; Alta [>60] (en cantidad)

Muy Baja: [0~25]; Baja [25~50]; Moderada [50~75]; Alta [>75] (en cantidad)

Muy Baja: [0~10]; Baja [10~20]; Moderada [20~30]; Alta [>30] (en cantidad)

Otro: _____

6. En la Figura se muestra la **cantidad de luminarias conectados a cada uno de los transformadores de distribución** de la base de datos en estudio. Si se quiere dividir el estado de la variable en cuatro funciones membresía, ¿Qué rangos considera adecuados para definir las funciones de membresía?



Marca solo un óvalo.

Muy Baja: [0~10]; Baja [10~20]; Moderada [20~30]; Alta [>30] (en cantidad)

Muy Baja: [0~7.5]; Baja [7.5~15]; Moderada [15~22.5]; Alta [>22.5] (en cantidad)

Muy Baja: [0~5]; Baja [5~10]; Moderada [10~20]; Alta [>20] (en cantidad)

Otro: _____

7. Considera necesario que el tipo de usuario final sea una variable necesaria para cuantificar el factor de consecuencia de falla del transformador:

Marca solo un óvalo.

SI Salta a la pregunta 7.1

NO Salta a la pregunta 8

Tipos de Usuarios

Jerarquizar el tipo de usuario final y su nivel de importancia ante una posible desconexión.

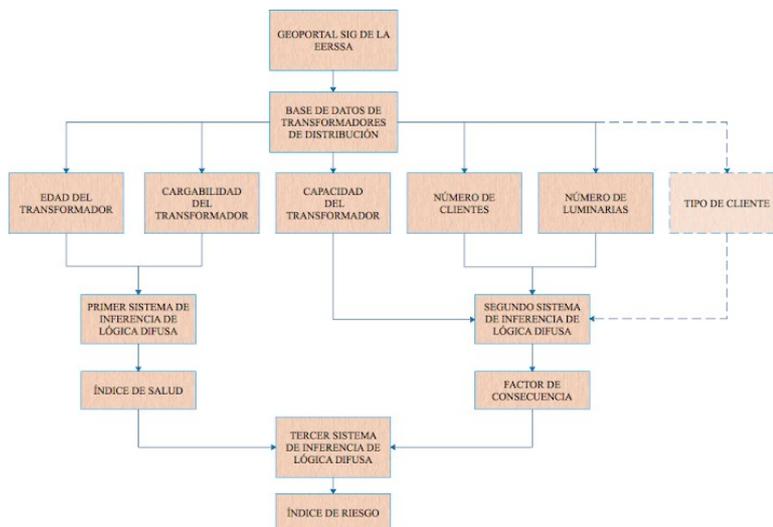
7.1. En caso de que la respuesta haya sido “SI”, cualifique los siguientes tipos de usuarios en valores enteros entre 1 y 4, indicando su nivel de importancia, en donde 1 es de alta importancia.

Nota: Asegúrese de utilizar los cuatro niveles.

Selecciona todos los que correspondan.

	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Sector Estratégico	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Entidades Financieras	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Salud y Seguridad	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Negocios Particulares	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Residenciales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

8. La figura se muestra el esquema de operalización de variables propuesto en el estudio actual. Los indicadores resultados índice de Salud, Factor de Consecuencia e índice de riesgo serán las variables que permitan determinar el estado del transformador de distribución. Estas variables son normalmente definidas en rangos [0~1]. Considera que estos indicadores se deben dividir en cuatro funciones de membresía simétricas:



Marca solo un óvalo.

SI {Muy Bajo: [0~0.25]; Bajo [0.25~0.5]; Moderado [0.5~0.75]; Alto [>0.75]}

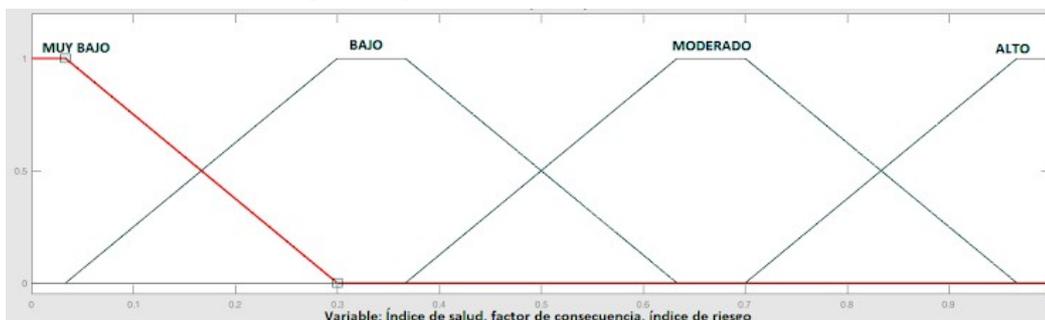
NO *Salta a la pregunta 9*

Rangos de las funciones de membresía
de los indicadores

ÍNDICE DE SALUD, FACTOR DE CONSECUENCIA E ÍNDICE DE RIESGO

9. En caso de que la respuesta haya sido “NO”, indique el rango que considera adecuado para definir las funciones de membresía”.

Tome como referencia la figura adjunta.



Marca solo un óvalo por fila.

	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Sector Estratégico	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Entidades Financieras	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Salud y Seguridad	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Negocios Particulares	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Residenciales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Anexo 10. Certificado de traducción de resumen

Loja, 07 de septiembre de 2022

Yo, **William Mauricio Rojas Cumbicus**, con cédula de identidad **1104755366**, con **NIVEL INTERMEDIO B2-INGLÉS**, certificado en el Ministerio de trabajo del Ecuador **No. MDT-OC-330285**, código de calificación **SETEC-CAL-2019-0286**, certifico:

Que tengo el conocimiento requerido del idioma inglés y que la traducción del resumen de trabajo de titulación denominado: **“Evaluación del índice de riesgo de transformadores de distribución utilizando sistemas de inferencia difusa en el marco de la gestión de activos”** de la autoría del estudiante **William Mauricio Rojas Cumbicus**, con cédula de identidad **1104755366**, es textual, verdadera y correcta a mi mejor saber y entender.

Lo certifico en honor a la verdad, facultando al portador del presente documento, hacer el uso legal pertinente.

Atentamente



William Mauricio Rojas Cumbicus
NIVEL INTERMEDIO B2-INGLÉS
MDT-OC-330285