

ESCUELA DE INGENIERÍA EN SISTEMAS

Tema:

**SISTEMA EXPERTO DIFUSO PARA EL DIAGNÓSTICO DEL ÍNDICE DE
SALUD DE TRANSFORMADORES**

**Proyecto de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero en
Tecnologías de la Información**

Línea de Investigación:

Tecnologías de la Información y la Comunicación

Autor:

Franklin Rolando Camacho Cañizares

Director:

Mg. Galo Mauricio López Sevilla

Ambato – Ecuador

Octubre 2022

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR SEDE AMBATO
HOJA DE APROBACIÓN

Tema:

SISTEMA EXPERTO DIFUSO PARA EL DIAGNÓSTICO DEL ÍNDICE DE SALUD
DE TRANSFORMADORES

Línea de Investigación:

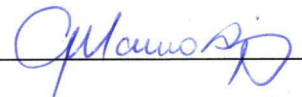
Tecnologías de la Información y la Comunicación

Autor:

Franklin Rolando Camacho Cañizares

Galo Mauricio López Sevilla, Ing. Mg.

CALIFICADOR

f. 

Teresa Milena Freire Ayllón, Ing. Mg.

CALIFICADOR

f. 


Darío Javier Robayo Jácome, Ing. Mg.

CALIFICADOR

f. 

Santiago Alejandro Acurio Maldonado, Ing. Mg.

DIRECTOR ESCUELA DE SISTEMAS

f. 

Hugo Rogelio Altamirano Villaroel, Dr.

SECRETARIO GENERAL PUCESA

f. 
 Pontificia Universidad
Católica del Ecuador
SECRETARÍA GENERAL
PROCURADURÍA

Ambato – Ecuador

Octubre 2022


DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo: **FRANKLIN ROLANDO CAMACHO CAÑIZARES**, con **CC. 180376478-4**, autor del trabajo de graduación intitulado: “**SISTEMA EXPERTO DIFUSO PARA EL DIAGNÓSTICO DEL ÍNDICE DE SALUD DE TRANSFORMADORES**”, previa a la obtención del título profesional de **INGENIERO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**, en la escuela de **INGENIERÍA EN SISTEMAS**.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a difundir a través del sitio web de la Biblioteca de la PUCE Ambato, el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual de la Universidad.

Ambato, octubre 2022



FRANKLIN ROLANDO CAMACHO CAÑIZARES

CC. 180376478-4

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme cumplir esta meta y por tener la dicha de contar con la presencia de mis padres Franklin y Germania al alcanzar este objetivo, quienes con su sabiduría, guía y amor me han brindado herramientas fundamentales para defenderme en la vida y que, además, me han apoyado de manera total para alcanzar mis objetivos.

A María José por ser una persona incondicional, quien me ha brindado su amor y apoyo en toda la carrera, con el ejemplo de siempre seguir adelante y darme otra perspectiva de la vida.

A toda la familia Villacrés Zúñiga por sus consejos, cariño y apoyo.

A mi hermano Álvaro por el cariño sincero y los momentos compartidos.

A todos mis docentes, en especial a mi tutor Ing. Galo López quien fue de gran apoyo durante el desarrollo de mi carrera y de mi tesis, quien a más de, ser un excelente docente, se convirtió en un gran amigo.

A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato, facultad de ingeniería y todo su personal en general, por los conocimientos, oportunidades y experiencia.

A todos mis familiares, amigos y otras personas que me han apoyado y han creído en mí.

Quiero agradecer, además, a la empresa LIARGY que permitió el desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios por la vida, sabiduría y guía durante el proceso de aprendizaje y en general en el transcurso de mi existencia.

A mis padres Franklin y Germania por todo el amor, guía y apoyo fundamental.

A María José por su invaluable e incondicional apoyo y cariño.

RESUMEN

En el sector empresarial surge la necesidad de la incorporación de la tecnología por la evolución exponencial de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) para proporcionar mayor competitividad y aumentar su productividad de forma general. En la ciudad de Ambato la empresa “LIARGY” se dedica entre sus servicios al análisis de aceites dieléctricos de transformadores con el fin de determinar las propiedades eléctricas físicas y químicas del aceite aislante para anticiparse a posibles fallas. Actualmente, la empresa diagnostica los resultados de los análisis de aceites dieléctricos con el uso de lógica clásica basado en los parámetros de normativas vigentes, a su vez, no permite la determinación de índice de salud global del equipo que precisa del criterio de un experto, lo que causa lentitud en el proceso de diagnóstico. La investigación tiene como objetivo desarrollar un sistema experto difuso para la automatización del diagnóstico del aceite dieléctrico para transformadores inmersos en aceite mineral, a través del cálculo de un índice de salud. Dentro del trabajo investigativo, se emplea métodos teóricos y empíricos, donde el diseño de la investigación es no experimental transversal descriptivo con un método inductivo-deductivo. La metodología de desarrollo adoptada es Scrum combinada con técnicas operativas de lógica difusa y análisis clásico. Se desarrolla un sistema que permite automatizar el diagnóstico del estado de transformadores eléctricos basados en el cálculo del índice de salud con seis variables de las propiedades fisicoquímicas del aceite aislante, mediante el análisis de inferencia difusa y reglas de criterios expertos.

Palabras clave: sistema experto, lógica difusa, transformadores, Scrum

ABSTRACT

In the business industry, the need to incorporate technology arises, due to the exponential evolution of Information and Communications Technology (ICT) to provide competitiveness and to increase productivity as a general aspect. In the city of Ambato, the company "LIARGY" is devoted, among other services, to the analysis of dielectric oil from power transformers, with the aim of determining the electric physical and chemical properties of insulating oil, to prevent any possible failure. Nowadays, the company diagnoses the results of the analysis in dielectric oil with the use of classic logic, based on the parameters of current regulations that do not let to determine a global health index of the equipment, which requires the criteria of an expert causing delays in the diagnostic process. This research has as an objective, to develop a fuzzy expert system for the automation of dielectric oil diagnosis for transformers immersed in mineral oil, through the calculation of a health index. Within the study, theoretical and empirical methods are used, where the research design is nonexperimental descriptive transversal with an inductive-deductive method. The development methodology that was used is Scrum, combined with operative techniques of fuzzy logic and classical analysis. A system that allows automating the diagnosis of the condition of electrical transformers based on the calculation of the health index with six variables of the physicochemical properties of the insulating oil, by applying fuzzy inference analysis and expert criteria rules.

Key words: expert system, fuzzy logic, transformers, Scrum.

ÍNDICE

PRELIMINARES

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE Y LA PRÁCTICA.....	9
1.1 Sistemas Expertos Difusos.....	9
1.2 Índice de Salud de Transformadores.....	21
1.3 Desarrollo de un Sistema Experto Difuso	29
CAPÍTULO 2. DISEÑO METODOLÓGICO	38
2.1 Caracterización de la Empresa	38
2.2 Metodología de la Investigación	40
2.3 Metodología del Desarrollo.....	43
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	95
3.1 Comparación de resultados.....	95
3.2 Validación del sistema	100
CONCLUSIONES.....	107
RECOMENDACIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	110
ANEXOS	120

INTRODUCCIÓN

Se pretende realizar un desarrollo experimental de un sistema experto en donde la lógica difusa es el motor central del diagnóstico computarizado en base a resultados del análisis del aceite dieléctrico de un transformador. Los resultados de las propiedades físicas, dieléctricas y cromatográficas en adición a la normativa del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), se relacionan mediante el sistema en mención para la facilidad y precisión del diagnóstico de transformadores eléctricos de potencia inmersos en aceite mineral dieléctrico.

El transformador eléctrico forma parte esencial dentro del suministro de electricidad. Además, estos activos son de alto costo y el reemplazo parcial, total o mantenimiento correctivo causan inversiones adicionales que llegan a superar la mitad del precio del activo (Cerón et al., 2015). Es importante que prevalezcan los mantenimientos preventivos, dado que, reducen fallas inesperadas en el suministro de energía, aumenta la vida útil del equipo y evita incurrir en costos adicionales. Cerón et al. (2015), afirman que más de la mitad de las fallas son evitadas a través de análisis preventivo en especial del aceite dieléctrico, donde el cálculo del índice de salud permite conocer de forma global el estado del transformador y así caracterizarlo para ejecutar de forma anticipada a una falla los respectivos mantenimientos.

El transformador eléctrico de potencia, se encuentra comúnmente inmerso en aceite dieléctrico, el cual, tiene la finalidad esencial de aislar y enfriar el equipo. El análisis dieléctrico fisicoquímico y cromatográfico permite medir las propiedades y contenidos del aceite aislante, lo cual, establece un mecanismo en base a normativa y el uso de lógica clásica para conocer las propiedades, que se degradan sobre el tiempo y así programar acciones preventivas dadas por las sugerencias y guías de mantenimiento, así como, el conocimiento de expertos.

Los sistemas expertos (SE) son considerados parte del grupo de la inteligencia artificial. Según Badaró et al. (2013), los SE son sistemas que utilizan el conocimiento humano almacenado en un computador para dar solución a los

inconvenientes que demanden el conocimiento de expertos, y a la vez, estos sistemas sean utilizados por personas no especializadas sin conocimiento experto para resolver un problema. Estos sistemas tienen como base el conocimiento humano, por lo que, la estructura requiere técnicas para generar bases de conocimiento y un motor de inferencia para simular un procesamiento natural.

Dentro de los tipos de sistemas expertos, se encuentran: basados en reglas preestablecidas, representación del conocimiento, reglas condicionales, basados en casos, basados en redes bayesianas y los sistemas expertos difusos (Badaró et al., p.356, 2013). Los de mayor relevancia al desarrollo de la investigación, son el sistema basado en reglas, el cual, permite el ingreso de conocimiento experto al sistema mediante la codificación de reglas del tipo "si...entonces...", seguido del sistema difuso, el cual, mediante el procesamiento matemático permite modelar de forma aproximada el proceso humano de razonamiento y tomar decisiones en un rango no absoluto.

Los sistemas expertos difusos, se han desarrollado con el fin de proporcionar una forma de que las aplicaciones interpretarán resultados que no son totalmente verdaderos ni completamente falsos como lo es el caso de la lógica clásica. Según Rueda (2010) la lógica difusa es: "la lógica aplicada a conceptos que tomarían un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre dos extremos, la verdad absoluta y la falsedad total." (p.15). Esta lógica representa una forma más aproximada a la interpretación humana y al ser sistematizada permite mejorar la precisión y fiabilidad de los resultados arrojados por un sistema.

La forma de análisis común de los resultados de las propiedades del aceite dieléctrico utiliza la lógica clásica, donde los criterios de aceptación son el cumplir o no cumplir la normatividad. Este tipo de interpretación, se lleva a cabo en sistemas comunes condicionales, dado que, los ordenadores compilan datos precisos mediante la lógica booleana. La lógica difusa es definida por Almache (2013) como: "ciencia de los principios formales del razonamiento aproximado, flexible y tolerante con la imprecisión, capaz de modelar problemas no lineales." (p.7). El incluir valores fuera de ceros y unos, correspondientes a la lógica clásica o booleana, permite a

los sistemas procesar situaciones del mundo real donde los componentes de los grupos son asignados a diferentes grados de pertinencia y así manejar concepciones vagas lingüísticas o datos numéricos imprecisos.

En el contexto internacional, el artículo presentado por Abu-Elanien et al. (2012), desarrollado en la Universidad de Waterloo en Canadá, expone que un índice de salud es una herramienta de gran utilidad para combinar los resultados de los análisis de un transformador y así obtener un solo indicador cuantitativo que simbolice el estado general del equipo. Se determina que para generar el índice es necesario realizar un análisis en conjunto de varios resultados que no lo permiten las técnicas de supervisión actuales. Además, se determina que una de las mejores formas de combinar resultados es el uso de la lógica difusa, la salida es basada en reglas expertas lingüísticas para todas las condiciones de entrada lo que permite que un sistema en base a reglas creadas por expertos procese múltiples resultados numéricos e inferir una salida lingüística para determinar un estado.

El estudio de Abu-Elanien et al. (2012), de igual manera proporciona un índice de certeza de resultados mayor al noventa y cinco por ciento de similitud con índices calculados por la empresa "AMHA", dedicada a la consultoría en gestión de activos y evaluación de índices de salud. La fiabilidad del resultado arrojado por el sistema de inferencia difusa, se relaciona directamente a las reglas desarrolladas por expertos en el área, una vez establecido y verificado los resultados, se garantiza un diagnóstico correcto para la mayoría de los casos.

En Paraguay, el estudio de Sánchez et al. (2016), utiliza la lógica difusa para asignar un mayor grado de pertenencia a los diagnósticos por contenidos de gases disueltos. El artículo afirma la efectividad del uso de la inteligencia artificial dado que los diagnósticos presentados por el sistema difuso corresponden con las opiniones de expertos que tienen vasta experiencia tanto en el mantenimiento preventivo como en el análisis de resultados.

En la revista de Información Tecnológica de Colombia, el artículo publicado por Cerón, Echeverry, Aponte et al. (2015), proporciona una técnica para generar un

índice de salud para transformadores de potencia inmersos en aceite mineral para un rango de tensión de 69000 y 230000 voltios con técnicas de lógica difusa. Se proporciona las funciones de membresía para las entradas de contenido de humedad, nivel de acidez, rigidez dieléctrica, factor de disipación, gases disueltos y contenido de furanos. Como resultado, se caracteriza al índice como un medio para establecer un rango del estado de los transformadores y priorizar el mantenimiento. Además, se menciona la necesidad de contar con un registro de las pruebas para validar el desarrollo del índice sobre el tiempo y llegar a un resultado más confiable.

En el trabajo de investigación de Acosta (2019), desarrollado en la Universidad Nacional del Centro del Perú, propone un modelo desarrollado en MATLAB con seis variables de los resultados arrojados por el análisis del aceite del transformador. El modelo, se aplicó a veintitrés transformadores para demostrar la correspondencia en el estado real y el índice de salud calculado por el modelo difuso. Es de importancia que el índice representa un estado global y no una falla localizada en el equipo, por lo que, es necesario realizar análisis a profundidad para determinar una acción correctiva específica.

En el contexto nacional, la publicación de Chicaiza & Valencia (2017), desarrolla un modelo en MATLAB para el análisis mediante técnicas difusas del contenido de gases disueltos y la consecuente determinación de fallas, donde el modelo ayuda a aumentar la precisión del diagnóstico del transformador. La integración de otros métodos en conjunto con la lógica difusa aumenta la fiabilidad de un resultado y facilita el proceso del diagnóstico, considera más variables y criterios lingüísticos una vez implementado el modelo.

En Ecuador, existen pocos aportes en relación con los sistemas expertos difusos aplicados en el análisis del aceite dieléctrico del transformador, de acuerdo a Pignani (2017), un sistema experto es de importancia alta para mejorar los procesos de diagnóstico, ya sea, como corroboración del criterio a los expertos, soporte en el desarrollo de expertos novatos o una herramienta de apoyo en la toma de decisiones. Además, Montané -García (2011), recalca la importancia de preservar,

evaluar, priorizar y determinar el estado del transformador eléctrico mediante mantenimientos predictivos. Por lo tanto, la incorporación de un sistema experto difuso como elemento de aproximación a la interpretación de un experto en el diagnóstico del estado del transformador mediante el cálculo de un índice de salud, es de suma importancia al mejorar la precisión del diagnóstico.

En las empresas de servicios eléctricos el diagnóstico de los equipos se basa principalmente en el criterio de un experto. Esto causa problemas en la disponibilidad del experto para el diagnóstico múltiple de resultados y la integración de estos para generar un estado global del transformador y tomar medidas predictivas acertadas en sus mantenimientos. Además, el ser humano tiene limitaciones inherentes a la naturaleza como envejecer, enfermar, migrar, entre otras. En el laboratorio químico de la empresa "LIARGY" el proceso de diagnóstico manual en los informes de aceite dieléctrico genera un retraso en la generación de resultados donde los expertos, se encuentran constantemente en el campo de trabajo. Además, la contratación adicional de expertos en el área requiere de entrenamiento exhaustivo y demoroso por la responsabilidad sobre el correcto diagnóstico de los equipos.

Actualmente, el análisis y diagnóstico del aceite dieléctrico es facilitado por valores recomendados de las normativas vigentes, donde en este proceso precisa de un experto que determine, en base a los resultados, la situación actual y posibles medidas preventivas para evitar fallos futuros en los transformadores. El problema reside en que los tiempos de entrega dependen directamente de etapas ajenas a los procesos de determinación de parámetros del laboratorio como la disponibilidad de un experto para emitir un criterio de los resultados. Además, los expertos, laboratoristas y clientes no cuentan con una forma clara y fácil de interpretar los resultados y al encontrarse disgregados dificultan la toma de decisiones de medidas preventivas (Badaró et al., 2013).

En el estudio de Cerón, Echeverry, et al. (2015), se utiliza lógica difusa para la determinación de un índice de salud en transformadores entre 69 y 230 kilovoltios (kV) al igual que en el artículo de Abu Elanien et al. (2012) para transformadores

menores a 69 kV, sin embargo, no existe una herramienta que automatice este proceso y facilite el diagnóstico e integración de los resultados.

Con base en lo expuesto, la pregunta sobre, la cual, se rige esta investigación es: ¿Cómo un sistema experto ayudaría en el proceso de diagnóstico de un transformador por medio de la interpretación e integración de los resultados de los análisis de las propiedades del aceite dieléctrico? Esta argumentación conduce al investigador a formular las siguientes interrogantes científicas como parte de la investigación: ¿Cuáles son los fundamentos teóricos que sustentan el diseño de sistemas expertos y el análisis físico químico de los transformadores?, ¿Cuáles son los procesos metodológicos que permiten combinar los sistemas expertos y el desarrollo rápido y adaptativo de aplicaciones?, ¿Cómo se mejora el proceso de diagnóstico de los transformadores con el sistema experto?

En correspondencia con lo descrito precedentemente, el proyecto de investigación propone como tareas investigativas las mencionadas a continuación. Como tarea principal el Desarrollar un sistema experto difuso para la automatización del diagnóstico del aceite dieléctrico para transformadores inmersos en aceite mineral, cuyos objetivos específicos son:

1. Análisis teórico del uso de lógica difusa para la determinación de las propiedades dieléctricas del aceite del transformador.
2. Diagnóstico de la situación actual de los procesos de interpretación de resultados del análisis del aceite dieléctrico.
3. Desarrollo de los módulos necesarios para la automatización del diagnóstico basado en lógica difusa.

Para desarrollar la investigación, es preciso detallar la metodología a seguir, la cual, es definida como una guía para el investigador que permite adquirir y fundar conocimiento en los campos aplicados de la investigación (Gómez, p.11, 2012). El enfoque para el método teórico de la investigación es de tipo cualitativo de tipo descriptivo bajo los métodos deductivo para los procesos de análisis del laboratorio e inductivo para la codificación del motor difuso y la base de conocimiento a partir

de normativas y estudios existentes. Según Sampieri et al. (2010), el tipo de diseño descriptivo permite al investigador mostrar propiedades y características importantes sobre fenómenos, situaciones o procesos, relevante al estudio para describir los procesos de diagnóstico del transformador mediante el análisis de sus propiedades dieléctricas y, por otra parte, la generalización de estudios para la abstracción de los modelos a desarrollar.

La metodología de desarrollo son el conjunto de técnicas y procesos que permiten El desarrollo de software, se despliega mediante metodología ágil conceptualizada por Pressman (2013), como un grupo de guías sobre el desarrollo de software enfocados a la entrega rápida incremental de avances tangibles para el usuario con un desarrollo sencillo lo que involucra de forma mínima a la ingeniería de software. La metodología ágil seleccionada es *Scrum*, caracterizada por desarrollarse en tareas de trabajo con un patrón preestablecido denominado *Sprint*, de entrega cíclica y que ha sido corroborado ser eficaz (ScrumManager, 2015).

En la ciudad de Ambato existe la empresa “INEDYC” dedicada a proveer servicios de diseño, construcción y mantenimiento de redes y equipos eléctricos. El fundador de la empresa mencionada conjunto con su hijo constituye la sociedad “LIARGY” donde dentro de sus actividades principales, se destacan los análisis físicos, químicos y especiales de aceites dieléctricos de transformadores con el fin de determinar las propiedades de este para anticiparse a posibles fallas.

Actualmente, la empresa diagnostica los resultados de los análisis de aceites dieléctricos con el uso de lógica clásica basado en los parámetros dados por la normatividad vigente, así como, las guías de asociaciones del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). El proceso de diagnóstico depende del conocimiento y criterio de un experto, lo que causa retrasos en la entrega de resultados debido a la corta disponibilidad de tiempo de los analistas. Además, el análisis de los resultados, se realiza de forma aislada y no permiten un análisis integrado que sea reflejado en el diagnóstico.

Por ello la investigación tiene como objetivo desarrollar un sistema experto difuso experimental que, en base a los resultados del análisis dieléctrico fisicoquímico, cromatográfico y contenidos de compuestos de los aceites minerales aislantes y a la normativa vigente, permita diagnosticar la condición del transformador en base al cálculo de un índice de salud. Esto permite reducción de los tiempos de entrega de informes, en adición, al apoyo técnico a los expertos y no expertos en el área, así como, a sus clientes al facilitar el diagnóstico mediante un único índice general de fácil interpretación. Posteriormente, se valida a través de pruebas que permitan verificar el funcionamiento correcto del software mediante la comparación de los diagnósticos emitidos por el sistema y el criterio de expertos en el área.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE Y LA PRÁCTICA

1.1. Sistemas Expertos Difusos

Los sistemas expertos son parte del conjunto de la inteligencia artificial (IA) que es definida como la facultad de que un procesador lógico emule el razonamiento o funciones que son consideradas como inteligentes del ser humano (Badaró et al., p.3, 2013). La inteligencia artificial es considerada una rama de las ciencias de la computación, la cual, trata de desarrollar diferentes algoritmos que permitan a un sistema percibir, procesar y/o manifestar acciones y conocimientos tal como lo haría un ser humano. Dichos algoritmos han sido desarrollados al nivel de abstracción del pensamiento humano dada la complejidad del cerebro y la funcionalidad limitada de un sistema binario.

Los orígenes de la IA, se remontan a la máquina del científico británico Alan Turing, el cual, desarrolló un sistema capaz de resolver cualquier problema lógico en base a reglas y dio paso a las interrogantes de si las máquinas llegarían a pensar. Entre las propiedades de la IA resaltan, la transparencia y honestidad (FCCyT, 2018). Estas propiedades hacen que la inteligencia artificial tenga la capacidad de generar un resultado independiente de las circunstancias y permita medir la confiabilidad respecto a un criterio de experto o conjunto de ellos.

El propósito principal de la inteligencia artificial es de computarizar el conocimiento de un ser humano (Malagón, 2013). El concepto de inteligencia artificial es muy amplio y, se divide en subáreas para el estudio a profundidad de cada una de ellas, entre, las cuales, las más relevantes al estudio, se encuentra: el aprendizaje computacional o *machine learning* por sus siglas en inglés, las redes neuronales profundas y los sistemas expertos.

Un sistema experto (SE) está basado en el conocimiento humano que interpreta datos de forma similar a lo que realizaría un experto en un área determinada. Según Badaró et al. (2013), los sistemas expertos son programas informáticos capaces de almacenar el conocimiento en un computador para imitar el razonamiento humano

como lo realizaría un experto al resolver un problema. Un SE es aquel programa que utiliza métodos y procesos analíticos, similares al razonamiento humano, para generar salida de información procesada en base a hechos o datos de entrada.

Un sistema experto es aquel que ocupa procesos de tipo inferencial para resolver problemas que requieran que un experto los determine, así facilita y agiliza procesos analíticos. Además, la definición clásica de sistema experto (SE) dada por Díez et al. (2001) y Wormer (2019), es como un programa de computador que contiene la sabiduría de un especialista en un campo de aplicación determinado, para así, disminuir los costos de inversión y sobrellevar el problema de escases de expertos. Es decir, que un SE, se forma a partir de procesos inferenciales, determina la mejor resolución de problemas en áreas específicas para ser un apoyo para el desarrollo de expertos, apoyo en la toma de decisiones de expertos y proporcionar la facilidad de automatizar un proceso de resolución de problemas.

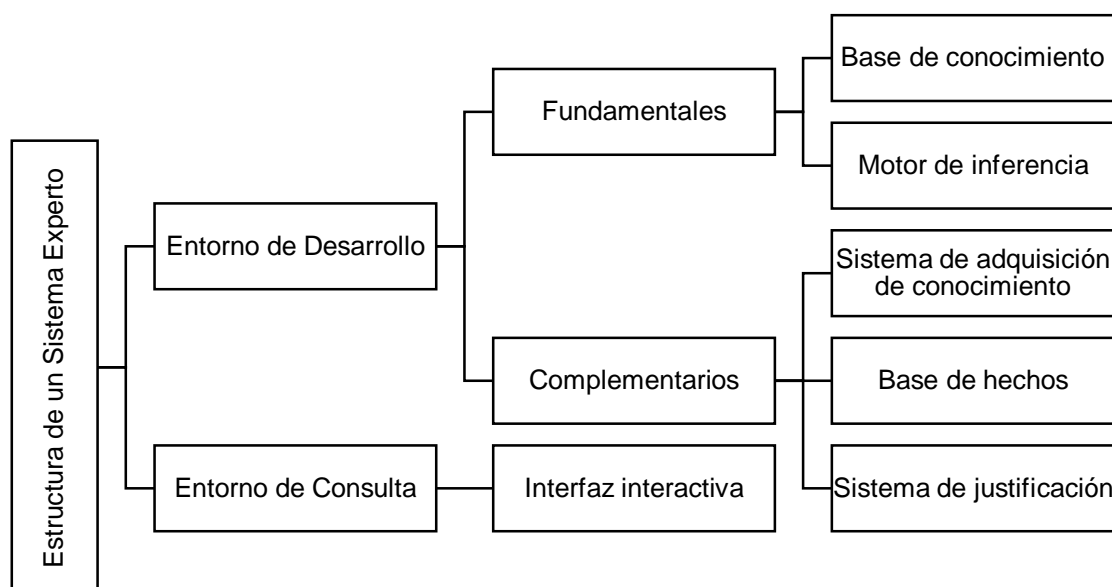
Con base en las definiciones mencionadas anteriormente, un sistema experto tiene algunas características, como: permitir un proceso de búsqueda de información relacionada entre ella y que sea utilizada por el sistema, es decir, que en base a información ingresada por expertos o la búsqueda de información de diferentes fuentes, permita ocupar este conocimiento para el procesamiento de nueva información. Además, permiten simplificar y guiar el proceso de resolución de un problema en un área determinada.

Son interactivos, el usuario ingresa datos fácilmente al sistema y este arrojar una respuesta que sea entendible y entender el razonamiento que lleva a cabo el sistema. Adicionalmente, se contemplan como un apoyo eficiente para los clientes del sistema al simplificar la deducción de información compleja de forma similar a un experto en el dominio de aplicación.

La estructura de un sistema experto, se encuentra basada en dos componentes que son el entorno de desarrollo y el entorno del usuario. Dentro del primer ambiente, se enlistan dos partes, una fundamental y una complementaria. El primer ambiente es dedicado al desarrollador, el cual, es el encargado de generar las

bases de conocimiento en base a los criterios de expertos y la segunda, es empleada por los usuarios finales o no expertos, que se apoyarán en la herramienta para utilizar la salida del sistema en algún beneficio o resolución de problema. La estructura, se detalla, a continuación, en la Figura 1.

Figura 1. Estructura de un Sistema Experto



Fuente: elaboración propia basado en Badaró et al. (2013) y Martínez (2011)

En consideración a lo explicado por ambos autores, se plantea una estructura combinada donde, se separan los entornos y dentro del desarrollo las partes fundamentales y complementarias de un sistema experto, esto permite la generación estructurada y organizada de la estructura de un sistema experto para detallar cada uno de sus componentes. A continuación, se explican cada una de las unidades de los SE:

La base de conocimiento es definida como la acumulación de los conocimientos mínimos necesarios para resolver problemas determinados en un campo específico. Contiene dos partes esenciales, la heurística especial y un conjunto de reglas que guían el empleo del conocimiento en un dominio de aplicación. La heurística es definida por Puig (2009), como la forma de que los humanos amplían el conocimiento y es de tipo especial, requiere un conocimiento en particular de un ámbito.

El motor de inferencia es la parte esencial de un sistema experto que es conocida, además, como el interpretador o cerebro. Es conceptualizada como la parte del sistema que contiene algoritmos para la emulación del razonamiento humano y así controlar y dirigir los procesos de interpretación de nuevos datos de entrada para la producción de una salida de información. Contiene tres elementos principales detallados en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Elementos del Motor de Inferencia

Elemento	Descripción
Intérprete	Es el encargado de ejecutar una consulta determinada
Programador	Continúa el proceso de control sobre la consulta
Control de asistencia	Pretende mantener el control sobre las consultas realizadas

Fuente: elaboración propia basada en Badaró et al. (2013)

El sistema de adquisición del conocimiento es el componente encargado de transformar la experiencia del conocimiento humano para ser abstraído en un sistema computacional y construir la base del conocimiento. Este proceso requiere de los criterios de expertos en el área conjunto con el desarrollador del sistema para lograr la codificación del conocimiento.

Este proceso lleva a cabo mediante la programación manual o sistemática, que depende de la complejidad del ámbito de aplicación y la forma de los expertos para el desarrollo de la adquisición del conocimiento. Además, contempla la criticidad del sistema desarrollado al permitir o prohibir la modificación del conocimiento generado dada la variabilidad de los resultados que causa la alteración de las reglas aquí descritas.

La base de hechos es definida por Badaró et al. (2013) como: “una memoria de trabajo que contiene los hechos sobre un problema, alberga los datos propios correspondientes a los problemas, que se desean tratar.” (p.354). Este componente es el, que se encarga de almacenar los datos específicos para la resolución de un problema particular y guía al intérprete del sistema experto en la resolución de un problema. Sus parámetros son definidos por el desarrollador en base al área

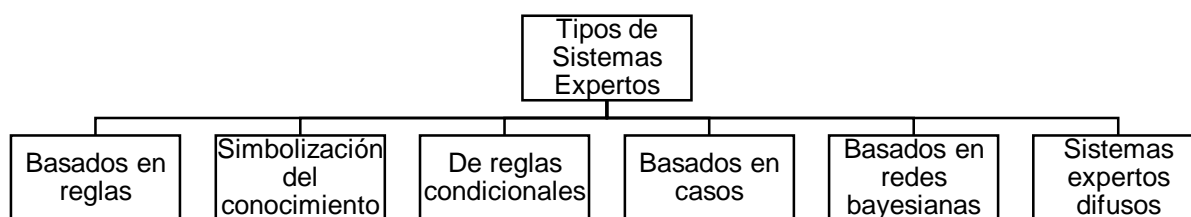
específica de aplicación, la modificación de este, se considera una expansión del sistema una vez, se encuentre en el ámbito de producción.

El sistema de justificación es el factor encargado de explicar al usuario del sistema el razonamiento que sigue en el proceso para llevar a cabo el proceso de resolución de un problema. Detalla las acciones del sistema, lo cual, es favorable para un no experto en la formación de conocimiento en un área determinada. La implementación depende de los fines para, los cuales, se desarrolla el sistema, por lo que, está presente de forma generalizada o detallada según un tipo de usuario o el fin del desarrollo.

La interfaz de usuario es la parte del programa que permite la interacción de no expertos con el fin de apoyarse en el sistema para la resolución de un problema en específico. Esta interfaz es interactiva y fácil de usar para el usuario de manera que aumente la eficiencia y rendimiento del ámbito de aplicación. La interfaz de usuario tiene como propósito el de simplificar el uso de un programa informático de forma que facilite las tareas y el usuario alcance el objetivo planteado de una forma más eficiente (Lozano et al., p.1, 2006). Una interfaz de usuario es de tipo línea de comandos o interfaz gráfica que depende del ámbito de aplicación.

Los sistemas expertos son de amplia aplicación y conforme la evolución de las tecnologías de la información y la comunicación han surgido diferentes tipos de sistemas. La diferencia principal entre los sistemas expertos radica principalmente en la forma de adquisición del conocimiento, la forma de emulación del razonamiento y la interpretación de los datos. Uno de los principales retos de los sistemas expertos radica en la manera, en la cual, el conocimiento es sistematizado, dado que, el lenguaje natural para un experto resulta muy confuso y amplio para un sistema lógico binario (Cardona et al., p.2, 2007). Los de mayor relevancia, se detallan en la figura 2.

Figura 2. Tipos de Sistemas Expertos



Fuente: elaboración propia

Un sistema experto basado en reglas es aquel que el motor de inferencia aplica reglas basadas en hechos para encontrar una solución a un problema sin la necesidad de que un experto lo guíe (Robles, p.27, 2013). En cuanto que un sistema de simbolización del conocimiento no es definido formalmente dada la amplitud de las formas de representación de la inteligencia artificial y depende de la aplicación. Un SE basado en casos funciona de forma que encuentra una solución basada en un problema anterior tal como lo haría un humano en ciertos ámbitos como, por ejemplo, lo legal.

El sistema basado en redes bayesianas, se basa en las relaciones probabilísticas para determinar una causa probable. Por último, el sistema experto difuso, se basa en la lógica difusa para trabajar con grados de incertidumbre, lo que permite a un sistema binario mediante modelos matemáticos emular el razonamiento humano natural, con el fin de procesar datos de una forma menos exacta (Badaró et al., p.356, 2013). La presente investigación hace uso del sistema experto difuso, dado que, los resultados de los análisis de las propiedades del aceite dieléctrico están definidas por normativa, sin embargo, no permite que resultados, que se encuentran por debajo o sobre la normativa sean correctamente analizados.

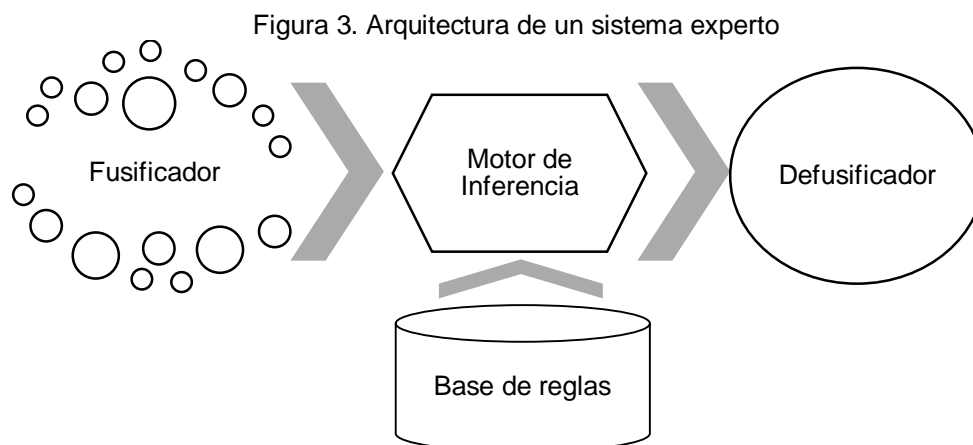
Un sistema experto difuso usa la lógica difusa para modelar algoritmos no lineales en base a variables lingüísticas o numéricas imprecisas, que posteriormente, se transformarán en una sola salida procesada. La lógica difusa, también, llamada lógica borrosa o *fuzzy logic* es definida por Rueda (2010) como la lógica que emplea expresiones que comprendidas en el rango entre lo totalmente verdadero o completamente falso.

Además, Almache (2013), define a este tipo de lógica como: “un conjunto de principios matemáticos basados en grados de membresía o pertenencia, cuya función es modelar información”. En base a estos conceptos de autores, la lógica difusa es un modelo matemático no lineal que permite interpretar información imprecisa con el fin de componer conocimiento en un sistema computacional.

La lógica difusa, se encuentra fundamentada en las reglas condicionales y los valores de entrada con sus conjuntos de pertenencia (Hurtado & Manco, 2007). Así la lógica difusa, no se encuentra limitada a 0 y 1, a través del uso de los rangos de pertenencia permite asignar valores entre dicho intervalo. La lógica difusa es esencialmente la que permite definir múltiples valores entre un rango y representarlas con un grado de afinidad a un conjunto de estado llamado grado de pertenencia.

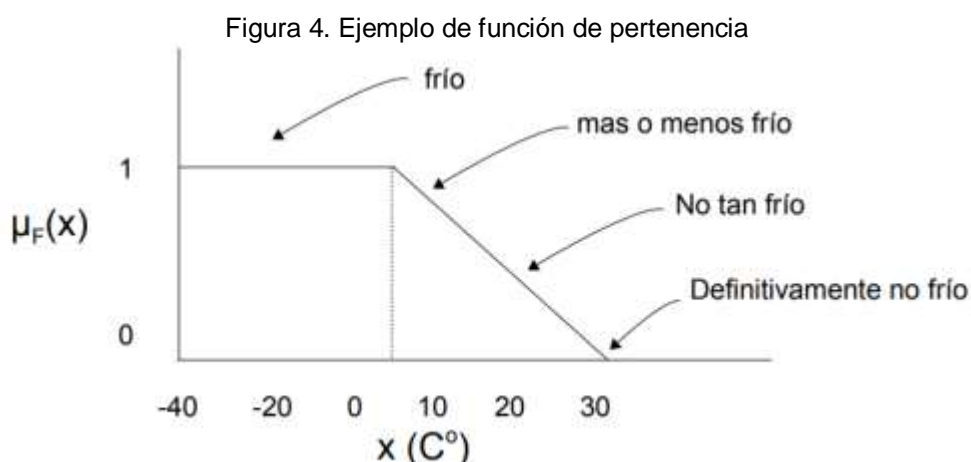
La arquitectura de un sistema experto basada en lógica difusa, se aprecia en la figura 3. El primer componente es el fusificador encargado de convertir las variables lingüísticas o numéricas imprecisas en un conjunto difuso, a través de conjuntos difusos y funciones de membresía. El segundo componente posterior al procesamiento del fusificador, es llevado a cabo por el motor de inferencia, el cual, examina las reglas de la base del conocimiento y, se encarga de activar las que resulten pertinentes para resolver las entradas del fusificador.

Posterior, el defusificador, se encarga de convertir la salida del motor de inferencia en una variable lingüística o numérica para que esta represente el conocimiento de un experto, en el cual, se involucran métodos matemáticos como promedios, centroides, entre otros.



Fuente: elaboración propia

Dentro del proceso de fuzzificación, el grado de pertenencia es una generalización de los conjuntos clásicos, dado que una entrada contempla si pertenece a un conjunto determinado. Este grado es definido mediante funciones asociadas dependientes del área de aplicación. Las funciones del grado determinan la membresía de un elemento de un atributo que oscila entre un valor de 0 hasta 1 (Coyaso & Vermonden, 2015). En la figura 4, se ejemplifica los conceptos mencionados. El valor calculado por la función $\mu_F(x)$ representa el grado en el que un determinado elemento pertenece a dicha función (Vidal, 2014). Un *set* difuso es la representación más aproximada del conocimiento humano, mientras que el grado de pertenencia representa el valor numérico dado un set y la función de membresía es la encargada de ubicar el grado de valor dado un elemento de entrada y una función.

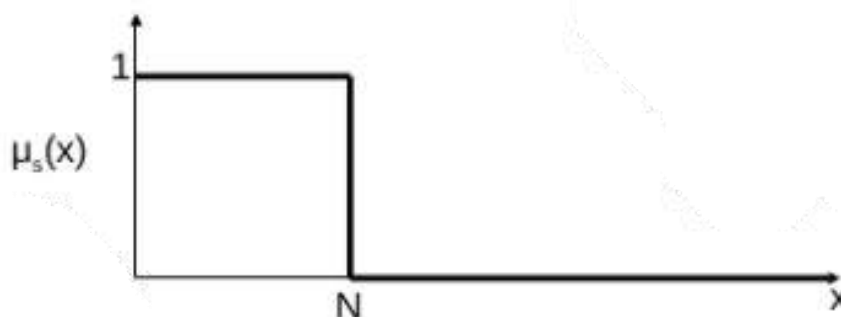


Fuente: tomado a partir de Vidal (2014)

Se aprecia que la lógica difusa permite asignar un valor de pertenencia dado el ejemplo de la temperatura en la figura 4, donde los valores lingüísticos son definidos por no expertos y los expertos determinan una función de membresía basados en la temperatura y el criterio. Es así como el grado de pertenencia de la temperatura, se transforma en una variable comprendida entre el rango de 0 y 1 para ser procesado por un sistema experto y determinar en un proceso posterior a que correspondería otro valor diferente ingresado por un no experto.

A comparación de la lógica clásica, comprende dos únicos valores absolutos donde un elemento pertenece o no pertenece a un único conjunto, como se aprecia en la figura 5, dado un elemento x la función de la lógica clásica asigna la pertenencia o exclusión del conjunto. Por esta razón, se generan diferentes tipos de sets difusos que permiten modelar de una forma más aproximada las formas de conocimiento humano y la aplicación en áreas específicas basados en las entradas y sus posibles valores en representación del análisis de cada campo.

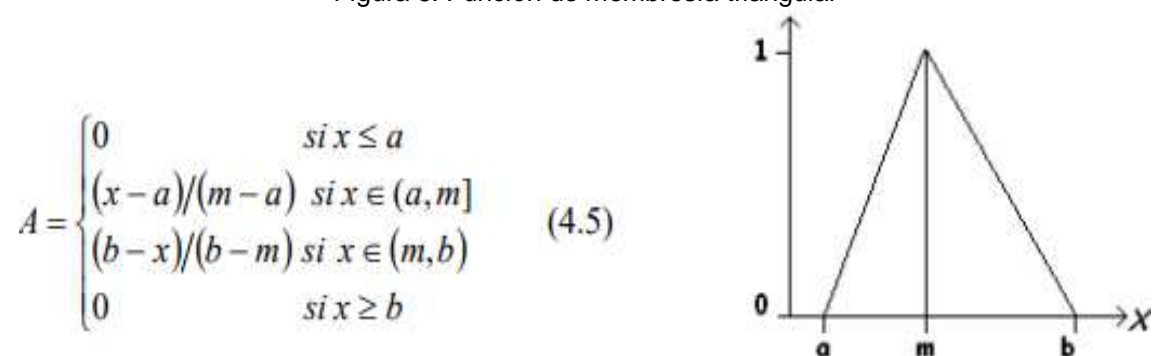
Figura 5. Función de membresía de la lógica clásica



Fuente: tomado a partir de Vidal (2014)

Las funciones de membresía más relevantes al estudio y, que se han desarrollado con mayor profundidad son la triangular (figura 6), la función *gamma*, sigmoideal, *Gaussiana* y la función trapezoidal (figura 7). La aplicación de cada función es determinada por el desarrollador y el experto para adecuar a la representación del conocimiento en base al área de aplicación. Se detallan las funciones triangulares y trapezoidales, dado que, en el área de aplicación del diagnóstico del aceite dieléctrico los límites de las variables, se definirían dentro de estos límites de las funciones.

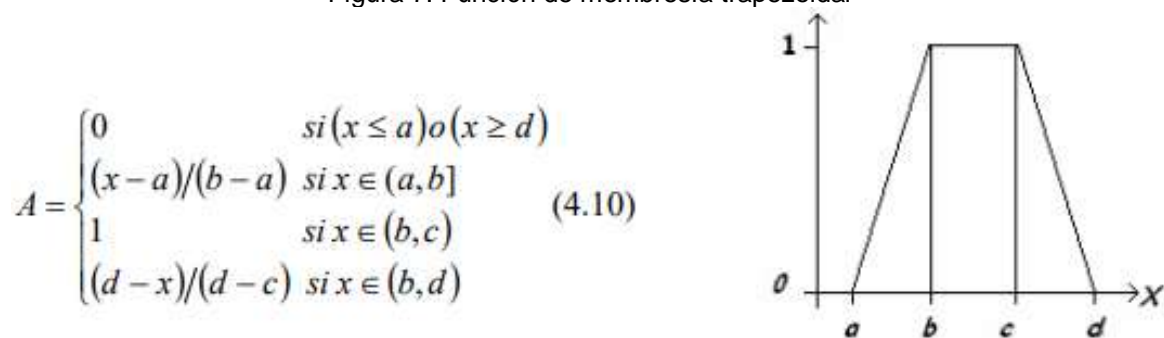
Figura 6. Función de membresía triangular



Fuente: tomado a partir de Salvador (2006)

La función de membresía triangular 3 es definida por límites inferior (a), superior (b) y valor modal (m), el cual, es calculado en función de la variable de entrada al proceso de fuzzificación. Esta función permite el ingreso de límites de variables donde, se contienen dos límites definidos y el valor modal depende del criterio donde el que tiene mayor frecuencia es seleccionado por el criterio de un experto en base a la experiencia que tenga y valide el valor con estudios o ensayos realizados.

Figura 7. Función de membresía trapezoidal



Fuente: tomado a partir de Salvador (2006)

En la función de membresía trapezoidal, se encuentran cuatro límites, el inferior (a), un soporte inferior (b), un soporte superior (c) y uno superior (d). Existen variantes del modelo, los cuales, son el abierto por izquierda donde, se carece de límite inferior, o a la vez que el límite inferior el soporte coincida. De igual manera, existen aquellos abiertos por la derecha, caso en el que, no se cuente con un límite superior o coincida con el soporte. Esta función permite ampliar el criterio de aceptación de un campo con una mayor amplitud al contar con dos soportes

superiores, en oposición a la función triangular que solo cuenta con un punto superior de apoyo.

En las figuras anteriores cada función determina el grado de pertenencia de un valor de entrada y entrega este al motor de inferencia para que sea analizado y procesado en base a reglas. La selección de las funciones depende del modelo a desarrollar y las variables a ser procesadas. En la presente investigación, se seleccionan las funciones triangular y trapezoidal, los criterios del sistema experto para un índice de salud de transformadores provienen del análisis clásico mediante el uso de la normativa y el criterio del estudio de Abu-Elanien et al. (2012) y Cerón, Echeverry, et al. (2015), que se detallan en el desarrollo del siguiente epígrafe.

Como antecedente de la investigación, en el artículo publicado en Chile por Ponce et al. (2019), se hace uso de la lógica difusa para determinar realizar un control sobre el cromado de piezas en el campo de aplicación de la industria del cromado, donde se encuentra que el modelo difuso mediante funciones triangulares y trapezoidales representaron de forma correcta el proceso de cromado duro. Además, se explica que el proceso permite reducir costos y disminuir la incertidumbre en la selección de los parámetros manualmente. El error promedio del proceso es inferior al 10% y es representativo a un experto humano.

En la publicación de López et al. (2017) de Colombia, en el campo de aplicación de la educación, se desarrolla un sistema experto difuso para determinar el capital humano, lo relevante al presente estudio, se encuentra en la recomendación de valorar y mejorar el sistema en base al criterio de múltiples expertos para reducir el error. Además, se propone realizar un modelo de sistema a partir de datos reales y compararlo con otras métricas con el fin de mejorar el modelo.

En el proyecto de investigación de Minchala & Adrián (2017), se presenta el desarrollo de un índice de consecuencia de falla final de transformadores de potencia mediante el empleo de un sistema difuso, donde se aprecia que el método Delphi es empleado para la obtención del conocimiento de los expertos. Además, los resultados del sistema experto concuerdan con el criterio de los expertos lo que

permite, que se tomen decisiones de forma oportuna sobre los activos mencionados en el artículo. Como recomendación el autor sugiere el diseño de una aplicación que permita gestionar los activos y obtener un diagnóstico fácil de interpretar y categorizar.

La publicación de Abu-Elanien et al (2012), propone un método para el cálculo de un índice de salud de transformadores de menos de 69000 voltios mediante técnicas de lógica difusa. El estudio es de alta relevancia a la presente investigación dado que el autor reúne 33 reglas expertas basadas en la empresa "AMHA", dedicada a la consultoría en gestión de activos y evaluación de índices de salud que reúne el criterio de múltiples expertos en el área y los evalúa en 30 transformadores para generar un índice comparable por el sistema y la empresa. Además, contiene las bases de las funciones de membresía para el tipo de transformador mencionado en torno a 6 variables que son: contenido de humedad, acidez, rigidez dieléctrica, factor de disipación, total de gases combustibles, contenido de furfural y la salida del índice de salud.

Los resultados obtenidos por el modelo difuso de Abu-Elanien et al (2012), concluyó una similitud del 96.7% con los índices de la empresa "AMHA", lo que permite el uso del índice y modelo para las empresas, sin embargo, no existe una aplicación que facilite el uso del modelo y, que se aplique a otra clase de voltaje.

El estudio del grupo de investigación GRALTA y el instituto de energía eléctrica (IEE-UNSJ-CONICET) publicado en Colombia por Cerón, Echeverry, et al. (2015), desarrolla un modelo de lógica difusa para determinar un índice de salud en transformadores de potencia inmersos en aceite mineral para voltajes comprendidos entre 69000 y 230000 voltios, basados en la investigación de Abu-Elanien et al (2012) y la normativa del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) en el campo de aplicación pertinente.

En el estudio, se desarrollan 6 funciones de membresía y como resultado, se encuentra que el modelo difuso permite categorizar y priorizar la atención en

función de la condición. Se menciona, además, que es necesario disponer de un registro histórico de pruebas que permitan validar y evaluar la evolución del índice de salud para aumentar la fiabilidad del modelo. No obstante, no se desarrolla una aplicación que facilite el uso del modelo ni un sistema que permita el registro de datos histórico.

Con base en las investigaciones mencionadas, se determina que existen múltiples ámbitos, donde se han desarrollado sistemas expertos difusos y sus resultados han sido de gran apoyo para los expertos y no expertos. En el área del campo de aplicación de la presente investigación existen desarrollos de modelos en la mayoría en *Matlab*, sin embargo, no se cuenta con una interfaz que permita el ingreso fácil de los resultados ni el registro histórico de los mismos.

En el contexto nacional dentro ámbito de aplicación mencionado existe un estudio del análisis de gases de transformadores, no obstante, no se integran otros resultados de las propiedades del aceite y no existe una aplicación que facilite el uso.

1.2. Índice de Salud de Transformadores

Para contextualizar las variables eléctricas básicas usadas durante el presente epígrafe, se define al voltaje como la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos o conductores, medida en unidades de voltios (V) y el múltiplo común el kilovoltio (kV). Además, de la corriente eléctrica descrita como el desplazamiento de electrones en un conductor, medida en unidades de amperios (A). La potencia eléctrica o potencia activa es la magnitud definida por Hernández (2016) como: “la rapidez con la, que se realiza un trabajo o gasta energía” (p.82).

La unidad es el vatio o watio (W) y el múltiplo común el kilovatio (kW) o megavatio (MW). Por último, dentro de las unidades de potencia, se encuentra a la potencia aparente y a la potencia reactiva que surgen por las propiedades de las cargas, la primera es la potencia real del consumo de un circuito de potencia medida en voltamperios (VA) y el múltiplo común el kilovoltamperio (kVA). Donde la potencia

activa la potencia real, que se transforma en trabajo y la potencia reactiva la requerida por equipos para la operación.

El transformador es uno de los componentes esenciales dentro del suministro eléctrico del mundo, se encarga de conectar sistemas de energía y entregarlo a los consumidores (Rexhepi, 2017). El transformador eléctrico de potencia según Rodríguez (2012) es una máquina estática que como el nombre lo indica cambia los valores de tensión y corriente en un sistema. Del mismo modo, Álvarez (2009), menciona que el transformador es un dispositivo que permite variar la potencia en función de la modificación de tensión y corriente. En base a los autores, un transformador eléctrico de potencia, se considera como un dispositivo estático que modifica los valores de tensión y corriente en un sistema a través de los principios de inducción electromagnética.

El funcionamiento de un transformador, desde un enfoque práctico, es el de inducir un campo electromagnético mediante bobinados en un núcleo, que se convierte en el medio de transporte de esta energía hacia otro devanado de diferente dimensión, el cual, es inducido por el campo del núcleo y produce una salida proporcional de acuerdo con el diseño. Tiene como objetivo principal el variar el voltaje y mantener la potencia, con la consecuente reducción o aumento de la corriente, para permitir transportar grandes cantidades de energía desde los centros de generación a distancias largas y de forma inversa ser ocupados por los consumidores en los puntos de llegada. Este proceso de transformación es necesario dada las pérdidas inherentes de los materiales de conductores y otros fenómenos físicos involucrados en los sistemas de transmisión, donde es eficiente el transporte de potencia a un mayor voltaje para reducir la corriente sobre los conductores y así convertir a las pérdidas menos considerables en el sistema.

El transformador tiene un rol fundamental en el transporte de grandes cantidades de potencia a largas distancias desde las centrales de generación hacia los distintos consumidores en etapas de transformación y transmisión. Además, es uno de los elementos más caros de un sistema de potencia, lo que, convierte al estado del equipo en un objetivo primordial de estudio para garantizar la disponibilidad,

fiabilidad y seguridad de todo sistema de distribución eléctrico. El diagnóstico a tiempo permite evitar la salida de los activos, lo que reduce costos por inoperatividad o reparaciones.

Los problemas principales de forma general de un transformador residen en el calentamiento y aislamiento de los componentes internos del mismo en orden de importancia las bobinas, el núcleo, los aisladores, entre otros. El estudio de Arévalo & Espinoza (2020), concluye que las causas principales del envejecimiento del transformador son los cambios físicos como la temperatura o la degradación del medio aislante. Los transformadores son diseñados para el uso continuo ininterrumpido, sin embargo, los factores como los tipos de cargas conectadas, el ambiente de trabajo, entre otros causan la degradación inevitable de sus componentes.

Los transformadores eléctricos por la amplitud de uso, se clasifican según los múltiples aspectos como: operación, función, número de fases, construcción, tipos de refrigeración, entre otros (Pérez, 2020). Dentro del grupo de operación, se encuentran los transformadores eléctricos de potencia y distribución, el primero, se caracteriza por potencias elevadas sobre 500 kVA. Los segundos son de menor potencia a la mencionada anteriormente y la tensión empleada máxima es hasta de 69 kV. Para la investigación es de importancia la clasificación según el aislamiento y medio de enfriamiento del transformador, donde se encuentran los de tipo seco que a la vez tienen como medio el aire o en resina epóxica y los sumergidos en líquidos aislantes (Díaz, 2020).

Los transformadores secos aislados en aire, sus componentes, se encuentran directamente en contacto con el ambiente. Este tipo de aislamiento – enfriamiento disminuye los costos de construcción, sin embargo, en niveles de trabajo de voltaje considerados media y alta tensión, dificulta su diseño y no es adecuado para todo tipo de instalación, además, de que la exposición directa de los componentes genera un mayor riesgo de contacto a agentes ambientales contaminantes y conlleva a una menor vida útil (Correa, 2012). Un transformador de tipo seco en aire requiere de un mantenimiento recurrente, y por sus características dificulta su

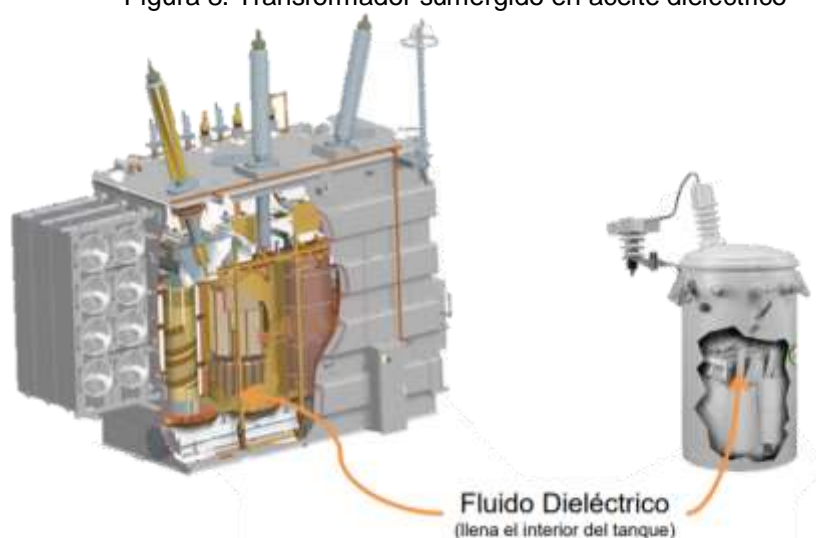
conservación. Además, que su uso en sistemas de potencia es muy poco recurrente.

Los transformadores secos aislados en resina, sus elementos constituyentes son encapsulados en resina, por lo que por sus propiedades causan un aumento en los niveles de aislamiento, posee valores elevados de resistencia al fuego y evita el contacto con agentes contaminantes, por ende, disminuye su frecuencia de mantenimiento. Su costo es significativamente superior, y no forman parte de un esquema de distribución común en referencia a los datos proporcionados por el Sistema Único de Información Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano (SISDAT, 2021).

Los transformadores sumergidos en líquidos aislantes constan, además, de los elementos de un transformador convencional de una cuba para contener el medio de refrigeración y aislamiento líquido (figura 8). Los líquidos empleados son generalmente el aceite dieléctrico mineral o vegetal, compuestos sintéticos bajo nombres comerciales de askarel y pyranol y siliconas. Los diferentes líquidos en mención han evolucionado en su composición con el fin de mejorar sus propiedades aislantes, químicas y ambientales, es por ello, que hoy en día dado los factores contaminantes irreversibles causados por el contenido de bifenilo policlorado (PCB) en los líquidos sintéticos, se encuentran prohibidos.

El tipo de transformador sumergido en aceite dieléctrico ya sea mineral, vegetal o siliconado, es el más común hoy en día dado el hecho de que el aceite posee características refrigerantes, previene la corrosión de las partes metálicas y evita la absorción de humedad en otros componentes, adicionalmente su costo es relativamente bajo. (Marchesan & Fanchin, 2010). No obstante, requiere de constante supervisión de su estado para mantener un nivel óptimo operacional.

Figura 8. Transformador sumergido en aceite dieléctrico



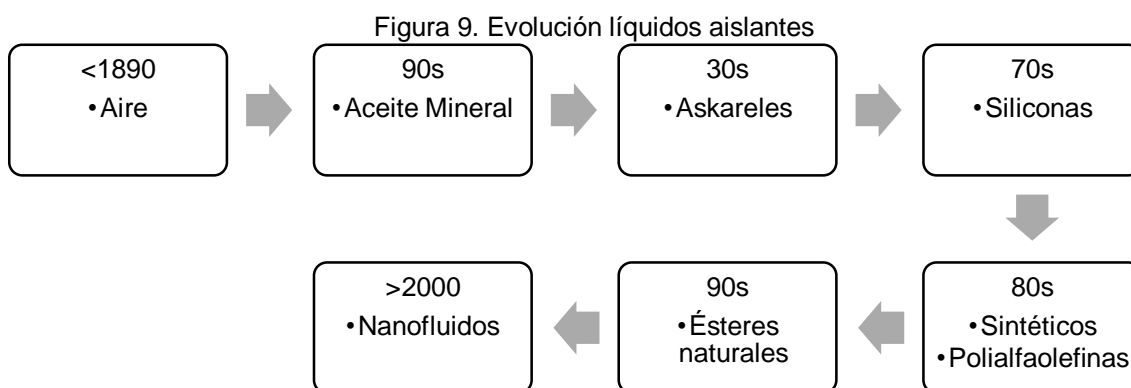
Fuente: modificado a partir de (Cargill, 2016)

Alrededor de 1885, se crea el primer transformador sumergido en aceite por parte del ingeniero Braun, director de la fábrica de Oerlikon (CANAME, 2011). Después, de casi una década empieza la comercialización formal de este tipo de transformador que utiliza un derivado del petróleo como su medio de enfriamiento y aislamiento, cuyo contenido era parafinas, naftas, carbono e hidrógeno (Contreras, 2013). Este resultado es uno de los primeros aceites minerales, que se emplearon varias décadas.

Posterior, por problemas de incendios, se desarrolla alrededor de los años 30s, un aceite con mejor resistencia ignífuga, lo que dio paso a los askareles. No obstante, alrededor de los años 70s, la producción y comercialización de este tipo de aceite fue suspendido por el contenido de Bifenilos Policlorados (PCB), su grado de toxicidad y consecuentes problemas de salud y ambientales eran considerables (Nwinyi, 2011).

A partir de los años 80, como reemplazo de los askareles surgen aceites siliconados, compuestos sintéticos y otros derivados de hidrocarburos. Para los años 90, se crean ésteres de origen vegetal por medidas de protección ambiental ante derrames (Contreras, 2013). En las últimas décadas, con el crecimiento exponencial de la tecnología, surgen otro tipo de fluidos basados en nanotecnología principalmente para la mejora de las propiedades aislantes, térmicas y amigables

con el ambiente, sin embargo, no se encuentra plenamente desarrollada ni utilizada. En la figura 9, se resume la evolución de los líquidos aislantes.



Fuente: modificado a partir de (Contreras, 2013)

El aceite dieléctrico mineral de base nafténica, es el compuesto más usado por más de un siglo por sus características, el cual, está compuesto de hidrocarburos isoparafínicos, nafténicos y aromáticos, con cadenas entre 18 a 22 átomos de carbono obtenida por la destilación y refinación del petróleo (Gallo, 2005). Este líquido tiene como objetivos: mejorar el aislamiento eléctrico, actuar como refrigerante, proteger los elementos del transformador y evitar procesos de oxidación.

Al no cumplir con estos objetivos es necesario el mantenimiento de este para restaurar la operación fiable del equipo. Cada compuesto dentro del aceite mineral tiene como función específica aportar al cumplimiento de los parámetros mencionados, las isoparafinas facilitan la convección, forman menos gases y resisten mejor los procesos de oxidación. Las cicloparafinas, mejoran el punto de expansión y tienen mejor respuesta ante descargas eléctricas y por último los hidrocarburos aromáticos, cumple la función principal de ser un inhibidor natural.

El aceite aislante tiene como funciones principales en el transformador el ser un refrigerante y un aislante eléctrico (Tamayo, p.12, 2017). Estas funciones son primordiales, la primera dado que los elementos del transformador producen calor, el cual, es no deseable en la operación de este porque limita su capacidad operativa y en exceso causaría combustión. Además, la temperatura de trabajo es una

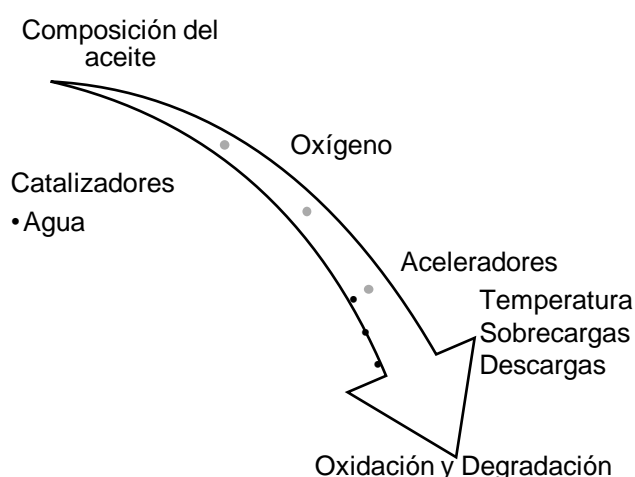
variable que cambia las propiedades de los elementos como el aceite, el papel aislante, los conductores, entre otros.

La función dieléctrica, de igual manera, es esencial dado los niveles de voltaje de trabajo a, los cuales, se someten estos equipos y una falla en el aislamiento produce daños graves al equipo en especial a sus devanados. Los cambios drásticos en las variables de temperatura y humedad afectan significativamente la vida útil del equipo y aceleran los procesos de degradación de los componentes.

El deterioro del aceite aislante es causado por el proceso de degradación progresiva que depende de la composición del aceite, contenido de catalizadores y los factores de trabajo. En la figura 10, se aprecian los factores básicos del proceso de deterioro.

El proceso de deterioro es un proceso químico en el que los componentes, que se encuentran dentro del aceite conjuntos con otros factores dan paso a los procesos de oxidación, lo que forma compuestos no deseables dentro del equipo lo que afecta significativamente las condiciones de operación y, se convierte sensible a sufrir fallas graves.

Figura 10. Factores del deterioro del aceite



Fuente: modificado a partir de (Gallo, 2005)

El mantenimiento preventivo de un transformador es aquel, que se realiza de forma periódica antes de que aparezcan fallas (Rivera & Sucozhañay, 2016). Precisa de obtener información sobre el estado actual para realizar un diagnóstico y seguimiento. Dentro del mantenimiento preventivo, se crean programas de monitoreo del aceite dieléctrico por su naturaleza que al estar disperso en todos los elementos del transformador y relacionar las reacciones de este con otros componentes como el papel y los devanados, se crean procedimientos de pruebas eléctricas y químicas para el aceite dieléctrico.

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) estandarizan los procedimientos de pruebas y crean procedimientos tanto para la determinación de las propiedades relevantes del aceite y las sugerencias correctivas en el mantenimiento.

La norma ASTM D117 proporciona 55 métodos de prueba para los aceites aislantes minerales para la determinación de 33 propiedades. Por consenso internacional, se toman 8 medidas consideradas las más relevantes que determinan el estado de degradación del aceite. Además, la norma ASTM D3612, establece los métodos de análisis de los gases disueltos en el aceite dieléctrico. La Guía de la IEEE C57.106 provee de una guía para los criterios en base a las pruebas de aceptación.

Existen, además, otras normativas y guías de los institutos mencionados que son relevantes para la determinación y parámetros de las propiedades físicas y químicas del aceite como: Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE), Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), además, de empresas dedicadas al estudio de transformadores como S.D.Myers. Estos datos proporcionados por las guías, que se mencionan en el libro de (Gallo, 2005), no se analiza de forma unitaria para tomar una decisión.

El índice de salud de transformadores es un concepto nuevo, que se emplea para la gestión de los transformadores como activos, el cual, es un indicador del estado general del transformador a través de la combinación de los resultados de las pruebas de diagnóstico. Comprende un rango entre 0 y 1, el cero representa un

equipo en perfectas condiciones mientras que uno para un transformador deteriorado. Para Cerón, et al. (2015) el propósito del índice de salud es proporcionar un indicador medible que represente el estado global del transformador. Adicionalmente, Párraga (2019), menciona que el índice representan de forma cuantitativa y global los parámetros que afectan al envejecimiento y operación del transformador. Con base en los autores, el índice de salud es un indicador numérico del estado integrado del transformador que permite categorizarlo y evaluar su deterioro, a través, de la combinación de los resultados de las pruebas de diagnóstico.

En la publicación de Ortiz et al. (2016), se especifica un método lineal para la determinación de un índice de salud basado en la asignación de pesos a las variables de los diferentes diagnósticos. Se realiza la prueba a 52 transformadores con la conclusión de que los dos índices calculados si representan factores globales en determinadas áreas o funciones, sin embargo, no son capaces de combinarse para mostrar un índice general total del transformador por su variación lineal de pesos.

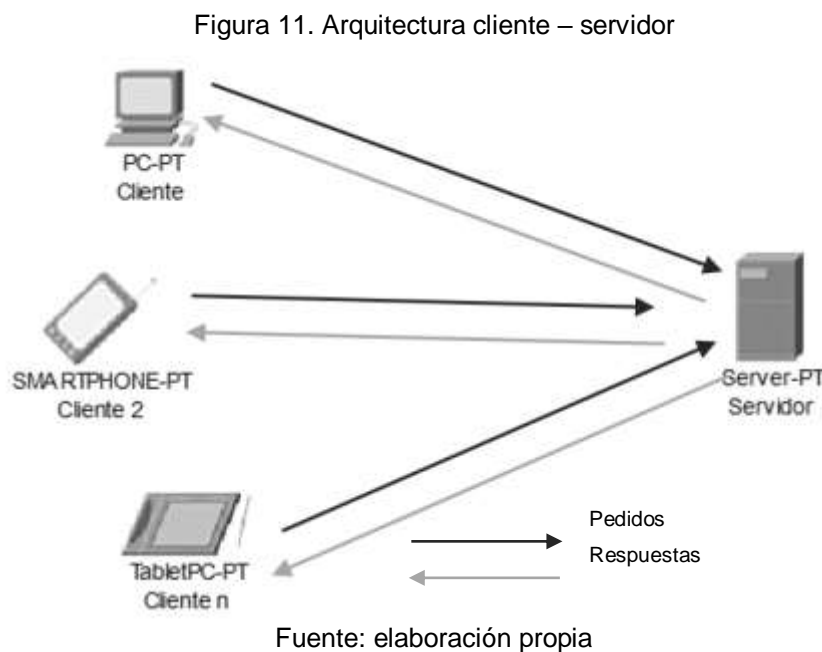
Adicionalmente en la investigación de Goff (2019), se presenta metodologías similares en base a la importancia que da el autor a los parámetros. Por último, en el estudio de Gorgan et al. (2010), el índice de salud toma en cuenta otras variables para el cálculo a través de la combinación lineal. Es de importancia que el índice de salud, se especifica que trata de representar una condición general del transformador y, se tomen los elementos más representativos del diagnóstico y combinarlos para generar un estado a criterio de los expertos conjunto con el desarrollador.

1.3. Desarrollo de un Sistema Experto Difuso

La aplicación tiene como estructura el modelo cliente-servidor, dado que, requiere un procesamiento de datos en el sistema experto ubicado en el servidor y presentarlo en el cliente una vez procesado. El modelo de servicios, es la abstracción de todos los procedimientos, reglas y relaciones entre todas las partes

de una aplicación (Marini, 2012). El modelo cliente-servidor, permite el desarrollo de la aplicación y su entendimiento posterior sobre lo que realiza la aplicación. Se establecen tres grupos dentro del modelo que son: lógica de presentación, lógica de negocio y lógica de datos.

Una aplicación web, se distingue de una página web por el hecho de que el usuario interactúa con la interfaz y que en base a datos ingresados por el usuario, este produzca una salida procesada de información, es decir, mediante el uso de las distintas lógicas (Vergara, p.1, 2011). Permite la interacción del usuario con los diferentes procesos del servidor que cumplen un fin específico para, la cual, el usuario usa la aplicación tal como en la figura 11.



La lógica de presentación, se encarga de todo lo relacionado a los procesos de interacción del usuario con la aplicación (Marini, 2012). Al igual que la empresa Java (2015) la define como: “Actividades que crean una página en una aplicación. Entre ellas, se incluyen el procesamiento de una solicitud, la generación de contenido de respuesta y la dotación de formato a la página para el cliente” (p.1).

Presenta la información al usuario y este interactúa a través del ingreso de datos, su ejecución es lo más independiente y transparente de la lógica del negocio, es

decir, de los procesos, que se llevan para el procesamiento de datos. En esta capa, se presentan todos los procesos que realiza el usuario independiente del servidor, al lograr la separación de estos procesos, la interfaz de usuario, se inmuniza a los cambios de los procedimientos de las organizaciones así, se facilita la integración de cambios en los procesos.

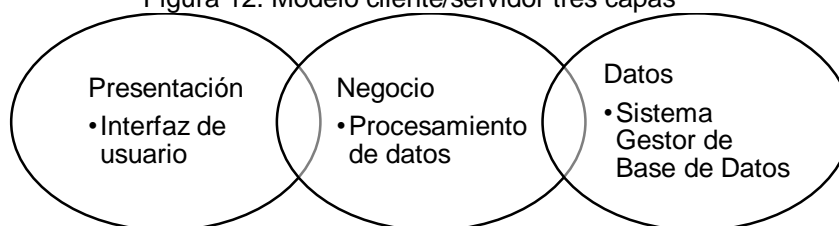
La lógica del negocio son todos los procesos, que se ejecutan en el o los servidores para procesar los datos y entregar un resultado (Marini, 2012). Al emplear esta lógica, se manejan cambios rápidos en la infraestructura sin generar cambios sobre la presentación (UVA, 2006). La información arrojada por la lógica de negocio es información útil para el usuario mediante la aplicación de algoritmos y reglas, además, de gestionar eficientemente la transformación de datos.

Proporciona ventajas como: la flexibilidad de los cambios y la estructura de la lógica, separar las operaciones de las interfaces y sus reglas, facilitar el mantenimiento de la lógica y mantener los servicios constantes ante futuros cambios. Es de importancia que este nivel permite adecuarse a la infraestructura y lógica de un negocio en permanente cambio en requerimiento de sus necesidades.

La lógica del negocio de datos es la gestión del almacenamiento de datos que abarca desde el mantenimiento, integridad y las transacciones sobre los mismos. Es definida como un modelo que carece de especificación de una base de datos, que se encarga de la recopilación de estos y las relaciones entre aspectos (IBM, 2021). Comúnmente estos objetivos son alcanzados mediante la utilización de sistemas gestores de base de datos (SGBD) entre los más comunes, se encuentra: SQL Server, PostgreSQL, Oracle, MySQL, MariaDB, entre otros.

Modelo Cliente/Servidor multicapa, son aquellos modelos que distinguen tres tipos de capas definidas, los cuales, contienen a la lógica de presentación, los servidores de procesamiento de datos y los servidores de base de datos. Es relevante al estudio el modelo de tres capas dada la inclusión dentro de la lógica de negocio la relación con el sistema experto y la separación de los datos y su manejo con un SGBD como, se aprecia en la figura 12.

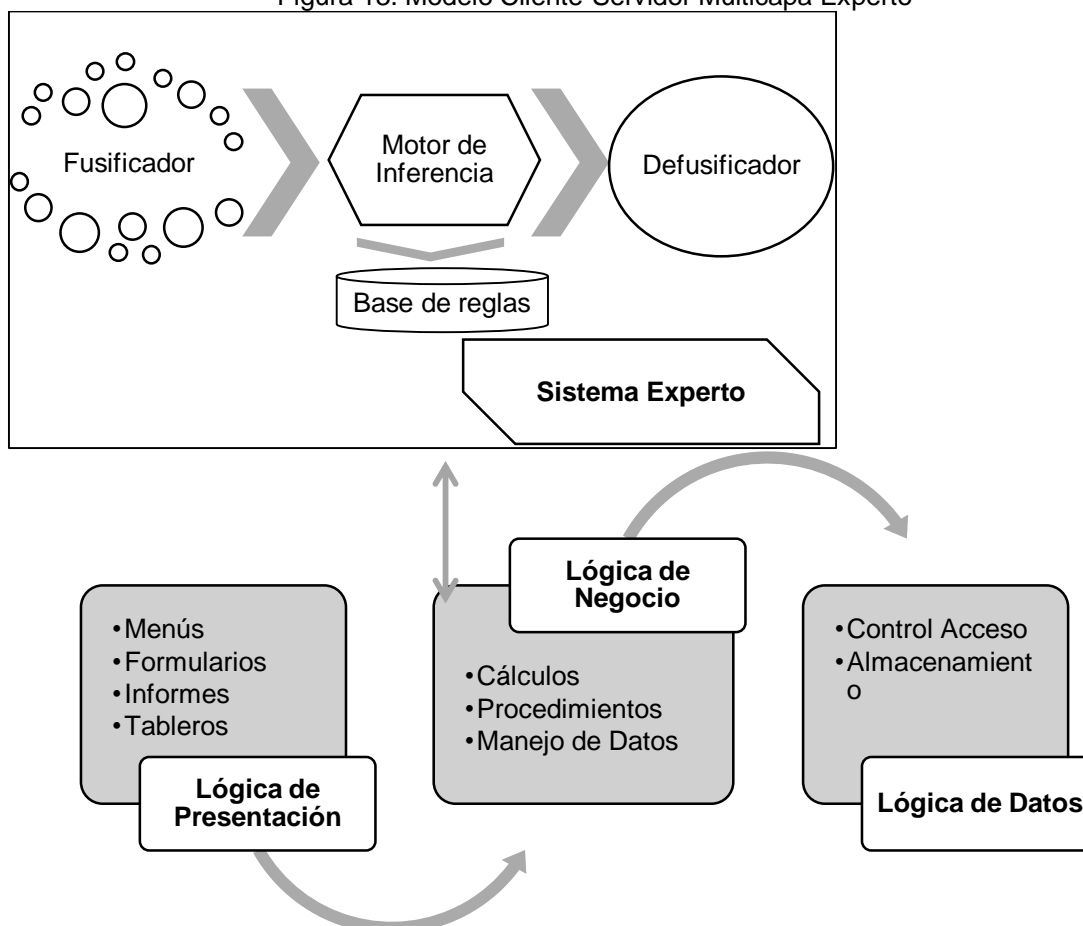
Figura 12. Modelo cliente/servidor tres capas



Fuente: elaboración propia

La arquitectura para el desarrollo del presente proyecto tiene un enfoque híbrido que mezcla el modelo de cliente/servidor multicapa y a la vez dentro de la lógica del negocio desarrolla el sistema experto para el procesamiento de los datos como se observa en la figura 13.

Figura 13. Modelo Cliente-Servidor Multicapa Experto



Fuente: elaboración propia

Con base en el desarrollo en la investigación de Aponte et al. (2020), se toma como base el modelo de cuatro capas con la modificación de incluir como parte de la lógica de negocio para el procesamiento de los datos por el sistema experto, lo que

resulta en un modelo de tres capas para el desarrollo del sistema experto: la capa de presentación, es decir, la interfaz y su control, la capa de proceso, que comprende la lógica del negocio general y el sistema experto (SE) y la capa de datos que es el sistema gestor de base de datos y almacenamiento de ficheros relacionados al SE.

Basado en los estudios de sistemas similares en otros campos de aplicación (Vargas, 2011), (C. A. Cadena et al., 2017) y (Robles, 2013) de forma general, se encuentra que no existe un modelo que integre el desarrollo de una aplicación web para un sistema experto, por lo que, en suma a la estructura propia del sistema experto, su complejidad y variabilidad de diseño, no se encuentra un estándar de arquitectura o modelo de desarrollo a seguir para este tipo de sistema.

Para el desarrollo de software del proyecto, se toma como base la metodología ágil *Scrum*. Las metodologías ágiles, se caracterizan por optimizar y enfocarse en el proceso de desarrollo para evitar la rigidez y documentación excesiva (López, 2015). Además, es definida como una implementación por fases o de estilo incremental, que se centra en la simplicidad y la entrega de funciones lo antes posible (Urteaga, 2015).

La metodología ágil, es aquella, que se centra en la entrega de productos funcionales en periodos de corta duración que mediante incrementos o fases evita la generación de documentación excesiva o un desarrollo muy reglamentado. Se basa en los principios de: valorar al individuo y al grupo de desarrollo, preferir la funcionalidad del software antes que la documentación, colaborar con el cliente durante el desarrollo y ser plenamente flexible a los cambios.

Dentro de las metodologías ágiles, se encuentra *Scrum*, basada en el control de procesos de forma empírica a través de la experiencia con la toma de decisiones en base al conocimiento y el uso de iteraciones incrementales para un mayor control (López, 2015). Según Bhavsar et al. (2020), es la metodología fundada por Jeff Sutherland en 1993, basada en el empirismo y en la auto organización del

equipo de desarrollo para la entrega rápida de productos de alto valor con principios de: creatividad, productividad y colaboración.

Scrum es una metodología ágil, centrada en la entrega de productos funcionales de alto valor en interacciones incrementales, que se basa en la experiencia del grupo de desarrollo para priorizar la entrega antes que la documentación. Se siguen los principios generales de: transparencia, inspección adaptación y los valores del grupo de desarrollo centrados en la creatividad, productividad y colaboración.

La metodología Scrum, empieza con la descripción y priorización de todas las características de un producto a ser desarrolladas que conforman el *Product Backlog*, seguido de la descripción de las asignaciones de estas características a un desarrollo corto en iteraciones llamadas *Sprints*.

Durante el progreso de un *Sprint*, se generan reuniones diarias llamadas *Daily Scrum*, donde se exponen los problemas encontrados, los avances y la proyección a la siguiente reunión. Al finalizar el *Sprint*, se presenta la funcionalidad o característica seguida de una retrospectiva del producto llamada *Sprint Review*. El proceso, se aprecia en la figura 14.



Fuente: tomado a partir de (López, 2015).

Los roles dentro de *Scrum*, distingue tres directamente relacionados y dos indirectos. Dentro de los primeros, se encuentra: *Product Owner*, *Scrum Master*, Equipo de Desarrollo. Y el segundo grupo: *Stakeholders* y los Usuarios.

El *Product Owner* es el responsable de describir las características del producto que pretende obtener. El *Scrum Master*, se encarga de liderar el equipo, funciona de vínculo entre el equipo y los clientes para mejorar los productos, además, define las reglas, prácticas y documentos del desarrollo. El equipo de desarrollo es conformado por el grupo de profesionales diverso con la libertad en sus entregas para entregar un *Sprint*.

El grupo de roles indirectos comienza con los *Stakeholders*, que son los interesados del proyecto, es decir, los terceros que llegarían a tener relación con el producto o los beneficios de este (López, 2015). Los usuarios, son los destinatarios de la aplicación y llegarían a estar presentes durante el desarrollo según, se considere necesario.

Se selecciona la metodología Scrum, por permitir un desarrollo ágil organizado en etapas, los cuales, permiten ser priorizados. En la investigación es de suma importancia la entrega de módulos que el sistema experto ocupe en etapas en orden de importancia para adquirir datos, y después desarrollar la base de conocimiento, seguido del motor de inferencia y el registro adecuado.

Así mismo, se culmina con la presentación de los datos procesados y el proceso del sistema para explicar la conclusión realizada. Se toma como recomendación de la investigación de Bhavsar et al. (2020), donde manifiesta que *Scrum* es apropiado para los procesos de ingeniería de software modernos que proveen entre un 150% a 200% de mejora en la entrega de funcionalidades desde el punto de vista cualitativo.

El sistema experto tiene como base la codificación en el lenguaje *Python* en la versión 3.9.2. *Python*, es definido como un lenguaje de programación de alto nivel que posee estructuras de datos eficientes y una programación de tipo *scripting*,

sencilla pero efectiva fácil de aprender, por lo que, se convierte en un lenguaje óptimo para el desarrollo rápido de aplicaciones (Python, 2021).

El scripting es una técnica de programación, donde los comandos en un archivos son ejecutados en una línea de comandos (Bahit, 2018). Python es un lenguaje de programación enfocado al *scripting*, simple pero potente que permite desarrollar aplicaciones complejas en menor tiempo enfocado al desarrollo práctico.

Las librerías de apoyo esenciales para la codificación del sistema experto residen en scikit-fuzzy, numpy y matplotlib. La librería scikit-fuzzy contiene algoritmos de lógica difusa escrita en *Python* (SciKit-Fuzzy, 2019). Adicionalmente la aplicación web, en la interfaz de usuario, se desarrolla en lenguaje HTML5 (*Hyper Text Markup Language Version 5*) definido como un lenguaje que mediante etiquetas forman elementos y estos a la vez un documento.

CSS (Cascading Style Sheets) es otro lenguaje para definir las propiedades y estilos empleados en HTML. A diferencia de los mencionados anteriormente JavaScript es un lenguaje de programación, usado principalmente para desde el lado del cliente proporcionar dinamismo a la página (Gauchat, p.8, 2017). En síntesis, HTML es el lenguaje que interpreta el navegador para mostrar contenido, CSS, se encarga de dar el formato y estilo a los contenidos de HTML y JavaScript proporciona la interacción de los elementos u otras funciones de programación.

PHP (Hypertext Preprocessor) es un lenguaje, que se ejecuta en el lado del servidor y envía información procesada al cliente, lo que resulta en que el cliente no conozca cómo, se genera ese código y mejora la protección de los datos. Además, alivia la carga de los clientes para así permitir que los procesos, cálculos y consultas se lo genere en los servidores. Según Gauchat (2017), PHP permite, que se intercambien valores entre el cliente y el servidor sin conocer los procesos de fondo.

Es seleccionado para el desarrollo de la investigación, por su naturaleza abierta, con gran respaldo de la comunidad para una fácil integración del sistema experto y acceso a bases de datos. El almacenamiento en base de datos, se realiza mediante

el gestor relacional MySQL bajo licencia abierta por el rendimiento, facilidad de uso y ser multiplataforma (Marín, 2019).

En la publicación de Aponte et al. (2020), se realiza un desarrollo de software para la gestión de activos de transformadores, interruptores y descargadores. Se emplean técnicas lineales y, se mencionan otras como la lógica difusa para la generación del índice de salud del activo. Además, se emplean herramientas como Django como el *framework* de desarrollo web, PostgreSQL para el almacenamiento y HTML, CSS, *JavaScript* para el entorno del usuario. Se menciona la importancia de que el personal que realiza las pruebas está capacitado. Además, la herramienta facilita la gestión de los activos y el diagnóstico del estado.

La validación por la complejidad y necesidad de recolección de información de criterios expertos, se opta por la comparación con los resultados de la herramienta conjunto a la información y datos proporcionados por los estudios de Abu-Elanien et al. (2012) y Cerón, Echeverry, et al. (2015). Además, para validar el software, se emplea la normativa ISO/IEC 9126 que proporciona los criterios de calificación de un producto de software con el fin de evaluar la calidad global del mismo en vista de los usuarios.

CAPÍTULO 2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1. Caracterización de la Empresa

La empresa INEDYC inicia sus actividades en el año de 1989, en el centro de la ciudad de Ambato. Hacia el año de 1992, su fundador Franklin Camacho Molina, registra oficialmente la empresa de servicios de ingeniería eléctrica con el enfoque al sector industrial. Las actividades iniciales de la empresa en mención abarcan temas de investigación como electromagnetismo, protecciones eléctricas y control industrial. En el transcurso del tiempo, se amplían las actividades de la empresa hacia importaciones, generación, calidad de energía, diagnóstico experto, entre otras.

La misión de la empresa es: “Realizar un manejo adecuado de las tecnologías para brindar mayor satisfacción a los clientes al proporcionar productos y servicios en el área de Ingeniería Eléctrica, los cuales, mejoraran la vida útil y rendimiento de los equipos, esto, se lleva a cabo a través de procesos de calidad que son brindados con personal especializado.” La visión de la empresa es: “Ser la empresa de servicios y producción más eficiente y eficaz del Ecuador, para proporcionar la mayor satisfacción con el mejor servicio requerido hacia los clientes.”

La empresa ofrece sus servicios bajo el objetivo de “Desarrollar planificaciones estratégicas de producción y servicio para la obtención de mejoras productivas y de mantenimiento para los equipos eléctricos, los cuales, nos llevaran a la excelencia para cumplir con lo requerido por los mercados industriales.” Con valores corporativos como: compromiso, honestidad, responsabilidad, servicio, confianza y lealtad.

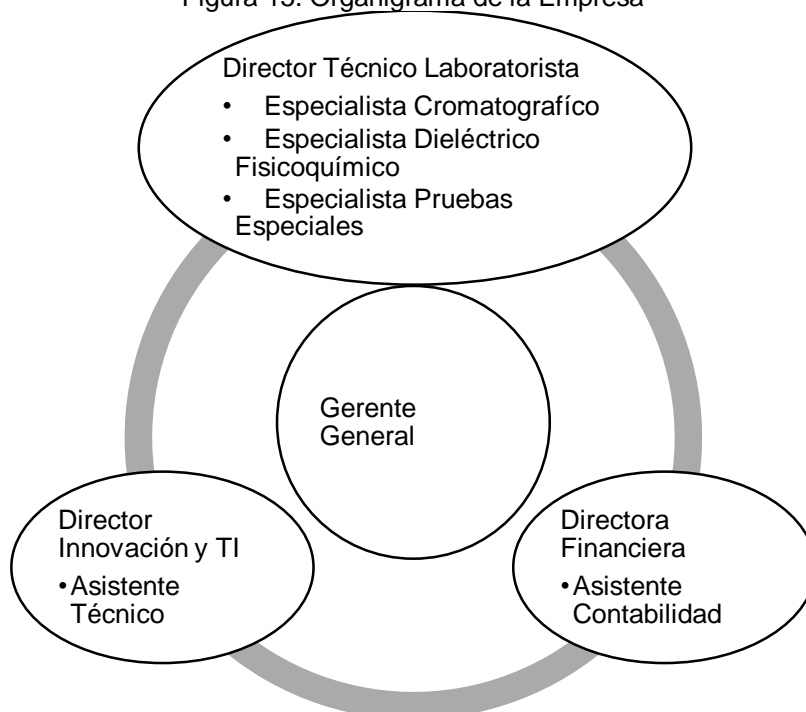
El fundador de la empresa, Franklin Camacho Molina, conjunto con su hijo, Franklin Camacho Cañizares, constituyen la sociedad “LIARGY”. Dentro de las actividades de esta empresa, se desarrolla pruebas del aceite dieléctrico bajo estándares internacionales para determinar las propiedades fisicoquímicas y dieléctricas del aceite con el fin de evaluar las condiciones de los transformadores bajo prueba,

generar un diagnóstico y emitir criterios expertos para la toma de decisiones sobre medidas preventivas o correctivas y evitar los fallos de estos equipos.

Dentro de los servicios principales del laboratorio de aceites, se encuentra el análisis dieléctrico fisicoquímico, cromatografía de gases disueltos, pruebas de factor de potencia y pruebas especiales. La empresa trabaja con expertos que cuentan con un conocimiento acumulado por más de dos décadas en el área de construcción, diagnóstico y mantenimiento de transformadores eléctricos y lo relacionado.

Esto ha permitido garantizar la confiabilidad y calidad de los resultados del laboratorio. Sin embargo, esta experiencia es limitada a pocos expertos y por las necesidades de escalabilidad del laboratorio es necesario contar con una herramienta que permita la abstracción del conocimiento de los expertos, para que, sea utilizada por otro personal como guía en el proceso de diagnóstico.

Figura 15. Organigrama de la Empresa



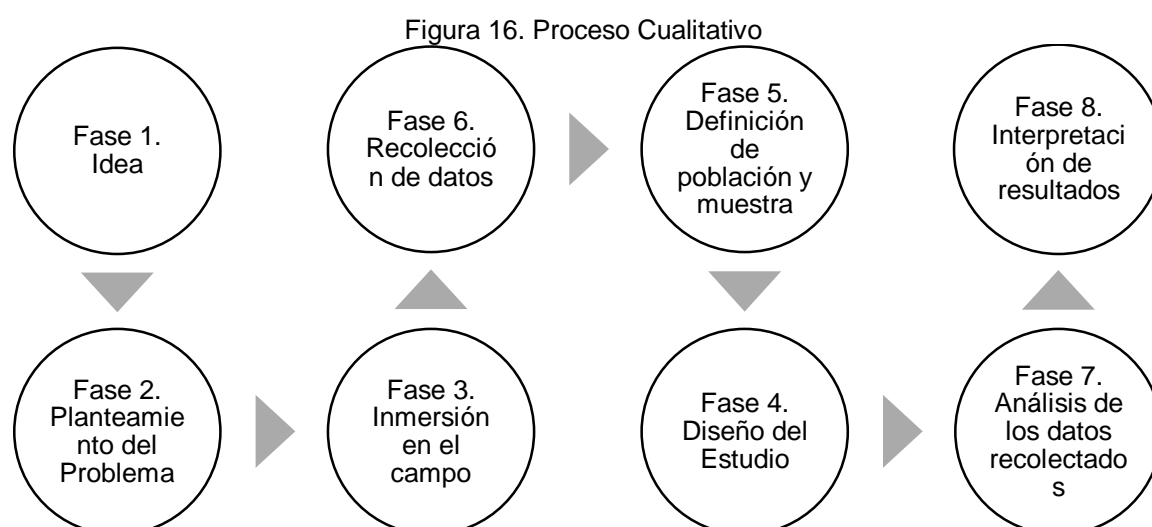
Fuente: elaboración propia

El laboratorio de análisis, se caracteriza por tener una estructura que prioriza la colaboración entre departamentos y todo el personal a cargo de la dirección de Gerencia y los departamentos como, se aprecia en la figura 15.

La expansión de la empresa de laboratorio químico precisa de una herramienta para escalar la cantidad y precisión de los resultados arrojados, por lo que, el desarrollo del sistema experto difuso aporta la facilidad de escalabilidad, aprendizaje y trazabilidad de los resultados.

2.2. Metodología de la Investigación

La investigación es definida como un grupo de procesos ordenados que son utilizados para estudiar un fenómeno mediante un juicio crítico y la experiencia (Sampieri et al., p.4, 2010). Este conjunto de procesos llamados metodología de la investigación abarcan múltiples enfoques: cualitativo, cuantitativo y mixto. Se selecciona el enfoque cualitativo, dado que, se precisa explorar un proceso de análisis y diagnóstico de muestras, donde intervienen datos originados en la experiencia de los expertos, para abstraerlo a una herramienta informática de análisis experto con el fin de responder las preguntas de investigación planteadas. El proceso que sigue la metodología cualitativa, se describe en la figura 16, donde, se ha tomado como referencia las fases de un proceso cualitativo para la presente investigación.

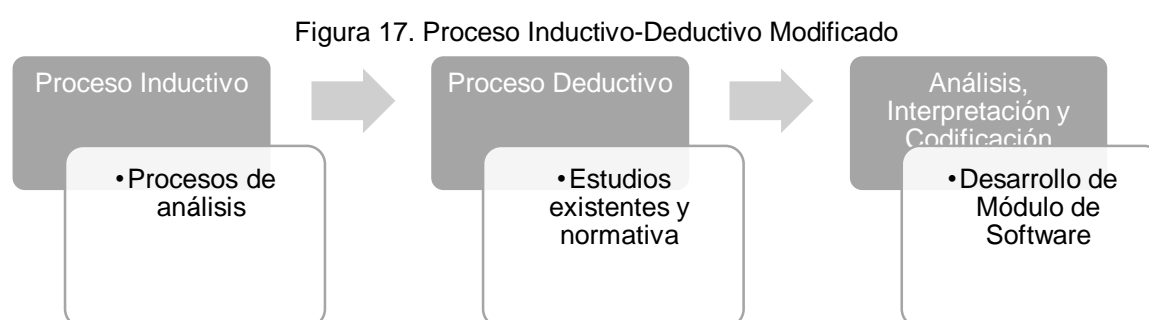


Fuente: modificado a partir de (Sampieri et al., p.8, 2010).

En una forma simplificada de los tipos de investigación, Cairampoma (2015), presenta tres clasificaciones: descriptivas, analísticas y experimentales. Por la naturaleza del proyecto el diseño de la investigación es no experimental transversal descriptivo, dado que, para el diseño de la herramienta y la codificación de la base de conocimiento y otros módulos, se realiza un proceso de recolección de información para el entendimiento de los procesos de análisis para la posterior codificación.

La investigación emplea el método inductivo-deductivo, el primero, se utiliza bajo el escenario del análisis de los procesos de diagnóstico actuales para lograr la generalización y abstracción en el motor difuso. El enfoque deductivo es manejado para complementar con la información existente en otros estudios y la normativa vigente para aplicar la información particular en el desarrollo.

El proceso inductivo, se define como el razonamiento de los casos particulares a la generación de conocimiento general, un proceso de generalización. Por otra parte, proceso deductivo es opuesto, parte a partir de afirmaciones generales crear una afirmación más específica (Rodríguez & Pérez, 2017). Estos procesos son complementarios para la investigación, para mediante la inducción establecer la abstracción de procesos y luego llegar a conclusiones lógicas para el desarrollo del sistema descritos en la figura 17.



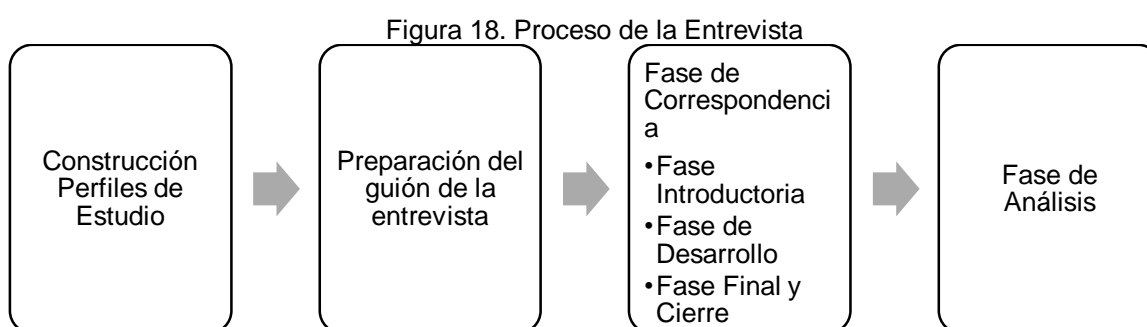
Fuente: elaboración propia

En la empresa de laboratorio de análisis de aceites dieléctricos, en el área de interés del proyecto, laboran tres personas, las cuales, son: el gerente general, el cual, cuenta con la mayor experiencia en el análisis y diagnóstico, el director técnico

laboratorista y la especialista de análisis. La población para la recolección de datos del proyecto no es significativa, por lo que, no existe la necesidad de calcular la muestra al ser necesaria la incorporación de todos los criterios de la población.

Los instrumentos de la investigación cualitativa según Campoy & Gomes (2016), proporcionan ventajas al permitir analizar problemas complejos que involucran aspectos subjetivos de las personas o los contextos. Además, permite la participación de múltiples individuos que aportan su experiencia. Dentro de los instrumentos cualitativos, se encuentra la entrevista de profundidad, caracterizada por ser la interacción entre el investigador y el o los sujetos de interés para recolectar los datos relevantes.

Para la investigación la entrevista de profundidad permite una interacción mayor y la posibilidad de ampliar temas en particular (P. Cadena et al., 2017). Se adecua idealmente el instrumento mencionado a la investigación al existir un solo investigador que por la complejidad de la sistematización de la experiencia precisa ampliar preguntas y recolectar la mayor cantidad de información de la población, además, de cumplir con la recolección sistemática de los requisitos generales del sistema.



Fuente: elaboración propia

La entrevista de profundidad tiene como primer paso la construcción de perfiles de estudio, en donde, se definen aspectos básicos como edad, estado civil, entre otros. Tiene como finalidad proporcionar las características de los individuos a ser entrevistados. Como segundo paso, la preparación del guion permite con

anterioridad que el investigador logre conseguir sus objetivos y evitar el desvío de lo planteado.

Posterior la fase de correspondencia representa el proceso de entrevista propiamente y contiene una fase introductoria, donde, se informa al entrevistado del objetivo, el uso de la información, entre otros. Además, de la fase de desarrollo, la cual, el investigador realiza preguntas abiertas y el entrevistado responde de forma abierta. Por último, dentro de la fase de correspondencia, la fase de final y cierre es un espacio para las preguntas más abiertas y abstractas, además, de las aclaratorias necesarias sobre cualquier otra pregunta. Una vez realizadas las entrevistas necesarias, el proceso de análisis tiene como finalidad el entendimiento y abstracción de los datos del fenómeno para cumplir con los objetivos de la investigación.

El anexo 1 muestra el formato de la entrevista aplicada para la recolección de la información sobre procesos de diagnóstico, reglas de análisis, definición de las características del programa y los módulos a desarrollar, que se analizan y detallan en el siguiente epígrafe.

2.3. Metodología del Desarrollo

La visión del proyecto es desarrollar un sistema experto basado en lógica difusa para la empresa de laboratorio de análisis de aceite dieléctrico “LIARGY”, con el fin de mejorar los procesos de diagnóstico de sus análisis en relación con la determinación de un índice de salud que represente de forma general el estado de un transformador.

La definición de roles en la investigación tiene como *Product Owner* al gerente general de la empresa de laboratorio de análisis de aceites, que mediante la entrevista define la mayor parte de requerimientos del sistema y proporciona los datos para la base de conocimiento. Los *stakeholders*, están conformados por el jefe de laboratorio y laboratoristas, quienes definen características específicas y funcionalidades complementarias. El *Scrum Master*, a cargo del presente

investigador y desarrollador que cuenta con experiencia de desarrollos previos y conocimientos globales de los procesos específicos del laboratorio.

En la metodología Scrum, el primer paso para el desarrollo de software es la definición de la Pila del Producto (*Product Backlog*), que contiene la lista de las características requeridas y sea modificado en el desarrollo de los incrementos a consideración del dueño del producto (*Product Owner*), el gerente de la empresa de laboratorio de análisis de aceites y el director del proyecto (*Scrum Master*), el investigador.

En base a los resultados de la entrevista realizada adjunta en el Anexo 1, se sintetiza que las características más importantes de forma general de la herramienta de software del sistema experto difuso sea que el mismo cuente con un sistema de ingreso seguro, páginas de ingreso y manejo de resultados dieléctricos, resultados cromatográficos y resultados de contenido de furanos. Además, del manejo simple de clientes y equipos registrados del cliente. Como característica funcional más importante, se interpreta que la base de conocimiento solo sea codificada por un experto del área y, se muestre el proceso, por el cual, el sistema llevo a una determinada conclusión. En el cuadro 2, se detalla la recolección de las características resultantes de las entrevistas en la pila del producto.

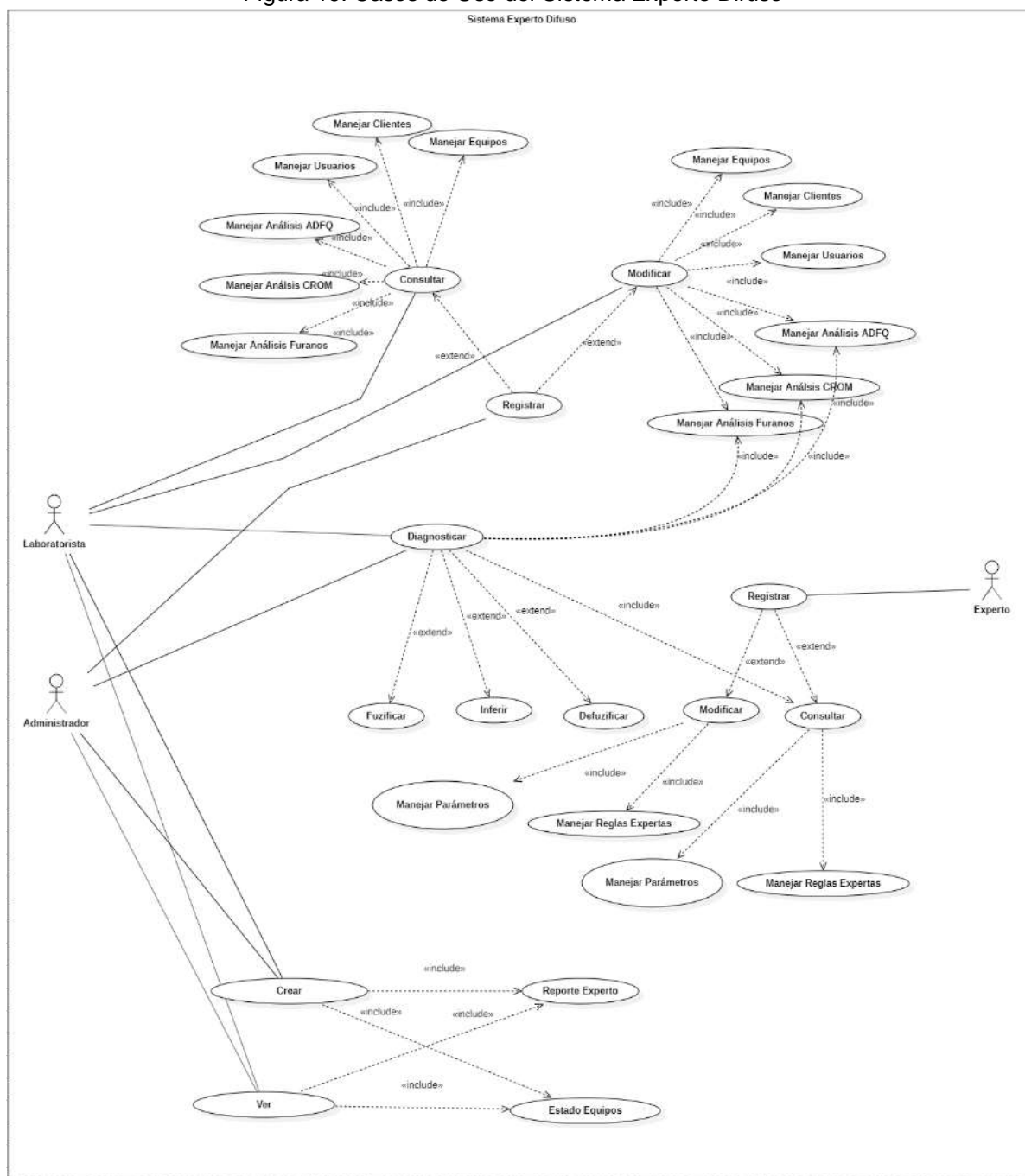
Cuadro 2. Pila del Producto (Product Backlog)

ID	Descripción	Sprint	Prioridad	Dependencia
R-1	Interfaz general web	1	Alto	--
R-2	Almacenamiento de datos históricos de los resultados	1	Muy Alto	--
R-3	Manejo, registro e inicio de sesión de usuarios	1	Medio	R-1, R-2
R-4	Manejo y registro de: clientes, equipos, análisis dieléctrico fisicoquímico, análisis cromatográficos, análisis de contenido de furanos	2	Alto	R-1, R-2
R-5	Visualización de resultados de análisis dieléctrico fisicoquímico, análisis cromatográficos, análisis de contenido de furanos	2	Bajo	R-4
R-6	Módulo de diagnóstico experto difuso	3	Muy Alto	R-4
R-7	Módulo de presentación y resumen de resultados de diagnóstico experto	4	Alto	R-6

Fuente: elaboración propia

La descripción provee el detalle de la característica a desarrollar y, se realiza la asignación a una iteración determinada, en la cual, se detalla más adelante en cada pila de iteración (Sprint Backlog). La prioridad de la pila del producto, se asigna por parte del Scrum Master que toma en cuenta la dependencia de ciertos módulos para lograr el funcionamiento por etapas entregables, y tiene los siguientes rangos: bajo, medio, alto y muy alto. En la pila de producto, se asigna la característica o requerimiento a un Sprint. En base a los requerimientos del sistema, obtenidos de las entrevistas y el resumen del *Product Backlog*, se diseña el esquema de la figura 19, que contiene el diagrama de los casos de uso de todo el sistema.

Figura 19. Casos de Uso del Sistema Experto Difuso



Fuente: elaboración propia

Para la estimación de esfuerzo del desarrollo completo del producto, se emplea la metodología de puntos de casos de uso que según (Clemmons, 2006), permite estimar de forma principal el tiempo, costo y recursos de un proyecto de software. En la investigación es de relevancia el cálculo de las horas hombre que requiere el software para distribuir las características del *Product Backlog* en cada *Sprint* y asignar la duración de este. Los cálculos, se detallan en los cuadros 3 a 7.

Cuadro 3. Factor de Peso Actores

Factor de Peso Actores	Descripción	Peso	Número	Valor ponderado	Comentario
Simple	API Programa	1	0	0	--
Intermedio	Humano línea de comando o máquina vía protocolo	2	1	2	Enlace de interfaz a motor de inferencia a través de línea de comandos
Complejo	Humano con GUI	3	1	3	Interfaz web para registro, manejo y visualización de resultados. Interfaz para el proceso de los datos hacia el sistema experto difuso
Peso Total Actores				5	

Fuente: modificado a partir de (Alyssa Consultores, 2014)

Cuadro 4. Factor de Peso Casos de Uso

Factor de Peso Casos de Uso	Escenarios	Peso	Número	Valor ponderado	Comentario
Simple	3 o menos	5	4	20	Consulta y registro de datos de análisis, manejo de usuarios y procesos temporales
Intermedio	4 a 7	10	0	0	--
Complejo	más de 7	15	1	15	Fuzzificación, funciones de membresía, codificación de reglas expertas, defuzzificación y diagnóstico
Factores Basados en Transacciones				35	
Puntos de CU No Ajustados				40	

Fuente: modificado a partir de (Alyssa Consultores, 2014)

Cuadro 5. Factores de Peso Técnicos

Factores de Peso Técnicos	Escala de asignación	Peso	Número	Valor ponderado	Razón
T1 Sistema Distribuido	0=no importante 5=esencial	2	0	0	Desarrollo experimental no en ambiente de producción
T2 Objetivos de Desempeño o Tiempo de Respuesta	0=no importante 5=esencial	1	3	3	Evitar tiempos de espera excesivos para obtener un diagnóstico
T3 Eficiencia Usuario Final (online)	0=no importante 5=esencial	1	2	2	Laboratoristas precisan de un sistema eficaz

T4 Procesamiento Interno Complejo	0=no importante 5=esencial	1	5	5	Sistema complejo
T5 Código es Reusable	0=no importante 5=esencial	1	4	4	Sistema Experto ampliable para desarrollos futuros
T6 Facilidad de Instalación	0=no importante 5=esencial	0.5	0	0	Instalado por especialistas en un servidor, acceso web no requiere instalación
T7 Facilidad de Uso	0=no importante 5=esencial	0.5	4	2	Usuario requiere manejo simple
T8 Portabilidad	0=no importante 5=esencial	2	0	0	Sistema web accesible de múltiples dispositivos
T9 Facilidad de Cambio	0=no importante 5=esencial	1	1	1	El sistema experto es modificado en conjunto con expertos y programadores especializados
T10 Concurrencia	0=no importante 5=esencial	1	2	2	Procesos multihilo
T11 Incluye Características Especiales de Seguridad	0=no importante 5=esencial	1	3	3	Evitar ingresos no deseados en la intranet de la empresa y manipulación de datos.
T12 Provee Acceso Directo a Terceros	0=no importante 5=esencial	1	0	0	Solo utilizado por personal de la empresa
T13 Se Requieren Ayudas Especiales de Entrenamiento de Usuarios	0=no importante 5=esencial	1	1	1	Capacitación simple para el uso del programa
Factores Técnicos				23	
Factor de Complejidad Técnica (TCF)				0.83	

Fuente: modificado a partir de (Alyssa Consultores, 2014)

Cuadro 6. Factores de Peso Ambientales del Equipo

Factores de Peso Ambientales del Equipo	Escala 0 a 5	Peso	Número	Valor ponderado	Razón	Estabilidad
F1 Familiaridad con un Proceso Definido (Scrum)	0 = sin experiencia, 3=media, 5=experto	1.5	3	4.5	Basado en la experiencia del programador	0
F2 Experiencia en el Dominio de Aplicación	0 = sin experiencia, 3=media, 5=experto	0.5	4	2	Investigador familiarizado con los procesos del laboratorio	1
F3 Experiencia en Orientación a Objetos	0 = sin experiencia, 3=media, 5=experto	1	4	4	Experiencia amplia	0
F4 Capacidad de Liderazgo de Analistas	0 = sin experiencia, 3=media, 5=experto	0.5	4	2	Experiencia media - alta	1
F5 Motivación	0=sin, 3=media, 5=alta	1	5	5	Prioridad alta para el investigador y empresa interesada	0
F6 Requerimientos Estables	0=extremadamente inestable, 5=no cambian	2	3	6	Variaciones entre <i>Sprints</i>	0
F7 Miembros a Tiempo Parcial	0=tiempo parcial, 5=tiempo completo	-1	0	0	--	0
F8 Dificultad del Lenguaje de Programación	0=fácil, 3=medio,5=difícil	-1	4	-4	Complejidad de motor de inferencia y base de conocimiento	0
Factores Ambientales				19.5		2
Factor				0.815		

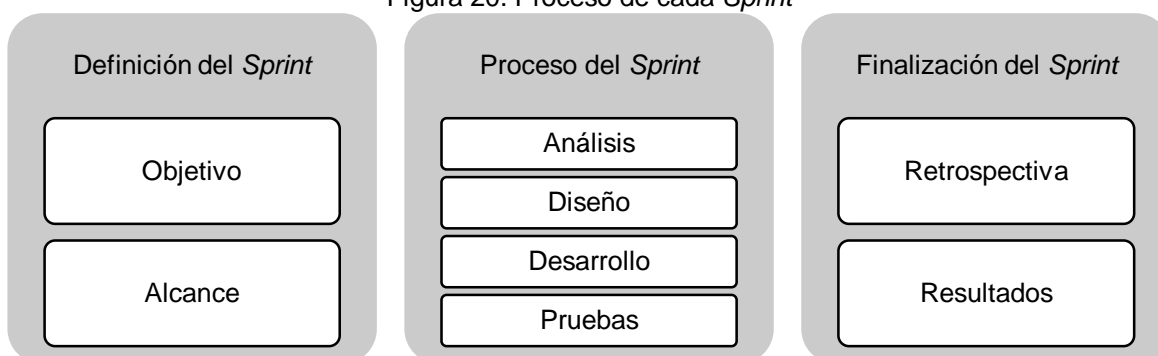
Fuente: modificado a partir de (Alyssa Consultores, 2014)

Cuadro 7. Resumen de cálculo de Puntos de Casos de Uso y estimación de duración del proyecto

Factor	Valor	Comentario
Puntos de Casos de Uso Ajustados	27.06	--
Factor de Productividad	10.00	Experiencia en desarrollos previos
Total, horas estimadas	270.58	--
Factor de Ajuste de Contingencia	5%	--
Horas Persona Estimadas en el Proyecto	284.11	horas
Horas laboradas diarias proyectadas	6.00	horas
Cantidad de días laborables en el mes	24.00	días
Tamaño del equipo	1.00	persona
Tiempo Estimado de Desarrollo en Equipo	1.97	meses

Fuente: modificado a partir de (Alyssa Consultores, 2014)

Un *Sprint* tiene una duración entre uno y treinta días. En base al tiempo total estimado de desarrollo de aproximadamente 8 semanas, se asigna una duración de cada *Sprint* de dos semanas. Conbase en los datos recolectados, estimaciones, requerimientos generales del *Product Backlog* y la metodología Scrum, cada *Sprint*, se diseña con el esquema representado en la figura 20.

Figura 20. Proceso de cada *Sprint*

Fuente: elaboración propia

Definición de primer *Sprint*

El objetivo del primer *Sprint* es el de desarrollar principalmente la base de datos del sistema y la interfaz de usuario como plantilla web para el inicio de sesión y manejo de usuarios. El alcance el primer *Sprint* es obtener una base de datos debidamente diseñada e implementada en el equipo de cómputo del desarrollador, una interfaz

web funcional que permita el ingreso al sistema mediante usuario y contraseña y una página de registro y manejo de usuarios del sistema.

Análisis

La pila del presente Sprint, se detalla, a continuación, en el cuadro 8.

Cuadro 8. *Sprint Backlog – Primer Sprint*

ID	Requerimiento	Prioridad
S1-1	Modelo de Base de Datos	Muy alta
S1-2	Interfaz de Usuario (Ingreso al Sistema y Registro de Usuarios)	Alta
S1-3	Operaciones crear, leer, actualizar y eliminar (CRUD) para login, registro y manejo de usuarios	Alta

Fuente: elaboración propia

Diseño

El desarrollo de modelo de base de datos toma en consideración los aspectos principales de los diferentes tipos de análisis, los parámetros de ingreso del motor difuso y generalidades de usuarios, clientes y equipos. En los aspectos globales es creada una tabla para los usuarios, clientes y equipos. Para los procesos de análisis en base a los resultados de la entrevista, se identifica que todos los resultados provienen de procesos diferentes por lo que, para cada análisis, se genera una tabla, adicionalmente todos los grupos de análisis provienen de una muestra, para la cual, se crea una tabla, que se enlaza todos los resultados de los grupos de muestras.

Los parámetros, que se emplean para el diagnóstico clásico y para generar las funciones de membresía están en una tabla, que se diferencia por la clase de voltaje del equipo y otros parámetros específicos de las pruebas. El modelo de base de datos, se aprecia en la figura 21.

Como aparece en la figura 23, la administración de los usuarios, se realiza en tarjetas, la primera muestra los campos de ingreso de datos y los botones de acción sobre los mismos. la segunda tarjeta muestra la tabla de la lista de usuarios.

Figura 23. Diseño de página de manejo de usuarios

Fuente: elaboración propia

Desarrollo

Figura 24. Desarrollo de la página de inicio de sesión



Fuente: elaboración propia

En la figura 25, se observa el desarrollo implementado de la página de administración de usuarios en base al diseño planteado, se aumentan campos en la tabla de la lista de usuarios para una mejor especificación y búsqueda.

Figura 25. Desarrollo de la página de manejo de usuarios

The screenshot displays a web application interface for user management. At the top, there is a header with the title 'Administración de Usuarios' and a search icon. Below the header, there is a section titled 'Registro y Actualización' containing several input fields for user registration: 'Nombre', 'Apellido', 'Correo', 'Administrador', 'Código', and 'Sexo'. There are also two buttons: a red 'Nuevo Usuario' button and a blue 'Actualizar Usuario' button. Below this section, there is a table titled 'Lista de Usuarios' with columns for 'ID', 'Nombre', 'Apellido', and 'Email'. The table contains three rows of user data. At the bottom right, there are 'Agregar' and 'Eliminar' buttons.

ID	Nombre	Apellido	Email
1	Carlos	Camacho	carlos@camacho.com
2	María	Camacho	maria@camacho.com
3	Carlos	Camacho	carlos@camacho.com

Fuente: elaboración propia

Pruebas

Las pruebas de aceptación de usuario permiten que los usuarios reales de la herramienta de software realicen las tareas en un ambiente de producción controlado antes de la entrega final del incremento. Debido a que el usuario final no interactúa con la base de datos, la misma, se valida de forma indirecta en las pruebas de aceptación de los siguientes requerimientos. Los cuadros 9 y 10 contienen las pruebas de aceptación para la finalización del *Sprint 1*.

Cuadro 9. Pruebas de aceptación *Sprint 1*, caso 1

Sprint	1	
ID, Caso de Prueba	CP-S1-C1	
Requerimiento	Ingreso al sistema	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad ingresar al sistema y salir del mismo	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Ingreso al sistema con diferentes tipos de usuarios	Si es un usuario administrador el sistema muestra todas las pestañas y permite la navegación libre. Si es usuario laboratorista no muestra las páginas de administración de usuarios	Con los usuarios administradores permite visualizar la página de administración de usuarios. En otros tipos de usuarios no permite la visualización
Ingreso de datos erróneos en la página de ingreso	La página devuelve un error si el campo usuario no es un correo. La página devuelve un error si no es válido el inicio de sesión. La página devuelve un error si el usuario que intenta iniciar sesión esta desactivado	De acuerdo con los resultados esperados.
Ingreso de datos correctos en la página de ingreso	El sistema redirige a la página principal con el nombre y apellido del usuario actual	De acuerdo con los resultados esperados.
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Cuadro 10. Pruebas de aceptación *Sprint 1*, caso 2

Sprint	1	
ID, Caso de Prueba	CP-S1-C2	
Requerimiento	Manejo de usuarios	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad registrar, eliminar y actualizar usuarios del sistema	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Registrar usuarios en la página de administración de usuarios	El registro, se guarda una vez validado en la base de datos sin errores. Se valida que todos los campos estén completos. Muestra un error en el caso de que el usuario ya este registrado.	De acuerdo con los resultados esperados.
Eliminar usuarios en la página de administración de usuarios	Se elimina el usuario de la base de datos	De acuerdo con los resultados esperados.
Actualizar usuarios en la página de administración de usuarios	Se actualiza la información en la base de datos. Permite actualizar el usuario si desea modificar o no la contraseña anterior	De acuerdo con los resultados esperados.
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Finalización

En la retrospectiva del primer *Sprint*, se destaca durante el desarrollo la reusabilidad de la plantilla de usuario, de forma singular el manejo simplificado en una misma página de las operaciones sobre los datos. Los resultados obtenidos son la generación de la base de datos funcional flexible a cambios por los distintos procesos o cambio de requerimientos. La plantilla de interfaz permite reutilizar sus elementos para el ingreso y manejo de múltiples datos sin que el usuario final cometa errores. Se cuenta con el manejo completo de los usuarios del sistema y el ingreso validado al sistema con diferentes tipos de usuarios.

Definición del segundo *Sprint*

El objetivo del segundo *Sprint* es el de desarrollar las páginas de ingreso de resultados de los procesos del laboratorio, que se convierten en los datos de entrada del sistema experto difuso. El alcance del segundo *Sprint* es el manejo de los clientes, equipos, condiciones de laboratorio y el ingreso de muestras por proceso. Además, el manejo de los resultados de análisis dieléctricos fisicoquímicos que comprende: contenido de humedad, rigidez dieléctrica, porcentaje de saturación, factor de disipación, número de neutralización, color, aspecto visual, gravedad específica. En el análisis cromatográfico, se comprende el ingreso de cada uno de los gases combustibles y no combustibles. Y el manejo de los resultados del análisis de contenido de furanos.

Análisis

La pila del presente *Sprint*, se detalla, a continuación, en el cuadro 11.

Cuadro 11. *Sprint Backlog – Segundo Sprint*

ID	Requerimiento	Prioridad
S2-1	Manejo de clientes, equipos, condiciones de laboratorio e ingreso de muestra.	Alta
S2-2	Página de registro y manejo de análisis dieléctricos fisicoquímicos con el módulo de operaciones CRUD para registro y manejo de análisis dieléctricos fisicoquímicos	Media
S2-3	Página de registro y manejo de análisis cromatográficos con el módulo de operaciones CRUD para registro y manejo de análisis dieléctricos fisicoquímicos	Media
S2-4	Página de registro y manejo de análisis contenido de furanos con el módulo de operaciones CRUD para registro y manejo de análisis dieléctricos fisicoquímicos	Media

Fuente: elaboración propia

Diseño

Como es mostrado desde la figura 26, se desarrolla una plantilla basada en una barra de navegación vertical para cada uno de los procesos globales del laboratorio de ingreso de datos y una exclusiva para el sistema experto difuso que toma los datos ingresados de las otras páginas y procesa la información. En los pasos con la finalidad de no extender innecesariamente el trabajo por la similitud de los procesos de ingreso de cada tipo de análisis es documentado el primero y los procesos diferentes en el desarrollo.

Figura 26. Diseño interfaz ADFQ principal



Fuente: elaboración propia

La interfaz principal de cada proceso de análisis, se clasifica en tres grupos: análisis dieléctrico físico químico, cromatográfico, contenido de furanos e índice de salud.

Los tres primeros comparten el diseño de la interfaz principal de cada proceso dado, que se requiere crear procesos, retomar un proceso guardado o ver los datos de un proceso finalizado. Difieren en el procesamiento del servidor al insertar en la tabla correspondiente a la muestra, el tipo de análisis a ingresar. Cada proceso permite la administración de los clientes y equipos del cliente seleccionado, además de compartir el manejo de fechas y las condiciones ambientales bajo, las cuales, se realizan los procesos.

Figura 27. Diseño interfaz proceso ADFQ de muestra

The screenshot displays a web interface for the ADFQ process. On the left is a dark blue sidebar with the text 'Nombre Empresa' at the top and navigation icons for 'Manejo Usuario' and 'ADFQ'. The main content area has a header with 'Nombre y Apellido Usuario' and a 'Cancelar' button. Below the header is a 'Muestra: ##' label. The 'Manejo de Cliente' section contains a table with two columns: 'Column 2' and 'Cell Content 1/2'. The table has three rows, with the first row selected. A 'Starto' button is located at the bottom right of this section. Below are three stacked sections: 'Manejo de Equipo', 'Fechas', and 'Condiciones Laboratorio'.

Column 1	Column 2
<input checked="" type="checkbox"/>	Cell Content 1
<input type="checkbox"/>	Cell content 2

Fuente: elaboración propia

En el diseño de los ingresos de datos de procesos de análisis, se toma en consideración el requerimiento principal de la simplicidad y administración en una misma página, por lo que, se diseña en base a tarjetas y modales de *Bootstrap*.

Figura 28. Diseño interfaz registro de clientes

Nombre Empresa

Nombre y Apellido Usuario

Muestra: ##

Manejo de Cliente

Ct	Cc
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Nombre Empresa"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Nombre Encargado"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Cargo"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Teléfono"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Ciudad"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Provincia"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="País"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Dirección"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="RUC"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Email"/>

Manejo de E

Fechas

Condiciones Laboratorio

Fuente: elaboración propia

Figura 29. Diseño interfaz manejo y selección de cliente

Nombre Empresa

Nombre y Apellido Usuario

Muestra: ##

Manejo de Cliente

Ct	Cc
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Nombre Empresa"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Nombre Encargado"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Cargo"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Teléfono"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Ciudad"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Provincia"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="País"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Dirección"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="RUC"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="Email"/>

Manejo de E

Fechas

Condiciones Laboratorio

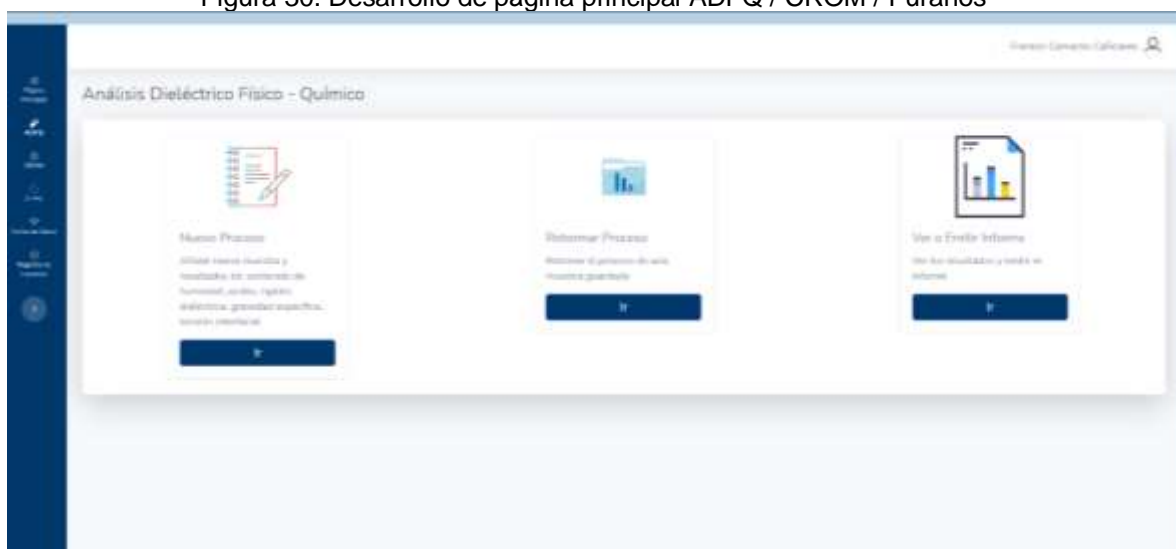
Fuente: elaboración propia

El sistema es enfocado en la simplicidad y similitud para todos los ingresos de datos, por lo que, todo resultado de análisis, lista de clientes, equipos y otros, se visualiza en tarjetas que contienen una tabla con los aspectos más relevantes de

cada uno. En caso de no existir o ingresar uno nuevo, se añade un botón que muestra otra tarjeta con todos los campos necesarios para registrarlos.

Desarrollo

Figura 30. Desarrollo de página principal ADFQ / CROM / Furanos



Fuente: elaboración propia

Cada grupo de procesos, se visualiza directamente en la barra lateral, mientras que las opciones de cada proceso, se crea una página interna independiente para el manejo, como se aprecia en la figura 30.

Figura 31. Diseño de página principal proceso de ADFQ / CROM / Furanos / Índice de Salud

Muestra: 473

Selección de Cliente:

ID Cliente	RUC	Empresa	Ejemplar
1	00110104001	COMSA	Nº Ejemplar: 000001
2	00110104001	AGDC	Nº Ejemplar: 000001
3	00110104001	INCOPI	Nº Ejemplar: 000001
4	00110104001	INCOPI	Nº Ejemplar: 000001

Selección de Equipo:

Lista de Equipos del Cliente Registrado:

ID Equipo	Marca	Modelo	Fecha	Estado
ID Equipo	Marca	Modelo	Fecha	Estado

Fechas:

Fuente: elaboración propia

Figura 32. Desarrollo de página del proceso de actualizar, eliminar o seleccionar

Muestra: 534

Selección de Cliente:

Continuar Cliente Seleccionado

Nombre:

Apellido:

Fecha:

Estado:

Dirección:

Teléfono:

Correo electrónico:

Eliminar Cliente

Actualizar Datos Cliente

Cancelar Cliente

Fuente: elaboración propia

Los procesos, se desarrollan de forma que cada sección, tarjeta, del sea administrada directamente, es decir, que contenga las operaciones de registrar, eliminar, actualizar o a su vez, seleccionar el registro para el proceso.

Figura 33. Desarrollo de página del proceso de registrar

The image shows a web application interface with a modal window titled "Registro de Clientes". The modal contains two columns of input fields for personal and contact information. At the bottom of the modal are two buttons: a green "Guardar" button and a blue "Cancelar" button. The background shows a sidebar on the left and a main content area with sections for "Selección de Cuenta", "Selección de Tránsito", and "Fechas".

Fuente: elaboración propia

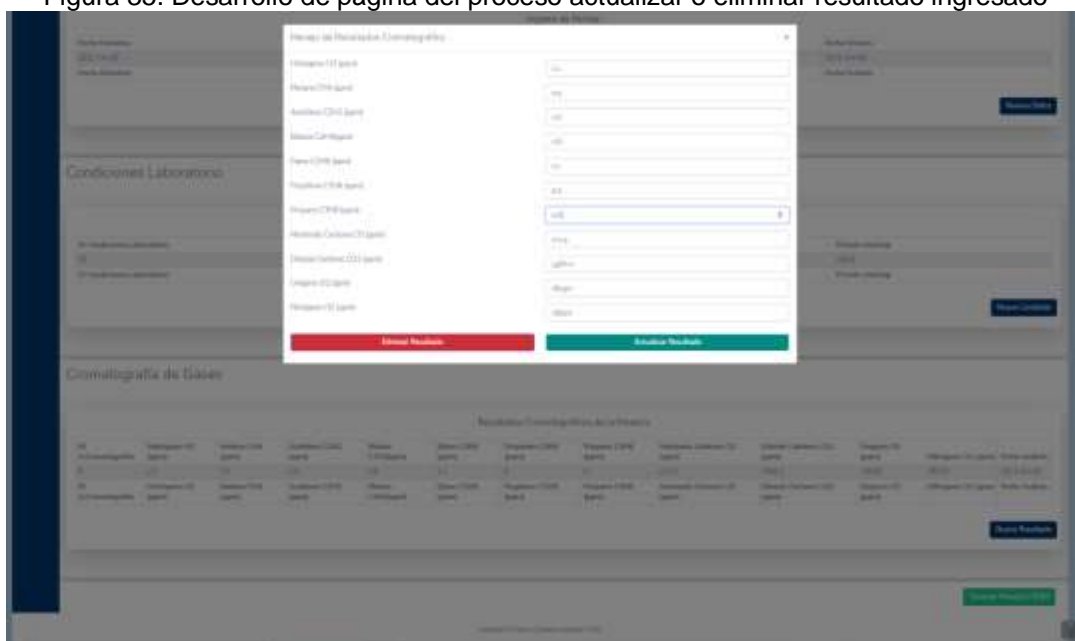
Figura 34. Desarrollo de página del proceso de registrar resultado

The image shows a web application interface with a modal window titled "Registro de Resultados Cronológicos". The modal contains a single column of input fields for various test results. At the bottom of the modal are two buttons: a green "Guardar Resultados Cronológicos" button and a blue "Cancelar" button. The background shows a sidebar on the left and a main content area with sections for "Condiciones Laboratorias" and "Cromatografía de Gases".

Fuente: elaboración propia

En las figuras 32, 33, 34 y 35 las operaciones o ingreso de nuevos registros, se realizan en modales de *Bootstrap* por la facilidad de vista al usuario.

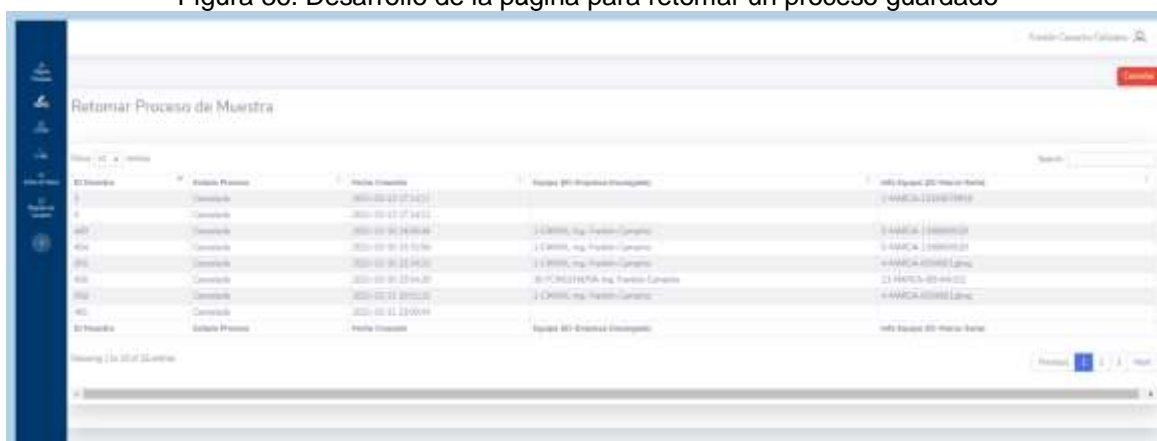
Figura 35. Desarrollo de página del proceso actualizar o eliminar resultado ingresado



Fuente: elaboración propia

En la figura 36, se observa la página que permite retomar un proceso que aún no ha sido concluido, en vista de por la naturaleza de un sistema web ocurrirían interrupciones. El trabajo de los datos, se realiza en el servidor para que cada cambio sobre los procesos permanezca almacenado.

Figura 36. Desarrollo de la página para retomar un proceso guardado

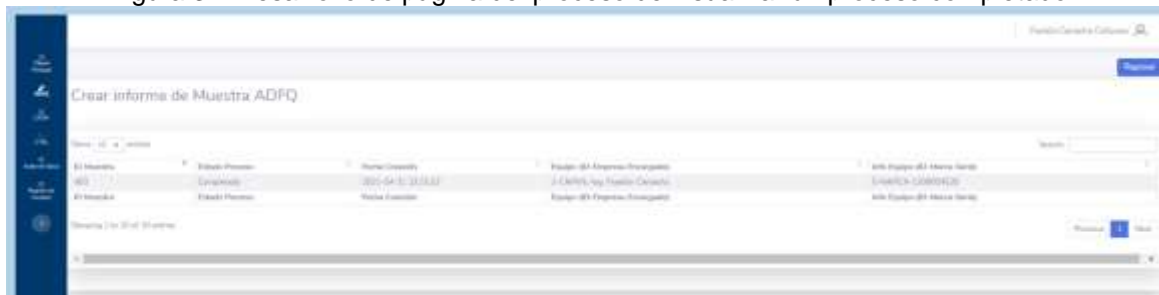


Fuente: elaboración propia

En la última página de visualización de resultados (figura 37), es mostrada una tabla que contiene las muestras, que se han completado para que si el usuario selecciona la muestra que desea mostrar, el sistema presenta una página que contiene el resumen de los resultados del proceso en mención. La página de visualización de

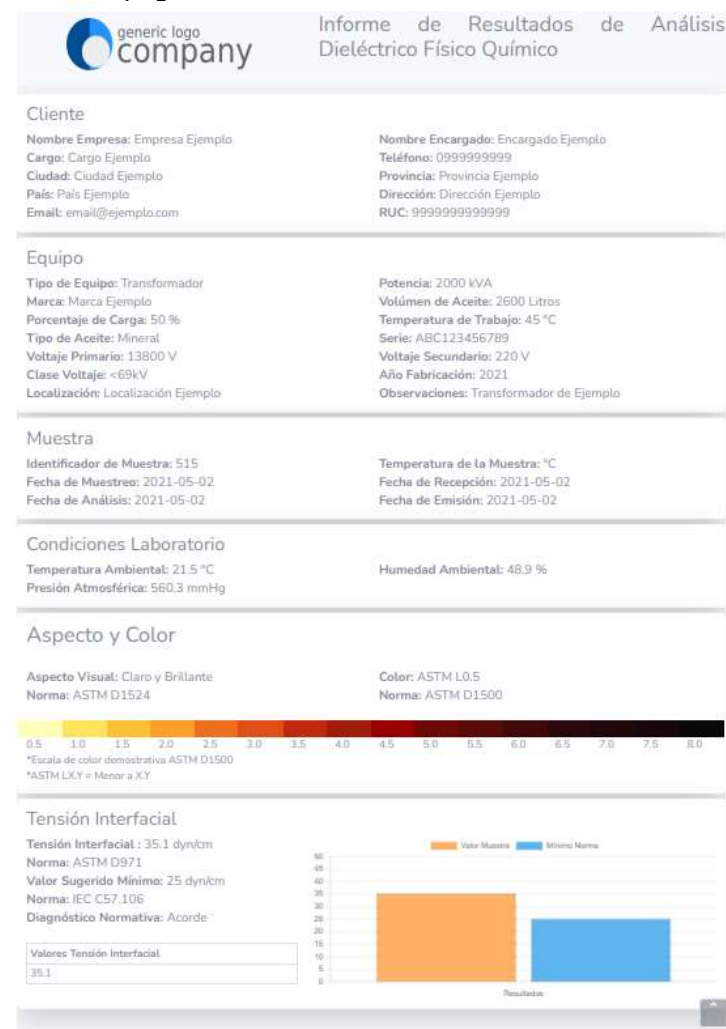
resultados permite la impresión de esta sin, que se muestre las barras de navegación y menús en la figura 38.

Figura 37. Desarrollo de página del proceso de visualizar un proceso completado



Fuente: elaboración propia

Figura 38. Desarrollo página de visualización de resultados ADFQ / CROM / Furanos



Fuente: elaboración propia

Pruebas

Los cuadros 12 - 18 contienen las pruebas de aceptación para la finalización del *Sprint 2*.

Cuadro 12. Pruebas de aceptación *Sprint 2*, caso 1

Sprint	2	
ID, Caso de Prueba	CP-S2-C1	
Requerimiento	Manejo de clientes	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad registrar, eliminar y actualizar equipos en el sistema para el registro de un proceso de análisis dieléctrico-fisicoquímico, cromatográfico y de contenido de furanos.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Abrir un nuevo proceso de registro de resultados	Se muestra una tarjeta de clientes que muestra la lista de clientes registrados	De acuerdo con lo esperado
Registrar un nuevo cliente con el botón "Nuevo Cliente"	Muestra 10 campos de texto para el ingreso de variables de cliente. Permite limpiar los campos o registrar los datos.	Muestra un modal con los 10 campos requeridos del cliente y dos botones de acción: registrar y limpiar. Al registrar recarga la página y muestra el registro en la tabla
Registrar un nuevo cliente con el nombre de un cliente existente	Muestra un error	De acuerdo con lo esperado
Registrar un nuevo cliente con un campo vacío o incompleto	Muestra un error	De acuerdo con lo esperado
Seleccionar un cliente de la tabla	Muestra el detalle del cliente seleccionado y permite eliminar, actualizar o seleccionar el registro	Muestra un modal con los detalles del cliente seleccionado y presenta las opciones de actualizar, eliminar o seleccionar los datos.
Seleccionar un cliente de la tabla, modificar los campos, y posterior actualizarlos	Actualiza los datos ingresados y recarga la tabla de los equipos	Actualiza los datos cambiados y recarga la página para refrescar los datos
Seleccionar un cliente de la tabla y eliminarlo	Elimina el registro y refresca la tabla	De acuerdo con lo esperado
Seleccionar un cliente con equipos registrados de la tabla y eliminarlo	Muestra un error de dependencias existentes	De acuerdo con lo esperado
Sobre un cliente seleccionado pulsar	Muestra el detalle del cliente seleccionado	Muestra un modal con los campos llenos y bloqueados del cliente seleccionado de forma informativa
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Cuadro 13. Pruebas de aceptación *Sprint 2*, caso 2

Sprint	2	
ID, Caso de Prueba	CP-S2-C2	
Requerimiento	Manejo de equipos	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad registrar, eliminar y actualizar equipos de un cliente seleccionado en el sistema para el registro de un proceso de análisis dieléctrico-fisicoquímico, cromatográfico y de contenido de furanos.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Seleccionar un cliente	Se muestra una tarjeta de equipos que muestra la lista de equipos del cliente registrados	De acuerdo con lo esperado
Registrar un nuevo equipo con el botón "Nuevo equipo"	Muestra 15 campos de texto para el ingreso de variables de equipo. Permite limpiar los campos o registrar los datos.	Muestra un modal con los 15 campos requeridos del cliente y dos botones de acción: registrar y limpiar. Al registrar recarga la página y muestra el registro en la tabla
Registrar un nuevo equipo con la serie de un equipo existente	Muestra un error	De acuerdo con lo esperado
Registrar un nuevo equipo con un campo vacío o incompleto	Muestra un error	De acuerdo con lo esperado
Seleccionar un equipo de la tabla	Muestra el detalle del equipo seleccionado y permite eliminar, actualizar o seleccionar el registro	Muestra un modal con los detalles del equipo seleccionado y presenta las opciones de actualizar, eliminar o seleccionar los datos.
Seleccionar un equipo de la tabla, modificar los campos, y posterior actualizarlos	Actualiza los datos ingresados y recarga la tabla de los equipos	Actualiza los datos cambiados y recarga la página para refrescar los datos
Seleccionar un equipo de la tabla y eliminarlo	Elimina el registro y refresca la tabla	De acuerdo con lo esperado
Deseleccionar el cliente	Deselecciona el equipo de forma automática	De acuerdo con lo esperado
Seleccionar un equipo con muestras asociadas de la tabla y eliminarlo	Muestra un error de dependencias existentes	De acuerdo con lo esperado
Sobre un equipo seleccionado pulsar	Muestra el detalle del equipo seleccionado	Muestra un modal con los campos llenos y bloqueados del equipo seleccionado de forma informativa
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Cuadro 14. Pruebas de aceptación *Sprint 2*, caso 3

Sprint	2	
ID, Caso de Prueba	CP-S2-C3	
Requerimiento	Manejo de fechas muestra	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad registrar, eliminar y actualizar las fechas de la muestra en el sistema para el registro de un proceso de análisis dieléctrico-físicoquímico, cromatográfico y de contenido de furanos.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Abrir un nuevo proceso de registro de resultados	Se muestra una tarjeta de fechas que muestra la lista de fechas registrados	De acuerdo con lo esperado
Registrar una nueva fecha con el botón "Nuevos Datos"	Muestra 4 campos de fecha para el ingreso de variables de fechas. Permite limpiar los campos o registrar los datos.	Muestra un modal con los campos requeridos las fechas y dos botones de acción: registrar y limpiar. Al registrar recarga la página y muestra el registro en la tabla
Registrar una fecha futura	Muestra un error	De acuerdo con lo esperado
Registrar con uno o múltiples campos nulos	Muestra un error	De acuerdo con lo esperado
Registrar un nuevo dato sobre uno ya existente	Muestra un error. Permite registrar solo un grupo de fechas	De acuerdo con lo esperado
Seleccionar un registro de fecha de la tabla	Muestra el detalle de las fechas seleccionada y permite eliminar, actualizar o seleccionar el registro	Muestra un modal con los detalles de las fechas seleccionadas y presenta las opciones de actualizar, eliminar o seleccionar los datos.
Seleccionar un registro de fechas de la tabla, modificar los campos, y posterior actualizarlos	Actualiza los datos ingresados y recarga la tabla	Actualiza los datos cambiados y recarga la página para refrescar los datos
Seleccionar un registro de fechas de la tabla y eliminarlo	Elimina el registro y refresca la tabla	De acuerdo con lo esperado
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Cuadro 15. Pruebas de aceptación *Sprint 2*, caso 4

Sprint	2	
ID, Caso de Prueba	CP-S2-C4	
Requerimiento	Manejo de condiciones laboratorio	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad registrar, eliminar y actualizar las condiciones laboratorio en el sistema para el registro de un proceso de análisis dieléctrico-fisicoquímico, cromatográfico y de contenido de furanos.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Abrir un nuevo proceso de registro de resultados	Se muestra una tarjeta de condiciones laboratorio que muestra la lista de condiciones laboratorio registradas	De acuerdo con lo esperado
Registrar una nueva fecha con el botón "Nueva Condición"	Muestra 3 campos de entrada para el ingreso de variables de condiciones laboratorio. Permite limpiar los campos o registrar los datos.	Muestra un modal con los campos requeridos de condiciones laboratorio y dos botones de acción: registrar y limpiar. Al registrar recarga la página y muestra el registro en la tabla
Registrar con uno o múltiples campos nulos	Muestra un error	De acuerdo con lo esperado
Registrar un nuevo dato sobre uno ya existente	Muestra un error. Permite registrar solo una condición	De acuerdo con lo esperado
Seleccionar un registro de condiciones laboratorio de la tabla	Muestra el detalle de las condiciones laboratorio y permite eliminar, actualizar o seleccionar el registro	Muestra un modal con los detalles de las condiciones laboratorio y presenta las opciones de actualizar, eliminar o seleccionar los datos.
Seleccionar un registro de condiciones laboratorio de la tabla, modificar los campos, y posterior actualizarlos	Actualiza los datos ingresados y recarga la tabla	Actualiza los datos cambiados y recarga la página para refrescar los datos
Seleccionar un registro de condiciones laboratorio de la tabla y eliminarlo	Elimina el registro y refresca la tabla	De acuerdo con lo esperado
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Cuadro 16. Pruebas de aceptación *Sprint 2*, caso 5

Sprint	2	
ID, Caso de Prueba	CP-S2-C5	
Requerimiento	Manejo de resultados de análisis dieléctrico-fisicoquímico	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad registrar, eliminar y actualizar los resultados de análisis dieléctrico-fisicoquímico. Comprende resultados de: rigidez dieléctrica, aspecto, color, tensión interfacial, gravedad específica, acidez, humedad y factor de disipación	
Consideraciones Especiales	Debido a los procesos de laboratorio, no se validan de forma específica los datos ingresados en los campos de los resultados, sean de tipo numérico, alfanumérico, nulos o múltiples ingresos.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Abrir un nuevo proceso de registro de resultados	Se muestra una tarjeta de rigidez dieléctrica, aspecto, color, tensión interfacial, gravedad específica, acidez, humedad y factor de disipación que muestra la lista de cada uno de los análisis mencionados registrados	De acuerdo con lo esperado cada modal muestra un análisis similar a los casos de pruebas anteriores.
Registrar un nuevo resultado con el botón "Nuevo Resultado"	Muestra los campos de ingreso para las variables de cada análisis. Permite limpiar los campos o registrar los datos.	Muestra un modal con los campos requeridos y dos botones de acción: registrar y limpiar. Al registrar recarga la página y muestra el registro en la tabla
Seleccionar un registro de resultado de un análisis	Muestra el detalle del análisis seleccionado y permite eliminar, actualizar o seleccionar el registro	Muestra un modal con los detalles del análisis seleccionado y presenta las opciones de actualizar, eliminar o seleccionar los datos.
Seleccionar un registro, modificar los campos y posterior actualizarlos	Actualiza los datos ingresados y recarga la tabla	Actualiza los datos cambiados y recarga la página para refrescar los datos
Seleccionar un registro la tabla de un análisis y eliminarlo	Elimina el registro y refresca la tabla	De acuerdo con lo esperado
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Cuadro 17. Pruebas de aceptación *Sprint 2*, caso 6

Sprint	2	
ID, Caso de Prueba	CP-S2-C6	
Requerimiento	Manejo de resultados de análisis cromatográficos	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad registrar, eliminar y actualizar los resultados de análisis cromatográficos.	
Consideraciones Especiales	Debido a los procesos de laboratorio, no se validan de forma específica los datos ingresados en los campos de los resultados, sean de tipo numérico, alfanumérico, nulos o múltiples ingresos.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Abrir un nuevo proceso de registro de resultados	Se muestra una tarjeta de resultados cromatográficos que muestra la lista de los análisis registrados	De acuerdo con lo esperado un modal muestra un análisis similar a los casos de pruebas anteriores.
Registrar un nuevo resultado con el botón "Nuevo Resultado"	Muestra los campos de ingreso para las variables del análisis cromatográfico. Permite limpiar los campos o registrar los datos.	Muestra un modal con los campos requeridos y dos botones de acción: registrar y limpiar. Al registrar recarga la página y muestra el registro en la tabla
Seleccionar un registro de resultado de un análisis	Muestra el detalle del análisis cromatográfico seleccionado y permite eliminar, actualizar o seleccionar el registro	Muestra un modal con los detalles del análisis seleccionado y presenta las opciones de actualizar, eliminar o seleccionar los datos.
Seleccionar un registro, modificar los campos y posterior actualizarlos	Actualiza los datos ingresados y recarga la tabla	Actualiza los datos cambiados y recarga la página para refrescar los datos
Seleccionar un registro la tabla de un análisis y eliminarlo	Elimina el registro y refresca la tabla	De acuerdo con lo esperado
Registrar un resultado cromatográfico y visualizar el valor de total de gases combustibles	Al registrar un resultado cromatográfico calcula un campo de total de gases combustibles	De acuerdo con lo esperado
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Cuadro 18. Pruebas de aceptación *Sprint 2*, caso 7

Sprint	2	
ID, Caso de Prueba	CP-S2-C7	
Requerimiento	Manejo de resultados de análisis de contenidos de furanos	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad registrar, eliminar y actualizar los resultados de análisis contenidos de furanos	
Consideraciones Especiales	Debido a los procesos de laboratorio, no se validan de forma específica los datos ingresados en los campos de los resultados, sean de tipo numérico, alfanumérico, nulos o múltiples ingresos.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Abrir un nuevo proceso de registro de resultados	Se muestra una tarjeta de resultados contenidos de furanos que muestra la lista de los análisis registrados	De acuerdo con lo esperado un modal muestra un análisis similar a los casos de pruebas anteriores.
Registrar un nuevo resultado con el botón "Nuevo Resultado"	Muestra los campos de ingreso para las variables del análisis de contenidos de furanos. Permite limpiar los campos o registrar los datos.	Muestra un modal con los campos requeridos y dos botones de acción: registrar y limpiar. Al registrar recarga la página y muestra el registro en la tabla
Seleccionar un registro de resultado de un análisis	Muestra el detalle del análisis de contenidos de furanos seleccionado y permite eliminar, actualizar o seleccionar el registro	Muestra un modal con los detalles del análisis seleccionado y presenta las opciones de actualizar, eliminar o seleccionar los datos.
Seleccionar un registro, modificar los campos y posterior actualizarlos	Actualiza los datos ingresados y recarga la tabla	Actualiza los datos cambiados y recarga la página para refrescar los datos
Seleccionar un registro la tabla de un análisis y eliminarlo	Elimina el registro y refresca la tabla	De acuerdo con lo esperado
Ingresar solo el dato de valor de grado de polimerización	Permite el ingreso de un solo campo	De acuerdo con lo esperado
Ingresar solo el dato de valor de contenido de 2-furaldehido	Permite el ingreso de un solo campo y calcula el valor de grado de polimerización	De acuerdo con lo esperado
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Finalización

En la retrospectiva del segundo *Sprint* las operaciones que son llamadas por el usuario, pero ejecutadas en el servidor, se separan en otros directorios por mayor seguridad, se toma en consideración la reutilización de las tarjetas y modales de los ingresos de datos, sin embargo, precisan modificaciones de variables. Los resultados obtenidos son las páginas de manejo de resultados de análisis dieléctrico-fisicoquímicos, cromatográficos y contenido de furanos.

Cada página contiene tres opciones de crear, retomar o ver, en donde se manejarán directamente los clientes, equipos, fechas, condiciones de laboratorio y todos los resultados ingresados. Se logra el guardado correcto en la base de datos, recuperación y visualización de los análisis en mención.

Definición del tercer *Sprint*

El objetivo del tercer *Sprint* es el de desarrollar el módulo de diagnóstico experto en *Python* para que en base a determinados parámetros de los análisis de los ingresos previos sea generado un índice de salud que represente el estado global del transformador. Como alcance el tercer *Sprint* tiene un módulo de Python que contiene la base de conocimiento con reglas expertas y funciones de membresía. Además, de los procesos de fuzzificación y defuzzificación con gráficos de salida para la explicación del proceso de diagnóstico, como resultado final, se obtiene un índice de salud del transformador.

Análisis

La pila del presente *Sprint*, se detalla, a continuación, en el cuadro 19.

Cuadro 19. *Sprint Backlog – Tercer Sprint*

ID	Requerimiento	Prioridad
S3-1	Funciones de membresía, objetos antecedentes, consecuentes y variables universales	Alta
S3-2	Codificación de reglas expertas	Alta
S3-3	Interfaz de comandos de sistema web a sistema experto	Media
S3-4	Defuzzificación, tratamiento y almacenamiento de variables numéricas, lingüísticas y gráficos en la base de datos	Alta

Fuente: elaboración propia

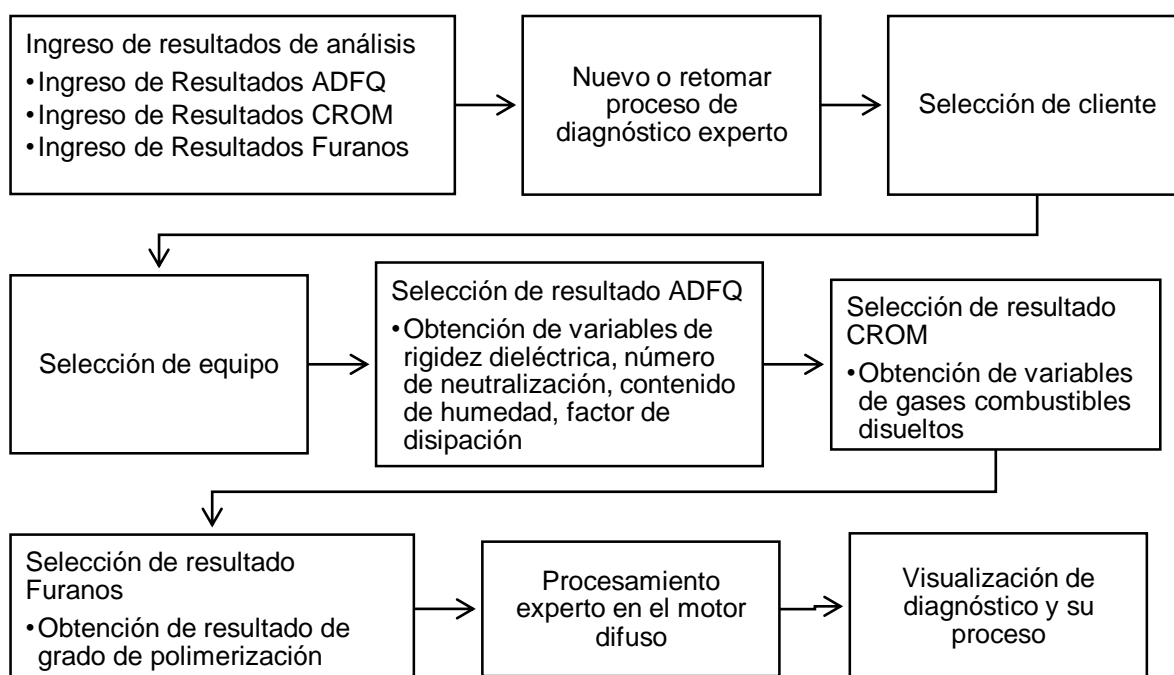
Diseño

En base a las investigaciones de Cerón, Echeverry, et al. (2015), Abu-Elanien et al. (2012) y las consideraciones del criterio de los expertos del laboratorio, se consideran seis variables para el diseño de los sets difusos: rigidez dieléctrica, número de neutralización, contenido de humedad, factor de disipación, gases combustibles disueltos y grado de polimerización. Se crea una tabla de parámetros

de análisis, la cual, contiene las distintas combinaciones de límites de cada variable en base a la clase de voltaje del equipo y las variantes de las pruebas como lo es el caso de rigidez dieléctrica a diferente espaciamiento de electrodos.

Los parámetros son establecidos en base a las normativas ASTM (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales) e IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) correspondientes a cada variable y los estudios previamente mencionados. El proceso de diagnóstico experto, se muestra en la figura 39.

Figura 39. Proceso de ingreso y resultados de diagnóstico experto difuso



Fuente: elaboración propia

El proceso comienza con el ingreso de los diferentes resultados, donde se abarcan tres grupos de procesos: ADFQ, CROM y Furanos. Consiguente, se crea o retoma un diagnóstico y, se procede a la selección del cliente. Una vez seleccionado el cliente, se muestra la lista de equipos del cliente. Seleccionado el equipo, se presentan los análisis completados de cada grupo de muestras. Para que el diagnóstico experto sea procesado es necesario que existan análisis previamente desarrollados de tipo ADFQ que comprenda un mínimo de las cuatro variables

requeridas. Para el grupo CROM, se precisa el valor de gases combustibles disueltos y para el Contenido de Furanos, la variable de grado de polimerización. Cada análisis de cada tipo, se muestra en una pantalla de selección (figura 40) para posterior ser procesados en el motor difuso y una vez culminado el procesamiento, se almacenan los resultados en la base de datos que posterior los datos sean visualizados en el informe experto programado para el *Sprint 4*.

Figura 40. Diseño página de proceso de diagnóstico experto

Nombre Empresa

Nombre y Apellido Usuario

Diagnóstico: ##

Selección cliente

Selección equipo

Selección ADFQ

Selección CROM

Selección furanos

Fuente: elaboración propia

En la figura 41, se observa el modal que muestra el detalle de cualquier resultado seleccionado de las tablas de cada campo requerido para el diagnóstico.

Figura 41. Diseño página de proceso de diagnóstico experto con modal de detalles de selección

The screenshot displays a web interface for an expert diagnostic process. At the top, there are fields for 'Nombre Empresa' and 'Nombre y Apellido Usuario', along with a 'Cancelar' button. The main area is titled 'Diagnóstico: ##'. Below this, there are five sections for selection: 'Selección cliente', 'Selección equipo', 'Selección ADFQ', 'Selección CROM', and 'Selección furanos'. Each section contains a dropdown menu for 'Análisis de Furanos' and a list of 'Resultado 1' through 'Resultado n'. A modal window is open over the 'Selección equipo' section, showing a grid of input fields labeled 'Campo 1' through 'Campo 6' with corresponding 'Detalle 1' through 'Detalle 6' labels. A 'Seleccionar "Detalle"' button is located at the bottom of the modal.

Fuente: elaboración propia

Figura 42. Diseño página de visualización del detalle de un campo previamente seleccionado en el diagnóstico experto difuso incompleto.

The screenshot shows the same web interface as Figure 41, but with a modal window open for the 'Detalle ID Variable Seleccionada'. This modal displays a grid of input fields for 'Detalle 1' through 'Detalle 6' under the labels 'Campo 1' through 'Campo 6'. The 'Selección equipo' section is visible in the background, showing the 'ID Análisis Furanos Seleccionado' dropdown. At the bottom right of the page, there is a 'Procesar Datos de Salud' button.

Fuente: elaboración propia

La presentación de datos sigue el modelo de los análisis en los campos generales de cliente y equipo. A diferencia, se muestran las seis variables de entrada al sistema y en el proceso de diagnóstico, se presenta las imágenes de los conjuntos de membresía con la inferencia en base a los parámetros de entrada. Por último, se considera la presentación del índice de salud y la imagen de salida.

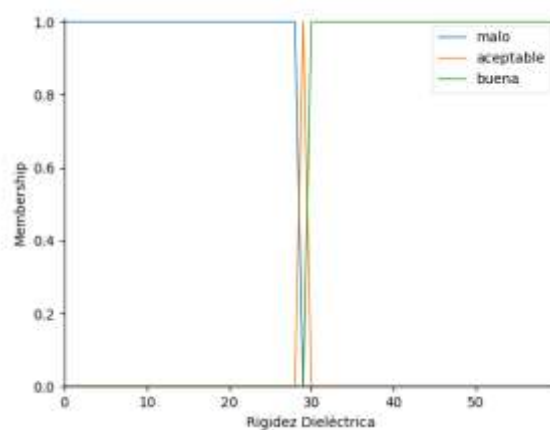
Desarrollo

El desarrollo comienza con la definición de los conjuntos difusos de las variables en base a las investigaciones de Cerón, Echeverry, et al. (2015) para la clase de voltaje mayor a 69 kV y menor a 230 kV, el estudio de Abu-Elanien et al. (2012) para la clase menor a 69 kV y las consideraciones del criterio de los expertos del laboratorio para modificaciones en las dos clases y un desarrollo experimental para mayor a 230 kV. Como referencia de límites, se toman, también, las guías de la normativa IEEE: C57.104-2008, C57.106-2006, C57.12.90-2010, C57.140-2006, C57.152-2013. Además, de la normativa IEC: 60296-2003, 60422-2013, 60599-2007, 61198-1993.

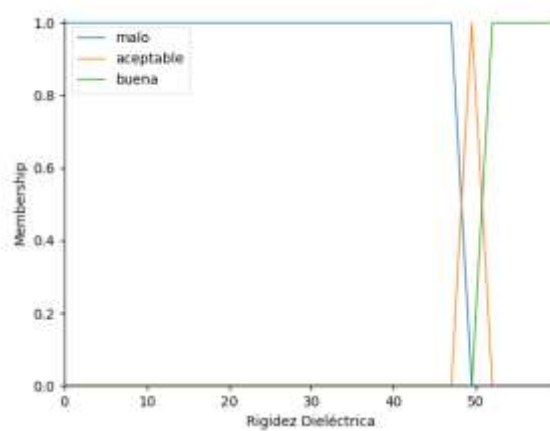
Cuadro 20. Conjunto de funciones de membresía para rigidez dieléctrica

Variable	Rigidez Dieléctrica (kV)
Referencias	ASTM D1816 / IEEE C57.106 / Cerón, Echeverry, et al. (2015) / Abu-Elanien et al. (2012)
Parámetros	Conjunto de Membresías
<69 kV ASTM D1816 1mm	
<69 kV ASTM D1816 2mm	

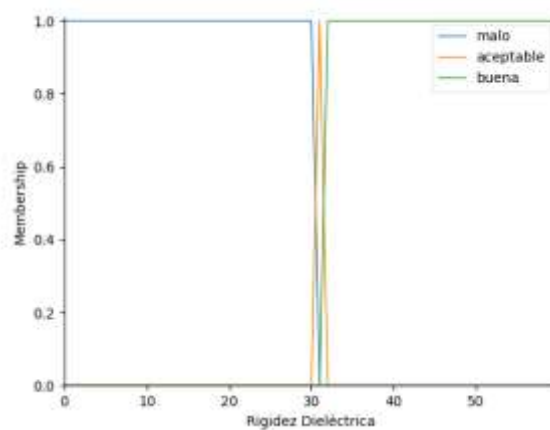
>69 kV <230kV
ASTM D1816 1mm

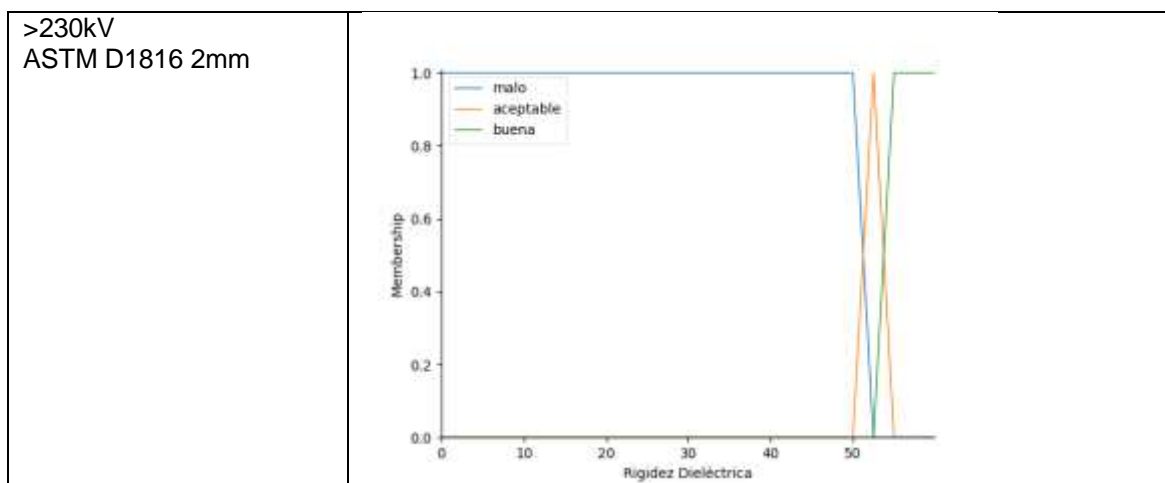


>69 kV <230kV
ASTM D1816 2mm



>230kV
ASTM D1816 1mm

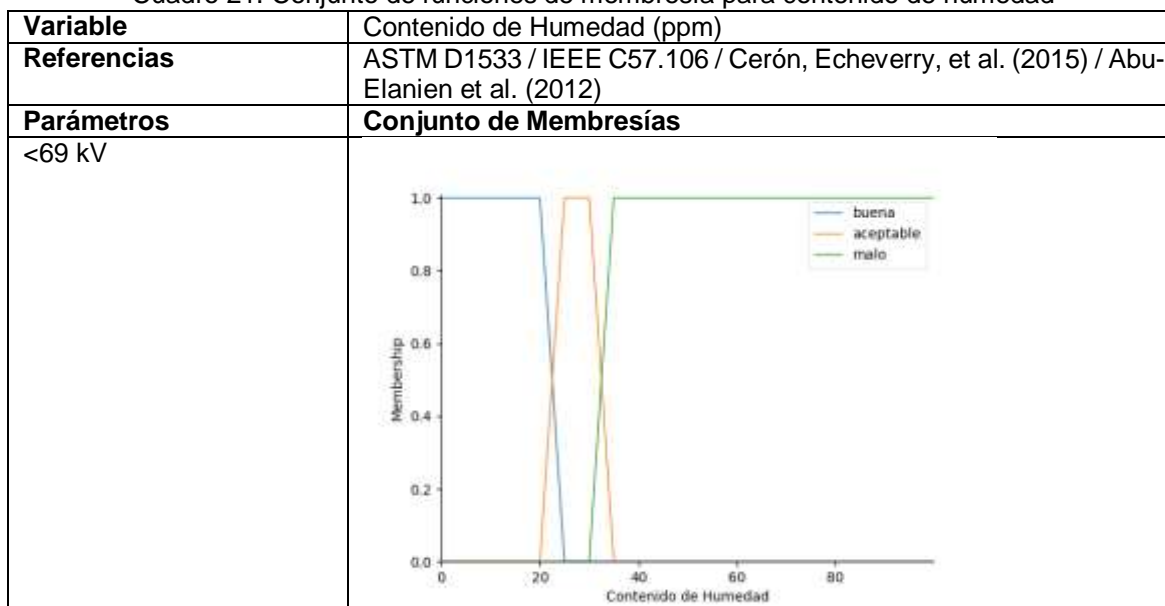


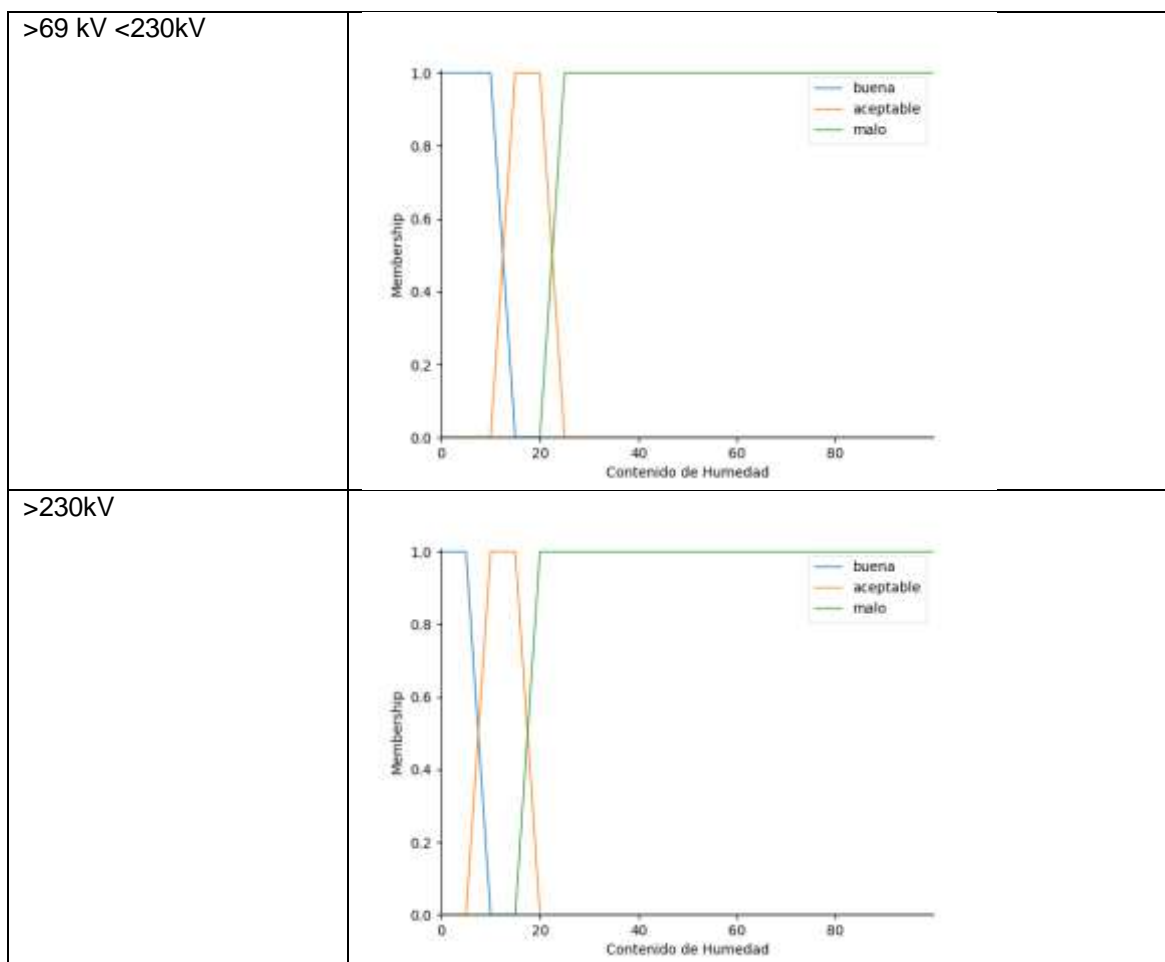


Fuente: elaboración propia

En cuadro 20, se detalla el conjunto de funciones de membresía de la variable de rigidez dieléctrica en consideración de la recopilación del criterio de expertos y las normativas previamente mencionadas.

Cuadro 21. Conjunto de funciones de membresía para contenido de humedad



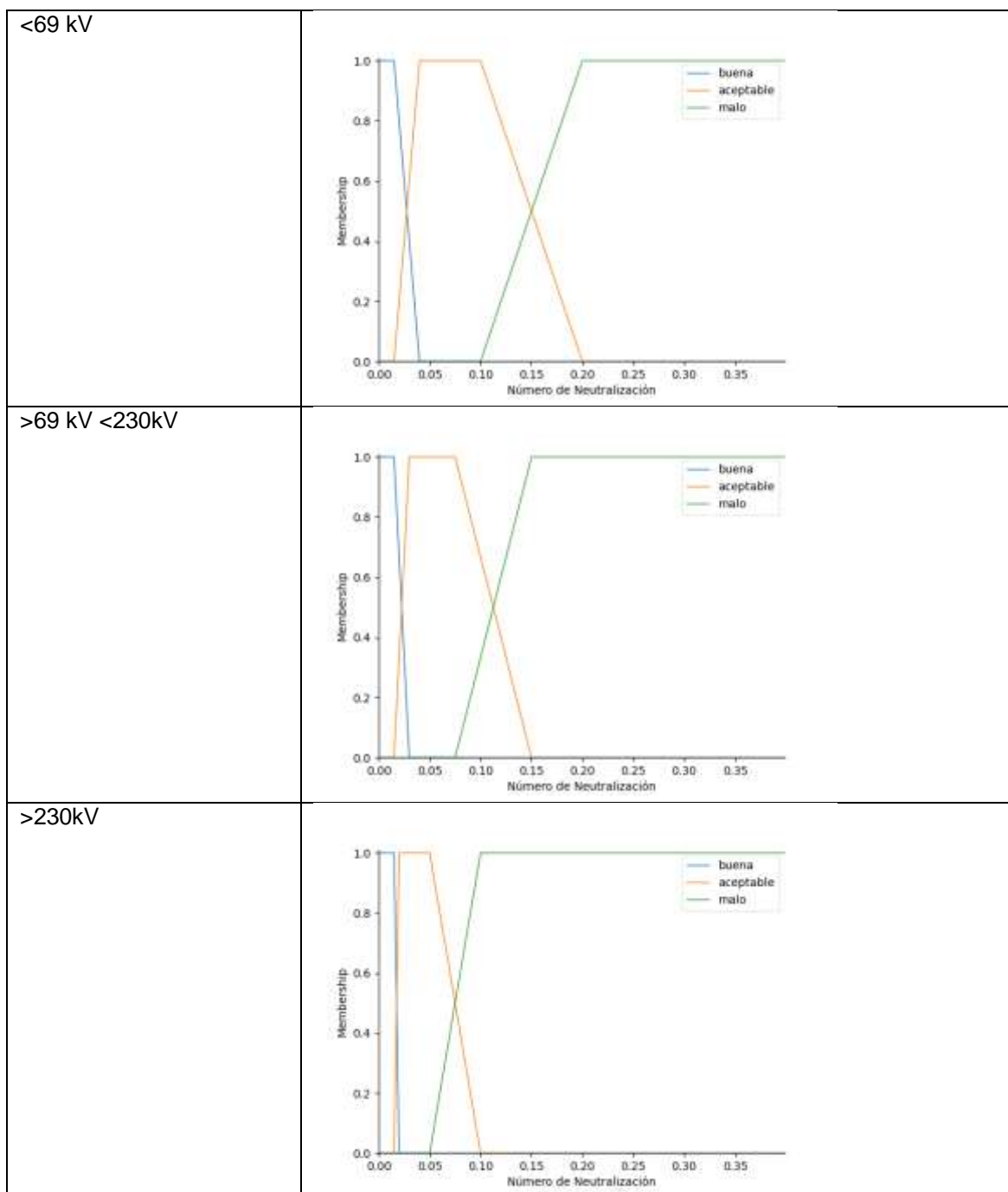


Fuente: elaboración propia

En el cuadro 21, se detalla el conjunto de funciones de membresía de la variable de contenido de humedad en consideración de la recopilación del criterio de expertos y las normativas previamente mencionadas.

Cuadro 22. Conjunto de funciones de membresía para número de neutralización

Variable	Número de neutralización (mg KOH / g)
Referencias	ASTM D974 / IEEE C57.106 / Cerón, Echeverry, et al. (2015) / Abu-Elanien et al. (2012)
Parámetros	Conjunto de Membresías

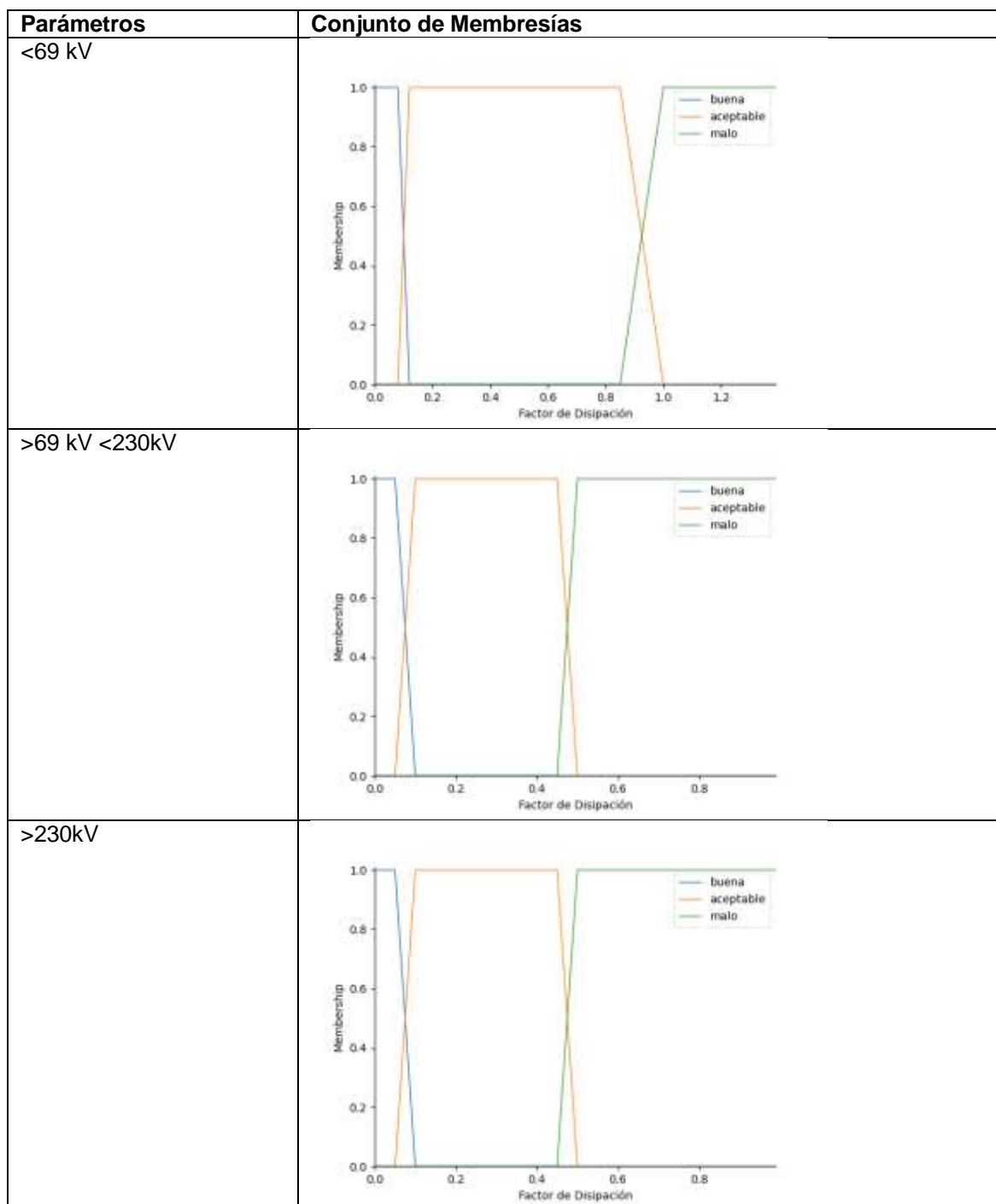


Fuente: elaboración propia

En el cuadro 22, se detalla el conjunto de funciones de membresía de la variable de número de neutralización en consideración de la recopilación del criterio de expertos y las normativas previamente mencionadas.

Cuadro 23. Conjunto de funciones de membresía para factor de disipación

Variable	Factor de Disipación @ 25°C (%)
Referencias	ASTM D924 / IEEE C57.106 / Cerón, Echeverry, et al. (2015) / Abu-Elanien et al. (2012)



Fuente: elaboración propia

En el cuadro 23, se detalla el conjunto de funciones de membresía de la variable de factor de disipación a 25 grados Celsius en consideración de la recopilación del criterio de expertos y las normativas previamente mencionadas.

Cuadro 24. Conjunto de funciones de membresía para gases combustibles disueltos

Variable	Gases Combustibles Disueltos (ppm)
Referencias	ASTM D3612 / IEEE C57.104 / Cerón, Echeverry, et al. (2015) / Abu-Elanien et al. (2012)
Parámetros	Conjunto de Membresías
<69 kV	
>69 kV <230kV	
>230kV	

Fuente: elaboración propia

En el cuadro 24, se detalla el conjunto de funciones de membresía de la variable de gases combustibles disueltos en consideración de la recopilación del criterio de expertos y las normativas previamente mencionadas.

Cuadro 25. Conjunto de funciones de membresía para grado de polimerización

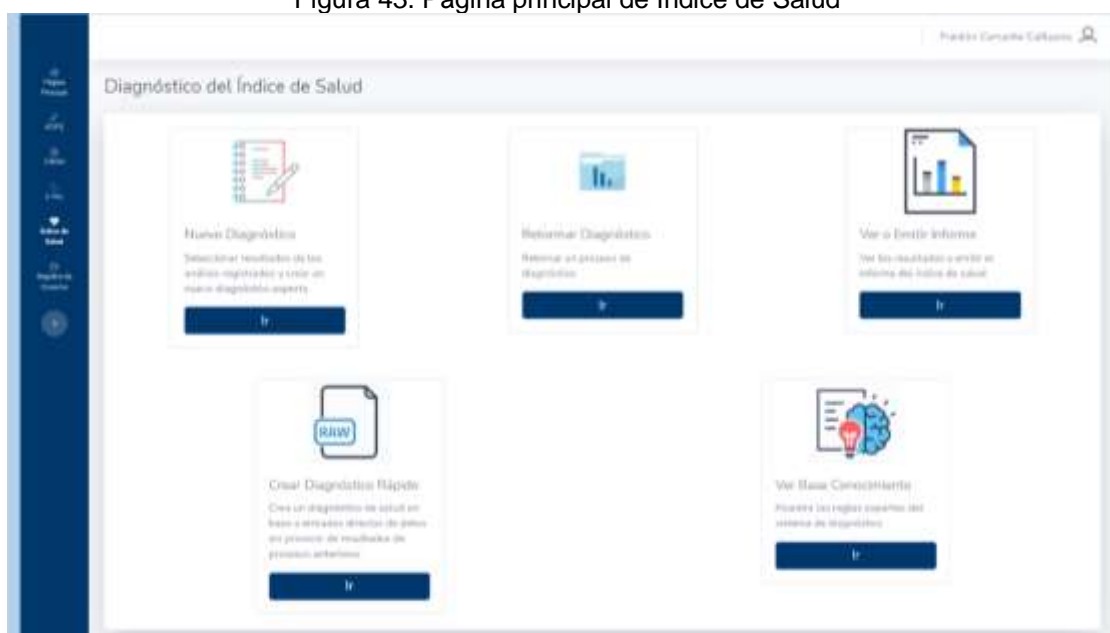
Variable	Grado de polimerización
Referencias	ASTM D5837 / IEEE C57.140 / Cerón, Echeverry, et al. (2015) / Abu-Elanien et al. (2012)
Parámetros	Conjunto de Membresías
<69 kV	
>69 kV <230kV	
>230kV	

Fuente: elaboración propia

En el cuadro 25, se detalla el conjunto de funciones de membresía de la variable de grado de polimerización en consideración de la recopilación del criterio de expertos y las normativas previamente mencionadas.

La interfaz de usuario precisa de una interfaz sencilla de selección de resultados de los análisis previos necesarios para la creación del índice de salud con el sistema experto, en las figuras 43 a 46, se aprecian las páginas de la interfaz para el procesamiento y salida del sistema experto difuso desarrollado.

Figura 43. Página principal de Índice de Salud



Fuente: elaboración propia

En la figura 44, se muestra un proceso con datos seleccionados antes de ser procesados.

Figura 44. Página nuevo diagnóstico de Índice de Salud, datos seleccionados

Fuente: elaboración propia

Cuadro 27. Pruebas de aceptación *Sprint 3*, caso 2

Sprint	3	
ID, Caso de Prueba	CP-S3-C2	
Requerimiento	Reglas Expertas	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad comprobar la similitud y comparación de las reglas expertas del sistema difuso.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Abrir la página de “Ver base conocimiento” y comparar las reglas mostradas con la lista de la investigación de Abu-Elanien et al. (2012).	Reglas codificadas e interpretadas de acorde a la investigación	De acuerdo con lo esperado. Se aplican las mismas reglas para todas las clases y tipos, la variación proviene de los conjuntos difusos.
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master - Stakeholders</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Cuadro 28. Pruebas de aceptación *Sprint 3*, caso 3

Sprint	3	
ID, Caso de Prueba	CP-S3-C3	
Requerimiento	Nuevo y retoma de proceso de diagnóstico	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad seleccionar los resultados de los análisis previos de un determinado equipo y cliente para dar proceso al diagnóstico experto en el motor difuso.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Abrir la página de nuevo diagnóstico. Seleccionar un cliente, un equipo y cada análisis de cada categoría	El sistema muestra la lista de clientes, al seleccionar uno, permite ver sus datos y proceder con la selección. Al seleccionar el cliente, se muestra la lista de equipos con el mismo proceso de cliente y posterior para cada grupo de los 3 análisis.	De acuerdo con lo esperado. El sistema muestra la información en modales para la selección y corroboración de datos.
Clic sobre cada campo seleccionado para ver el detalle.	Al hacer clic sobre el campo seleccionado de cliente, equipo, ADFQ, CROM y furanos muestra el detalle de la información seleccionada.	De acuerdo con lo esperado.
Abrir la página de retomar diagnóstico	Muestra una lista de los diagnósticos incompletos	De acuerdo con lo esperado.
Intentar retomar un proceso completado	Muestra un error y no permite proceder	De acuerdo con lo esperado.
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Cuadro 29. Pruebas de aceptación *Sprint* 3, caso 4

Sprint	3	
ID, Caso de Prueba	CP-S3-C4	
Requerimiento	Nuevo proceso de diagnóstico rápido	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad guardar los datos del índice de salud rápido en base a los parámetros mínimos necesarios para el diagnóstico.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Abrir la página de “nuevo diagnóstico rápido”.	El sistema muestra los campos a ingresar	De acuerdo con lo esperado.
Ingresar datos de un resultado conocido y clic en “procesar”	El sistema guarda los resultados.	De acuerdo con lo esperado. El sistema muestra un diálogo de espera mientras, se procesa el resultado y al finalizar almacena el resultado en la base de datos conjunto a los parámetros de ingreso.
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Finalización

En la retrospectiva del tercer *Sprint* el sistema experto codificado en *Python*, dada la versatilidad del lenguaje, permite la codificación rápida de cambios nuevos. En adición, la base de conocimiento, se permite modificar a nivel de código conjunto con un experto del laboratorio y el programador por la delicadeza de los resultados arrojados. Los resultados obtenidos son cinco páginas para el manejo del diagnóstico experto que abarcan: el procesamiento de los datos ingresados previamente en los procesos ADFQ, CROM y Furanos, la retoma de procesos incompletos, el esquema de visualización del informe experto a ser desarrollado en el siguiente *Sprint*, una página que permite realizar un diagnóstico rápido con los datos mínimos necesarios y una página para visualizar las reglas expertas codificadas en el motor difuso. Por último, se constata el funcionamiento del motor difuso al visualizar los conjuntos de funciones de membresía, las reglas expertas y el procesamiento de los resultados.

Definición del cuarto *Sprint*

El objetivo del cuarto *Sprint* es el de desarrollar las páginas de visualización de resultados del diagnóstico experto, que contenga un resumen del estado de los

equipos y el detalle del proceso de diagnóstico experto con sus resultados. Como alcance el cuarto *Sprint* tiene una página de resumen que agrupa por categoría de valor lingüístico del índice de salud del estado de los equipos, otra página de visualización de un informe detallado de los datos de un diagnóstico, el resultado del índice de salud y el proceso gráfico de cada variable que empleo el sistema difuso en la determinación de dicho estado. En adición, se desarrollan las secciones de visualización del diagnóstico rápido en la misma página de ingreso para agilizar la previsualización de resultados.

Análisis

La pila del presente *Sprint*, se detalla, a continuación, en el cuadro 30.

Cuadro 30. *Sprint Backlog* – Cuarto *Sprint*

ID	Requerimiento	Prioridad
S4-1	Página de informe de diagnóstico experto	Muy alta
S4-2	Página de informe de diagnóstico experto rápido	Alta
S4-3	Página de resumen de estado de equipos	Baja

Fuente: elaboración propia

Diseño

Se realiza el desarrollo en base a la prioridad mencionada en la pila de *Sprint*, el cual, define a la página de visualización del informe de diagnóstico experto como el de mayor importancia. En base a los resultados del *Sprint* previo, se diseña la presentación de los resultados en la página de visualización de diagnóstico experto con estructura similar a los informes de los análisis previos salvo la presentación del proceso de diagnóstico que incluye las imágenes e interpretaciones de cada variable y la salida del índice de salud numérica, lingüística, porcentual y gráfica (figura 46).

Figura 46. Diseño página de visualización de diagnóstico experto difuso.

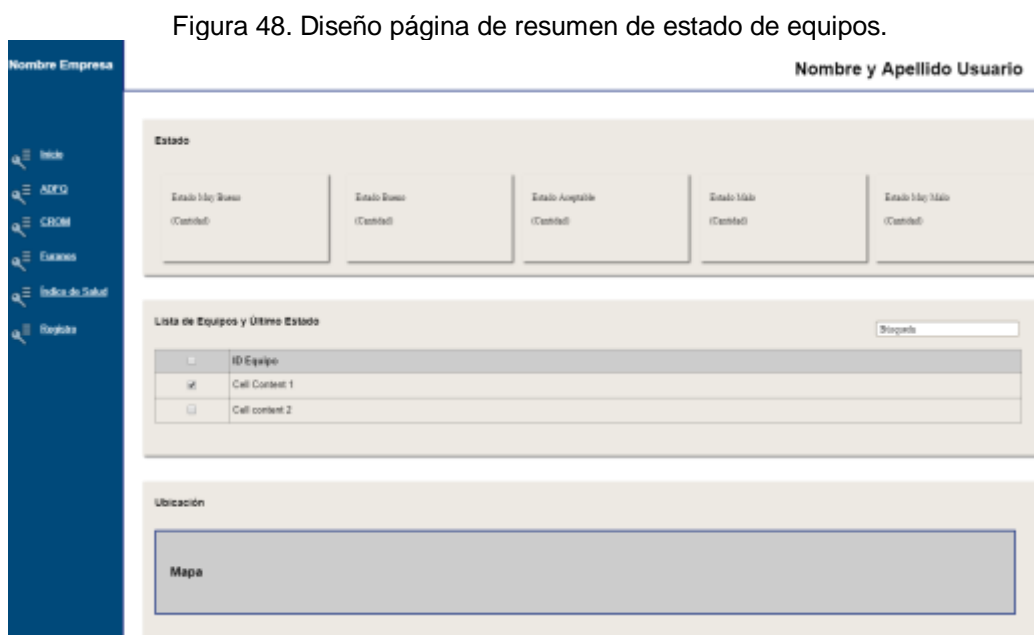
Fuente: elaboración propia

A continuación, en la figura 47, se presenta el diseño de las secciones de visualización de resultados del diagnóstico experto rápido, que se incluyen en la misma página de ingreso de resultados, pero aparecen únicamente si, se ha procesado por completo el diagnóstico.

Figura 47. Diseño página de visualización de diagnóstico rápido.

Fuente: elaboración propia

La figura 48, muestra el diseño contemplado para la página de inicio, que contiene la cantidad de equipos por cada categoría lingüística del estado de salud. Además, se incluye la lista de los equipos con su último estado y la ubicación en el caso de haber registrado las coordenadas de localización.



Fuente: elaboración propia

Desarrollo

La página del informe experto, se divide en tres secciones: información, índice de salud y proceso. En la primera, se incluye el detalle de la información de los análisis empleados para el diagnóstico, sus identificadores únicos y los valores de las seis variables, así como, el detalle del diagnóstico y la fecha de procesamiento. Dentro de la segunda sección dedicada al de índice de salud, se muestra el resultado final como se observa en la figura 49, donde se incluye los resultados numéricos del índice, una imagen de la simulación del resultado en el conjunto de membresías para el índice de salud y un gráfico que representa el porcentual de la vida útil mantenida y degradada.

Figura 49. Desarrollo de página de informe experto sección índice de salud.

Resultado Diagnóstico Experto Difuso

Índice de Salud: 0.112963

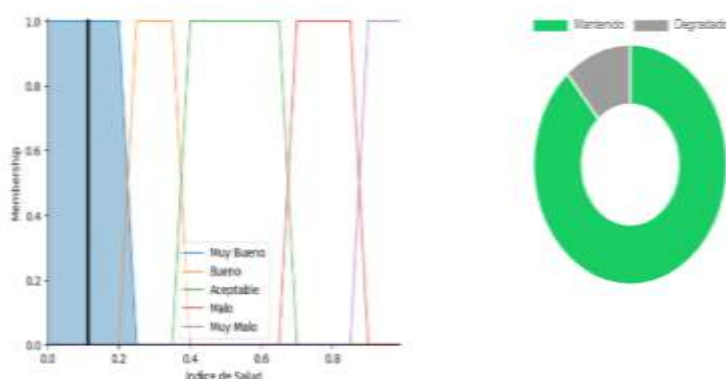
- El índice de salud es una representación global del estado del equipo en base a los análisis realizados. El valor de 0 representa un transformador totalmente nuevo, mientras que 1 a uno que ha llegado al final de su vida útil.

Índice de Salud (Lingüístico): Muy Bueno

- El valor lingüístico representa el valor numérico evaluado en las funciones de membresía del gráfico

Índice de Salud (%): 88.7037

- El índice de salud porcentual representa el nivel de vida útil del activo.

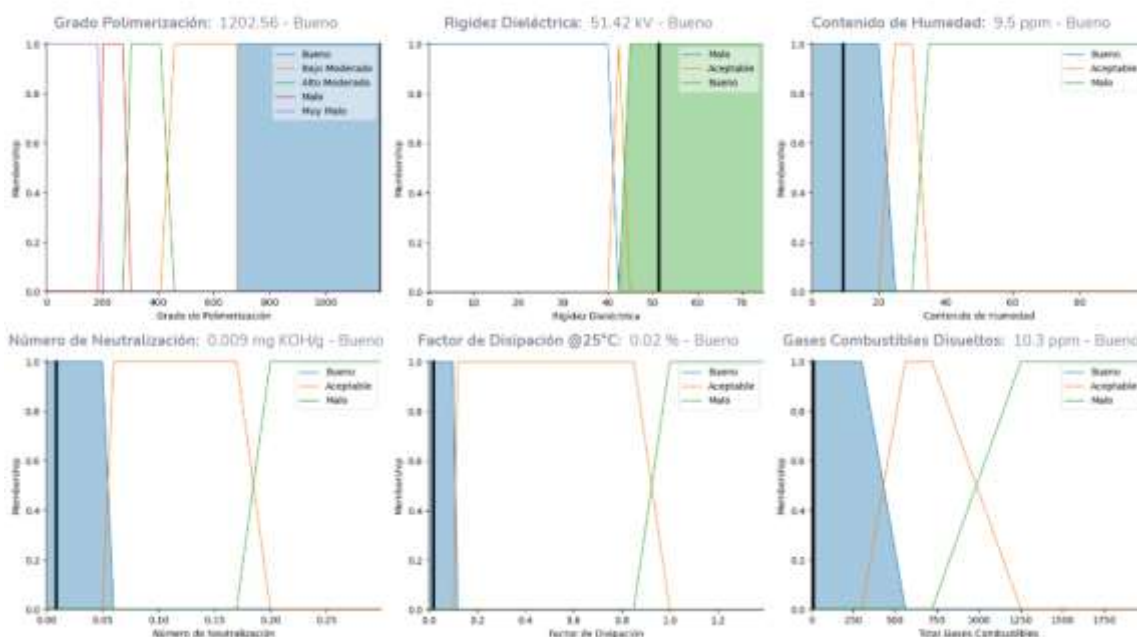


Fuente: elaboración propia

En la siguiente sección, mostrada en la figura 50, se presentan las imágenes de las simulaciones de cada variable en el conjunto de membresías respectivo, el nombre de la variable, su valor de entrada y su valor lingüístico de salida. La visualización de esta simulación permite corroborar la coherencia del sistema experto de la salida única en el índice de salud con los datos y procesamiento de entrada.

Para realizar los gráficos el sistema posiciona los valores de las variables de ingreso en cada conjunto de membresía y rellena con color el porcentaje del área que ha sido activada con dicho valor. Adicionalmente, se incorpora tanto el valor numérico como el valor lingüístico del resultado por variable para que el usuario conozca como se determina el determinado índice en proceso.

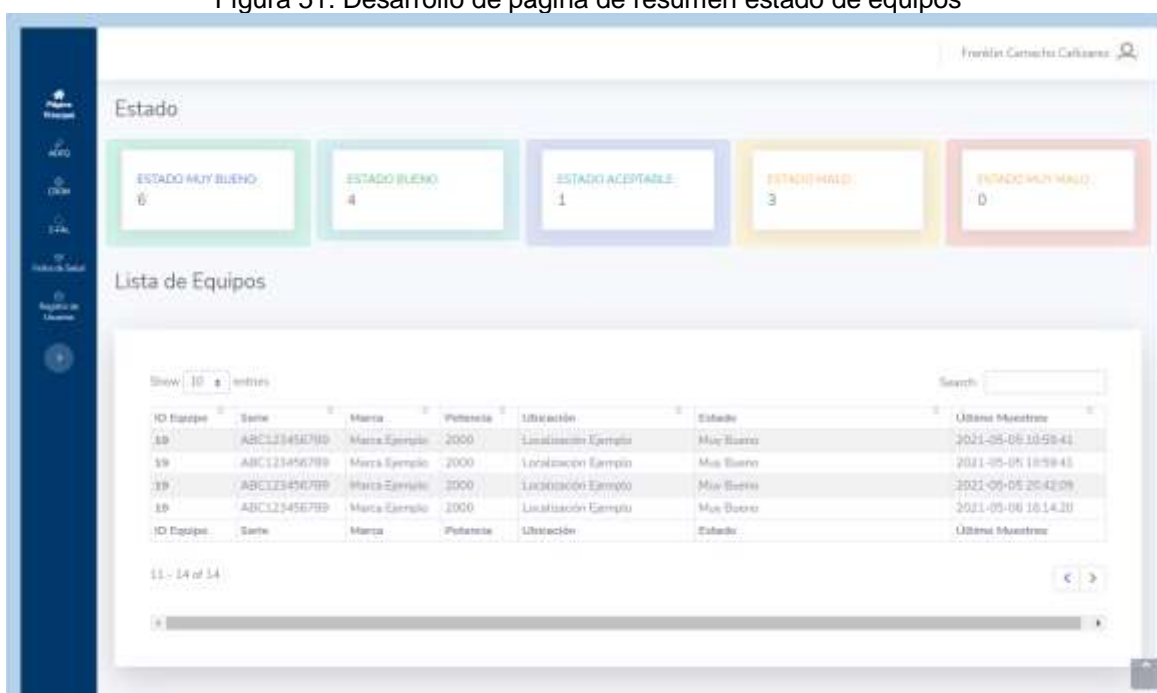
Figura 50. Desarrollo de página de informe experto sección proceso de diagnóstico
Proceso de Diagnóstico



Fuente: elaboración propia

La página principal contiene la cantidad de equipos diagnosticados en cada estado y una lista de los mismos con su información más relevante y fecha de último muestreo para el seguimiento (figura 51).

Figura 51. Desarrollo de página de resumen estado de equipos



Fuente: elaboración propia

Pruebas

Los cuadros 31 - 33 contienen las pruebas de aceptación para la finalización del *Sprint 4*.

Cuadro 31. Pruebas de aceptación *Sprint 4*, caso 1

Sprint	4	
ID, Caso de Prueba	CP-S4-C1	
Requerimiento	Informe de diagnóstico experto	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad emitir un informe de índice de salud en base a los análisis previos realizados	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Abrir la página de “índice de salud” y clic en “ver o emitir informe”.	El sistema muestra la lista de los diagnósticos completados	De acuerdo con lo esperado.
Seleccionar un informe de la lista	El sistema muestra el informe del diagnóstico seleccionado	De acuerdo con lo esperado. Se presentan tres secciones: información de entrada, índice de salud y proceso de diagnóstico. Se presentan las imágenes de inferencias y valores tanto numéricos como lingüísticos.
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Cuadro 32. Pruebas de aceptación *Sprint 4*, caso 2

Sprint	4	
ID, Caso de Prueba	CP-S4-C2	
Requerimiento	Nuevo proceso e informe de diagnóstico rápido	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad emitir un informe rápido de índice de salud en base a los parámetros mínimos necesarios para el diagnóstico.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Abrir la página de “nuevo diagnóstico rápido”.	El sistema muestra los campos a ingresar	De acuerdo con lo esperado.
Ingresar datos de un resultado conocido y clic en “procesar”	El sistema muestra los resultados.	De acuerdo con lo esperado. El sistema muestra un diálogo de espera mientras, se procesa el resultado y al finalizar en la misma página muestra los resultados de forma igual en las dos secciones del informe previo, salvo la sección de información que solo bloquea los mismos campos de ingreso.
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Cuadro 33. Pruebas de aceptación *Sprint* 4, caso 3

Sprint	4	
ID, Caso de Prueba	CP-S4-C3	
Requerimiento	Resumen de estado de equipos	
Descripción	Caso de prueba que tiene como finalidad visualizar un resumen del estado de los equipos que cuentan con un informe de diagnóstico experto.	
Procedimiento	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
Clic en el menú de navegación lateral en “Página Principal”	Muestra una página con una sección de contadores por cada grupo de estado según el índice de salud. Muestra una sección de la lista de los equipos y su último estado – fecha de muestreo.	De acuerdo con lo esperado. Se incluye un mapa que muestra la ubicación del equipo si, se definió la geolocalización al momento de registrar el equipo del cliente.
Responsable	<i>Product Owner – Scrum Master</i>	

Fuente: modificado a partir de (Banda, 2019)

Finalización

En la retrospectiva del cuarto *Sprint* la presentación gráfica de los resultados incrementa la facilidad de interpretación. Adicionalmente, el informe experto al presentar el proceso de diagnóstico permite al usuario corroborar la coherencia de los análisis individuales con el índice de salud global. Los contadores de la página de resumen permiten conocer el estado global agrupado de todos los equipos registrados a modo de supervisión. Los resultados obtenidos son una página de resumen de estado de equipos, una página de visualización del informe experto y las secciones de informe del diagnóstico experto rápido.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo, se detalla como primer punto la comparación de los resultados del sistema experto desarrollado con los resultados de las investigaciones, que se toman como base. Además, el siguiente punto resumen los resultados de las encuestas aplicadas tanto a los especialistas de diagnóstico de laboratorio, así como, a expertos en informática para validar el sistema de forma global.

3.1. Comparación de resultados

Con base en la investigación de Abu-Elanien et al. (2012), se comparan los resultados de treinta transformadores listados en la investigación para determinar la precisión del sistema experto desarrollado para la clase de equipos con un voltaje menor o igual a 69000 voltios, que se aprecia en el cuadro 34.

La abreviatura de los campos, se detalla: FP para factor de potencia, BDV para rigidez dieléctrica, DCG para el total de gases combustibles, DP representa el grado de polimerización, y adicionalmente, se incluyen las abreviaturas del índice de salud: MB para muy bueno, B para bueno, A para aceptable, M para malo y MM para muy malo.

El grado de polimerización es obtenido a través de la fórmula presentada en la investigación de Cerón, Echeverry, et al. (2015), que se detalla:

Figura 52. Ecuación obtención grado polimerización de transformadores con papel kraft

$$DP = \frac{1.51 - \log_{10}(2FAL_{ppm})}{0.0035} \text{ [ppm]}$$

Fuente: tomado a partir de Cerón, Echeverry, et al. (2015)

Las investigaciones mencionadas contienen la variable de 2-fal, que se transforma para el sistema desarrollado en grado de polimerización a través de la fórmula.

Cuadro 34. Comparación de índice de salud para la clase ≤69 kV

ID	Año	Humedad (ppm)	Acidez (mg KOH/g)	BDV 1mm (kV)	FP 25°C (%)	DCG (ppm)	DP	Índice de Salud Abu-Elanien et al. (2012)		Índice de Salud Sistema Desarrollado	
1	1980	21.7	0.024	32.5	0.075	483	450.14	0.36	B	0.305	B
2	1980	26.9	0.098	40.5	0.894	254	484.88	0.3	B	0.300	B
3	1980	14.5	0.033	58	0.14	78	598.57	0.3	B	0.300	B
4	1980	21.2	0.226	48.7	0.424	215	219.22	0.78	M	0.775	M
5	2000	10	0.01	75	0.111	126	780.52	0.2	MB	0.203	MB
6	1981	15.5	0.075	71	0.143	38	510.2	0.3	B	0.300	B
7	1981	16.8	0.167	70.1	0.255	149	462.25	0.3	B	0.300	B
8	1980	15	0.092	67.8	0.211	28	477.47	0.3	B	0.300	B
9	1980	17	0.035	62.7	0.113	9	625.08	0.22	MB	0.221	MB
10	1981	30	0.088	37.6	0.353	197	576.75	0.3	B	0.300	B
11	1970	16.2	0.181	25.5	0.201	35	162.14	0.94	MM	0.932	MM
12	1980	15	0.155	37.5	0.182	53	184.93	0.93	MM	0.929	MM
13	1980	16.8	0.115	25.6	0.174	78	150.77	0.94	MM	0.932	MM
14	1980	15	0.21	57.2	0.22	53	195.59	0.83	M	0.818	M
15	1980	27.6	0.089	30.4	0.128	336	228.78	0.78	M	0.775	M
16	1980	23.5	0.106	45.8	0.207	30	608.51	0.3	B	0.300	B
17	1980	24.8	0.012	29.9	0.068	504	367.05	0.53	A	0.525	A
18	1980	23.6	0.07	39.2	0.203	22	517.43	0.3	B	0.300	B
19	1980	30.5	0.073	28.7	67	30	89.74	0.94	MM	0.932	MM
20	1980	18.4	0.063	64.5	0.243	69	666.83	0.3	B	0.300	B
21	1980	21.1	0.019	28.4	0.025	144	916.84	0.15	MB	0.147	MB
22	1981	8.1	0.01	66.9	0.042	71	803.15	0.11	MB	0.112	MB
23	1980	19.6	0.216	41.1	0.264	48	180.75	0.94	MM	0.932	MM
24	2000	6	0.01	67.6	0.126	427	744.83	0.3	B	0.300	B
25	1981	18.4	0.152	37.2	0.299	81	415.17	0.51	A	0.509	A
26	1997	11.1	0.032	67.2	0.089	119	830.84	0.11	MB	0.112	MB
27	1980	21.5	0.147	60.8	0.938	168	441.77	0.42	A	0.418	A
28	1986	7.5	0.16	70.1	0.448	10	780.52	0.3	B	0.300	B
29	1981	13	0.091	51.6	0.369	8	572.81	0.3	B	0.300	B
30	1981	35.7	0.229	41.4	0.639	24	423.03	0.48	A	0.486	A

Fuente: elaboración propia

El cuadro 35 contiene el número de diagnósticos agrupado por categoría que provienen tanto de la investigación mencionada como del sistema experto desarrollado. La cantidad en diferencia de los diagnósticos es comparada con el número total de pruebas realizadas para calcular la similitud del diagnóstico global en contraste con las investigaciones.

Cuadro 35. Cálculo de diferencia de diagnósticos resultantes de la comparación de sistemas expertos clase ≤ 69 kV

	Muy Bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Muy Malo	Total
Totales Sistema Experto Desarrollado	5	13	4	3	5	30
Totales Investigación Abu-Elanien et al. (2012)	5	13	4	3	5	30
Diferencia Diagnósticos	0	0	0	0	0	0
Similitud diagnóstico global						100.00%

Fuente: elaboración propia

El sistema desarrollado presenta para la clase menor a 69 kV una similitud de diagnóstico del 100 por ciento, en donde el índice de salud calculado numérico presenta variaciones menores a 0.1 que transformado e interpretado en el conjunto de las funciones de membresía del índice de salud no representan un cambio apreciable para el diagnóstico. Dependiente del caso y de la base de parametrización de diagnóstico por variable, se causa variación de la interpretación del sistema, normalmente con tendencia a ser calificado ligeramente más degradado, se interpreta que la parametrización y conjuntos de membresía son más exigentes.

Una vez realizada la verificación de la clase menor a 69 kV, se procede con la comparación con el estudio de Cerón, Echeverry, et al. (2015), para la clase mayor a 69 kV y menor o igual a 230 kV se observa en el cuadro 36. La descripción de los campos y abreviaturas sigue el patrón explicado para la comparación anterior.

Cuadro 36. Comparación de índice de salud para la clase >69 kV ≤230 kV

ID	Año	Humedad (ppm)	Acidez (mg KOH/g)	BDV 1mm (kV)	FP 25°C (%)	DCG (ppm)	DP	Índice de Salud Cerón, Echeverry, et al. (2015)		Índice de Salud Sistema Desarrollado	
1	1992	11	0.024	57	0.000	792	283.13	0.789	M	0.789	M
2	1992	10	0.02	59	0.000	830	242.85	0.796	M	0.796	M
3	1995	6	0.035	58	0.006	12	457.11	0.395	B	0.269	B
4	1992	6.7	0.038	49.4	0.01	871	293.01	0.758	M	0.760	M
5	1994	6.7	0.005	57.5	0.000	674	381.19	0.525	A	0.525	A
6	1992	3.9	0.129	15.9	0.5554	975	364.56	0.637	A	0.630	A
7	1992	1	0.058	56.7	0.101	1113	259.56	0.876	M M	0.875	MM
8	1995	10.8	0.02	41.5	0.000	819	281.37	0.794	M	0.794	M
9	1995	13.4	0.009	56.2	0.014	1094	410.36	0.65	A	0.649	A
10	1995	11.9	0.009	57.6	0.025	157	655	0.14	M B	0.112	MB
11	1992	24.9	0.131	40.1	0.3511	1067	344.18	0.663	A	0.674	A
12	1994	4.9	0.083	11.1	0.4261	40426	401.18	0.769	M	0.767	M
13	1994	26.8	0.074	10.7	0.3691	54859	458.8	0.62	A	0.526	A
14	1996	8.6	0.019	46.3	0.000	711	295.56	0.702	M	0.709	M
15	1992	19.8	0.11	29	0.87	287	319.43	0.563	A	0.530	A
16	1992	15.5	0.062	34.3	0.0264	1161	418.14	0.665	A	0.530	A
17	1994	14.1	0.02	44.5	0.000	788	320.44	0.549	A	0.555	A
18	1996	8.6	0.019	46.3	0.000	233	317.63	0.539	A	0.541	A

Fuente: elaboración propia

En el cuadro 37, se resume los resultados de igual manera que la clase previa, en el cuadro 36, se aprecia la diferencia de cálculo del índice numérico para la clase que es menor a 0.15, en su mayoría para colocar los resultados en la clase inmediata superior. Se denota la tendencia del sistema a seguir la clasificación empleada para la clase menor a 69 kV, pero basado en los parámetros de la clase de mayor a 69 kV y menor o igual a 230 kV. Se comparte entre las dos clases la parametrización subjetiva de expertos presentadas por las investigaciones en las funciones de membresía de rangos: muy bueno, bueno y aceptable. Sin embargo, para los rangos de: malo y muy malo los parámetros, se tornan más exigentes dada la normativa y criterio de expertos.

Cuadro 37. Cálculo de diferencia de diagnósticos resultantes de la comparación de sistemas expertos clase $>69 \text{ kV} \leq 230 \text{ kV}$

	Muy Bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Muy Malo	
Totales Sistema Experto Desarrollado	1	1	9	6	1	18
Totales Investigación Cerón, Echeverry, et al. (2015)	1	1	9	6	1	18
Diferencia Diagnósticos	0	0	0	0	0	0
Similitud diagnóstico global						100.00%

Fuente: elaboración propia

Se presenta una similitud de diagnóstico del 100% en contraste con la investigación de Cerón, Echeverry, et al. (2015), sin embargo, el índice de salud numérico difiere hasta en 0.15 en las categorías muy bueno y bueno, por lo que solamente un experto en conjunto con el programador introducen los cambios en los parámetros y base de conocimiento, estos afectan a todo el conjunto de membresías y el índice global.

Para la clase mayor a 230 kV, no se hallan estudios similares, los cuales, proporcionen un índice de salud comparable ni los datos suficientes de todas las variables, que se precisan para el procesamiento del sistema. En el cuadro 38, se ingresan resultados creados en base a la normativa vigente uno por categoría esperada de índice de salud lingüístico y, se expresa el resultado esperado por parte de un grupo de expertos del laboratorio a manera de comparación en base a la encuesta realizada, que se aprecia en el anexo 2.

Los resultados de la encuesta aplicada en el anexo 2 a los especialistas de diagnóstico del laboratorio, se detallan en el cuadro 38, donde en base al número total de encuestados y las respuestas, se calcula el porcentaje de concordancia sobre la categoría del diagnóstico.

Cuadro 38. Resultados de la encuesta aplicada a tres especialistas del laboratorio para equipos de la clase $>230 \text{ kV}$

ID	Muy Bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Muy Malo
1	100.00%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	33.33%	66.67%	0.0%	0.0%	0.0%
3	0.0%	33.33%	66.67%	0.0%	0.0%
4	0.0%	0.0%	33.33%	66.67%	0.0%
5	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.00%

Fuente: elaboración propia

Los criterios seleccionados para el cuadro 39 de los expertos, son aquellos que obtuvieron la mayoría en porcentaje.

Cuadro 39. Comparación de índice de salud para la clase >230 kV

ID	Humedad (ppm)	Acidez (mg KOH/g)	BDV 1mm (kV)	FP 25°C (%)	DCG (ppm)	DP	Índice de Salud Sistema Desarrollado		Índice de Salud esperado por Experto
1	8	0.012	60	0.001	10	1100	0.113	Muy Bueno	Muy Bueno
2	10	0.015	50	0.080	200	600	0.310	Bueno	Bueno
3	12	0.020	45	0.250	350	450	0.508	Aceptable	Aceptable
4	15	0.060	35	0.300	600	300	0.775	Malo	Malo
5	20	0.100	30	0.350	800	220	0.932	Muy Malo	Muy Malo

Fuente: elaboración propia

La similitud entre el resultado esperado por parte de un experto para las variables dadas y el cálculo realizado por el sistema experto concuerdan en un 100% por categoría de diagnóstico. Los datos ingresados al sistema y presentados a los expertos no son de transformadores reales, son creados en base a los parámetros de normativas y referencias de otras clases con fines de prueba experimentales.

3.2. Validación del sistema

Para la validación del sistema frente al usuario, se emplea los métodos proporcionados por las organizaciones ISO e IEC. La ISO (*International Standards Organization*) es la organización internacional encargada de establecer estándares y normas con el fin de regular diferentes sectores de la industria (Marulanda, 2014). La ISO proporciona normas que no son de carácter obligatorio, sin embargo, al adoptar los modelos proporciona beneficios que aumentan la rapidez, confiabilidad y mejora general de productos o servicios.

La IEC (*International Electrotechnical Commission*) es una organización, también, internacional que desarrolla estándares relacionados con las áreas de electricidad y electrónica. Tanto la ISO como la IEC, tienen varios comités técnicos internacionales donde participan diferentes países y empresas públicas y privadas para desarrollar estándares en un área determinada. En ocasiones ambos

organismos crean comités en conjunto denominados JTC (*Join Technical Committees*) ISO/IEC.

El estándar ISO/IEC 9126 contiene el modelo conceptual sobre la calidad de un producto de software en torno a las características y subconjunto de estas que cumple este producto para ser considerado como un producto de calidad. El estándar, se divide en cuatro partes, que se especifican, a continuación, tomados de la investigación de Marulanda (2014).:

- ISO/IEC 9126-1 (2001): Estructura un modelo de calidad de software basado en características y sub características.
- ISO/IEC 9126-2 (2003): Contiene las métricas externas y como aplicar dichas métricas de la calidad de un producto de software
- ISO/IEC 9126-3 (2003): Contiene las métricas internas y como aplicar dichas métricas de la calidad de un producto de software
- ISO/IEC 9126-4: Proporciona las métricas de calidad de uso.

Bajo el estándar ISO/IEC 9126 y como base el estudio de Cabrera & Cabezas (2011), además, de la explicación de Marulanda (2014), se desarrolla el cuadro 40, la cual, contiene las métricas internas y externas para medir la calidad de software, con cada campo detallado a que hace referencia.

Cuadro 40. Calidad de un producto de software bajo ISO/IEC 9126, métricas externas e internas detalle

Estándar	Característica	Sub característica	Detalle
ISO-IEC 9126-2, ISO-IEC 9126-3	Funcionalidad	Adecuación	Proporciona un conjunto adecuado de funciones
		Exactitud	Proporciona los resultados correctos
		Interoperabilidad	Interactúa con uno o más sistemas
		Seguridad	Protege la información y datos
		Cumplimiento de la funcionalidad	Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a funcionalidad
	Fiabilidad	Madurez	Pocos o nulos fallos en el uso del sistema
		Recuperabilidad	Recupera los datos en caso de salidas inesperadas
		Tolerancia a fallos	Mantiene prestaciones a pesar de haber sufrido fallos
		Cumplimiento de la confiabilidad	Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a confiabilidad
	Usabilidad	Aprendizaje	Permite al usuario aprender sobre el sistema
		Comprensión	Permite al usuario comprender las funciones del sistema
		Operatividad	Permite al usuario operar y controlar el sistema
		Capacidad de atracción	Es atractiva la interfaz para el usuario
		Cumplimiento de la usabilidad	Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a usabilidad
	Eficiencia	Comportamiento en el tiempo	Tiempos de respuesta, proceso y potencia apropiadas
		Comportamiento de recursos	Cantidad de recursos empleados acorde al software
		Cumplimiento de la eficiencia	Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a eficiencia
	Mantenibilidad	Estabilidad	Evita efectos inesperados ante la modificación del software
		Facilidad de análisis	Fácil de ser diagnosticado o identificado las partes a modificar
		Facilidad de cambio	Fácil para implementar nuevos cambios o modificaciones
		Facilidad de pruebas	Permite que el software sea probado
		Cumplimiento mantenibilidad	Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a mantenibilidad
	Portabilidad	Capacidad de Instalación	Permite ser instalado en un entorno específico
		Capacidad de reemplazamiento	Permite reemplazar otro software similar
		Adaptabilidad	Se adapta a diferentes entornos diferentes a, los cuales, no fue diseñado
Coexistencia		Permite coexistir con otros productos de software	
Cumplimiento de la portabilidad		Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a portabilidad	

Fuente: elaboración propia

Con el fin de evaluar el desarrollo de software, se aplica las encuestas diseñadas bajo el esquema del cuadro 40 para dos grupos de usuarios: el primero a los especialistas de diagnóstico del laboratorio que incluye a los expertos y laboratoristas, y el segundo grupo a un especialista de ingeniería informática.

Esta división, se genera dado que ciertas métricas de calidad proporcionados por la ISO/IEC 9126 no son medibles por un usuario final del sistema dado que involucran la revisión y/o modificación del código o pruebas a profundidad, de igual manera, para la encuesta dirigida al especialista de informática, se filtran los campos que no son relevantes, son desconocidos al no ser el usuario del sistema o contar con el conocimiento de los procesos de diagnóstico de un transformador.

Las encuestas diseñadas toman las sub características de forma comparativa para los campos, que se evalúan en ambos grupos de especialistas, los cuales, son: madures, recuperabilidad, tolerancia a fallos y comportamiento en el tiempo. Y de forma complementaria para los campos que no sean evaluados por los dos grupos, los cuales, son la diferencia de los campos no mencionados previamente.

El grupo de especialistas en el área técnica e informática, se conforma en base al detalle descrito en el cuadro 41.

Cuadro 41. Detalle de los especialistas encuestados para la validación de software

	Área de conocimiento	Tiempo Experiencia	Cargo
Especialista 1	Diseño, construcción, mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas.	35 años	Gerente General
Especialista 2	Mantenimiento de Transformadores	12 años	Consultor externo
Especialista 3	Laboratorios varios	7 años	Jefe de Laboratorio
Especialista 4	Informático	4 años	Consultor externo
Especialista 5	Informático	2 años	TI

Fuente: elaboración propia

En el cuadro 42, se promedian los resultados de la encuesta aplicada a los especialistas de diagnóstico y de informática, basados en la escala de Likert aplicada, que se observa en el cuadro 41. Donde el promedio de cada sub característica es calculado al obtener el cociente entre la suma de los resultados de la escala dividido para el máximo de puntuación, por lo que, el valor correspondiente a “Muy de acuerdo” con cinco, multiplicado por el número de encuestados. Además, se calcula el promedio general basado en la escala de Likert para conocer la satisfacción general sobre el sistema.

Cuadro 42. Escala de Likert aplicada en las encuestas de calidad de software

Muy en desacuerdo	En desacuerdo	Indiferente	De acuerdo	Muy de acuerdo
1	2	3	4	5

Fuente: elaboración propia

Cuadro 43. Resultados de la medición de la calidad del sistema bajo el estándar ISO/IEC 9126

Estándar	Característica	Sub característica	Puntuación Promedio Especialista Diagnóstico	Puntuación Promedio Especialista Informática	Promedio
ISO-IEC 9126-2, ISO-IEC 9126-3	Funcionalidad	Adecuación	93.3%	**	93.3%
		Exactitud	100.0%	**	100.0%
		Interoperabilidad	**	100.0%	100.0%
		Seguridad	**	80.0%	80.0%
		Cumplimiento de la funcionalidad	**	70.0%	70.0%
	Fiabilidad	Madurez	86.7%	70.0%	78.3%
		Recuperabilidad	100.0%	100.0%	100.0%
		Tolerancia a fallos	100.0%	100.0%	100.0%
		Cumplimiento de la confiabilidad	**	90.00%	90.0%
	Usabilidad	Aprendizaje	93.3%	**	93.3%
		Comprensión	93.3%	**	93.3%
		Operatividad	100.0%	**	100.0%
		Capacidad de atracción	86.7%	**	86.7%
		Cumplimiento de la usabilidad	**	70.0%	70.0%
	Eficiencia	Comportamiento en el tiempo	93.3%	90.0%	91.7%
		Comportamiento de recursos	**	80.0%	80.0%
		Cumplimiento de la eficiencia	**	80.0%	80.0%
	Mantenibilidad	Estabilidad	**	100.0%	100.0%
		Facilidad de análisis	**	90.0%	90.0%
		Facilidad de cambio	**	90.0%	90.0%
		Facilidad de pruebas	**	80.0%	80.0%
		Cumplimiento mantenibilidad	**	80.0%	80.0%
	Portabilidad	Capacidad de Instalación	**	100.0%	100.0%
		Capacidad de reemplazamiento	**	100.0%	100.0%
		Adaptabilidad	**	100.0%	100.0%
Coexistencia		**	100.0%	100.0%	
Cumplimiento de la portabilidad		**	90.0%	90.0%	

**No aplicado al grupo de encuestados

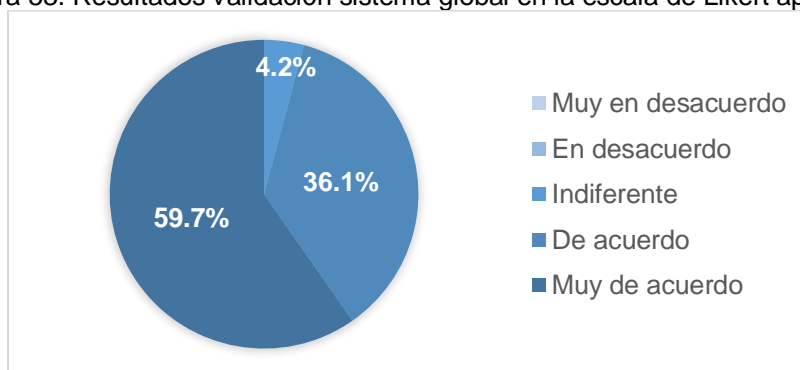
Fuente: modificado a partir de Cabrera & Cabezas (2011)

Con base en los resultados consolidados en el cuadro 43, se promedia una puntuación general del sistema de 89.9% lo que muestra la satisfacción general de los usuarios. Los puntos para mejorar del sistema provienen en su mayoría de la falta de apego a un marco de desarrollo, que por la naturaleza del sistema experto e interconexión de varios lenguajes dificulta la normalización. Entre otros puntos

débiles la madurez del producto, se ve perjudicada por ser la primera versión de un sistema experimental, sin embargo, se cumple las expectativas de funcionalidad, fiabilidad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad y portabilidad de forma global.

Los puntos destacables del sistema residen en su usabilidad, por la simplicidad del diseño y presentación visual, funcionabilidad por la exactitud y adecuación del sistema. Por el lado técnico, se destaca la portabilidad del sistema y en cuanto a la mantenibilidad la facilidad de análisis y cambio.

Figura 53. Resultados validación sistema global en la escala de Likert aplicada



Fuente: elaboración propia

En la figura 53, la mayoría de los criterios emitidos por lo especialistas encuestados estuvo muy de acuerdo y de acuerdo con las sub-características mencionadas, solo pocas fueron indiferentes y no existió ninguna en desacuerdo o en muy en desacuerdo. En conjunto con lo mencionado anteriormente de la puntuación general del sistema, se valida la funcionalidad del mismo.

CONCLUSIONES

- El análisis teórico del uso de lógica difusa para la determinación de las propiedades dieléctricas del aceite del transformador destaca como aspectos primordiales para el análisis, diseño y desarrollo del sistema experto basado en lógica difusa son el conjunto de membresías difusas y las reglas expertas definidas, dado que, el índice de salud integrado depende directa y sensiblemente de la base del conocimiento y, además, de los parámetros de los conjuntos de membresías para cada variable. En el desarrollo de los sets difusos listados en los cuadros 20 a 25 el criterio mencionado en otras investigaciones vinculado con los datos recolectados en las encuestas da paso a la generación precisa de los diagnósticos, que se validan en el tercer capítulo de la investigación. Adicionalmente, se observa que los cambios ligeros sobre los límites de los conjuntos difusos llegarían a cambiar significativamente el diagnóstico final lingüístico al evaluar el resultado en otro conjunto por un cambio mínimo.
- El diagnóstico de la situación actual de los procesos de interpretación de resultados del laboratorio permitió construir adecuadamente el diseño de los requisitos y adicionalmente la confirmación de las reglas expertas de otras investigaciones, así como, las condiciones y parámetros definidos para los diferentes conjuntos difusos. Además, la situación actual del laboratorio en base a las diferentes encuestas realizadas permite identificar que los expertos que emiten los criterios actualmente están de acuerdo con los resultados, son acordes a sus criterios donde, se denota la similitud de diagnóstico de los cuadros 38 y 39.
- El desarrollo de los módulos necesarios para la automatización del diagnóstico basado en lógica difusa, se realizó mediante la metodología Scrum, que a pesar de, no ser particular para la elaboración de los sistemas expertos, resulta adecuada para el desarrollo de este tipo de sistemas, demostrado en el resultado de la validación con un porcentaje de aceptación de 89.9% mostrado en el cuadro 43 y, además, en la facilidad de identificación, diseño y cambio

para las características a desarrollar en cada Sprint donde en las pruebas de aceptación de cada iteración, se observa, que se cumplen las condiciones especificadas para cada entregable. Adicionalmente, la metodología facilita la integración de varios lenguajes de programación donde sin necesidad de un marco de desarrollo, permite la combinación de módulos de diferentes lenguajes a través del desarrollo de APIs cortas o interacción por línea de comandos entre lenguajes o módulos mostrados al unificar el módulo del sistema experto desarrollado en Python con la consulta de parámetros en la base de datos MySQL y la presentación de datos e ingreso de datos en una página web desarrollada con HTML, PHP y JavaScript.

- La validación concluye con una satisfacción general combinada del 89.9% tanto para los validadores expertos en el área de transformadores, así como, para los consultores externos de diagnóstico y expertos en informática, donde, en base a los resultados de las encuestas denotados en el cuadro 43 y figura 53, la mayoría está de acuerdo con los parámetros de funcionalidad, fiabilidad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad y portabilidad, métricas tomadas de la normativa ISO/IEC 9126.

RECOMENDACIONES

- Validar a profundidad el sistema experto difuso para la clase mayor a 230 kV, basado en datos provenientes de análisis reales donde, se abarquen al menos dos equipos por condición y, se cuente con un parámetro de comparación para otorgar validez al desarrollo experimental basado en la normativa vigente y las otras dos clases inferiores.
- Realizar respaldos y verificación de la integridad y no modificación de la base de conocimientos o parámetros no autorizados, dada la sensibilidad al cambio, que se presenta de forma natural en los sistemas expertos difusos.
- Se recomienda madurar el producto de software en lo referente a la presentación de informes de los análisis específicos previos al índice de salud y la consideración de integración de nuevos tipos de usuarios, de manera que, sea publicado en un entorno productivo en beneficio de los clientes de la empresa.
- Se recomienda poner en consideración nuevas variables a ser incorporadas en el motor de inferencia a fin de integrar en el índice de salud otros parámetros ajenos al aceite aislante no considerados en la presente investigación tales como: el último porcentaje de carga medido del equipo, sobrecargas, condiciones de trabajo, entre otras.
- Las herramientas empleadas en el desarrollo de la investigación, en especial en el motor difuso, proporcionan métodos para el cálculo en tiempo real, por lo que, se recomienda integrar la información de sensores de medición de variables de afectación rápida, para dar paso al procesamiento en línea del índice de salud.

BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Elanien, A., Salama, M., & Ibrahim, M. (2012). *Calculation of a Health Index for Oil-Immersed Transformers Rated Under 69 kV Using Fuzzy Logic*.
- Almache, J. (2013). Classical logic and diffuse logic: Facets that characterize them. *Estoa*. Obtenido de: Obtenido de: <https://doi.org/10.18537/est.v002.n002.10>
- Álvarez, J. (2009). *Transformadores*. Obtenido de: https://frfq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/6735/mod_resource/content/1/7_transformador.pdf
- Alyssa Consultores. (2014). *Framework de Referencia de Modelos para Desarrollo de Software en Entornos PYME*. Obtenido de: <http://www.alysaconsultores.com/mrf/>
- Aponte, G., Cadavid, H., Cerón, A., Zuñiga, A., Tariacuri, J., Calderón, L., Cortes, E., Gaona, M., Serna, A., & Mena, J. (2020). *Herramienta de Software para Estimar el Índice de Salud en Transformadores de Potencia*.
- Arévalo, J., & Espinoza, D. (2020). *Análisis de Fallas en Transformadores de Potencia y su Prevención*.
- Badaró, S., Ibañez, L., & Agüero, M. (2013). Sistemas Expertos: Fundamentos, Metodologías y Aplicaciones. *Ciencia y Tecnología*. Obtenido de: <https://doi.org/10.18682/cyt.v1i13.122>
- Bahit, E. (2018). *Introduccion Al Lenguaje Python*. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/333965199_Introduccion_al_Lenguaje_Python
- Banda, M. (2019). *Desarrollo de una Aplicación Informática de Modelo SaaS bajo la Plataforma Cloud Computing que Contribuya a la Gestión de Personal de*

la Empresa Agrícola Santa Teresita, Cantón Latacunga [PUCESA]. Obtenido de: <https://repositorio.pucesa.edu.ec/handle/123456789/2925>

Bhavsar, K., Gopalan, S., & Shah, V. (2020). Scrum: An Agile Process Reengineering in Software Engineering. En *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* (Vol. 9). Obtenido de: <https://doi.org/10.35940/ijitee.C8545.019320>

Cabrera, E., & Cabezas, M. (2011). *Medición de la Calidad de Productos de Software en un Ambiente Académico Usando la Norma ISO/IEC 9126.*

Cadena, C., Quimí, R., & Peláez, P. (2017). *Análisis, diseño y desarrollo de un sistema experto con tecnología web open source para la selección de personal de una organización a través de un test psicológico.*

Cadena, P., Rendón, R., Aguilar, J., & Salinas, E. (2017). *Métodos cuantitativos, métodos cualitativos o su combinación en la investigación: Un acercamiento en las ciencias sociales* Quantitative methods, qualitative methods or combination of research: An approach in the social sciences.*

Cairampoma, R. (2015). *Tipos de Investigación científica: Una simplificación de la complicada incoherente nomenclatura y clasificación.*

Campoy, T., & Gomes, E. (2016). *Técnicas e instrumentos cualitativos de recogida de datos.* Obtenido de: <https://upla.edu.pe/wp-content/uploads/2017/12/2-UPLA-Instrumentos-cualitativos-de-datos.pdf>

CANAME. (2011). *Aspectos fundamentales de los transformadores.* Obtenido de: <http://187.191.71.192/expediente/11369/mir/32243/anexo/898180>

Cardona, C., Restrepo, D., & Ovalle, D. (2007). *Sistema Experto Difuso para Determinar Perfiles Criminológicos basado en el Test de Lüscher y Variables Socio-Criminológicas.*

- Cargill. (2016). *Ensayos fisicoquímicos y DGA en transformadores de potencia inmersos en aceite vegetal*. Obtenido de: <https://fise.co/wp-content/uploads/2020/06/6.-Alexandre-Machado.pdf>
- Cerón, A., Echeverry, D., Aponte, G., & Romero, A. (2015). Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos en Aceite Mineral con Voltajes entre 69kV y 230kV usando Lógica Difusa. *Información Tecnológica*. Obtenido de: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000200013>
- Cerón, A., Orduña, I., Aponte, G., & Romero, A. (2015). Panorama de la Gestión de Activos para Transformadores de Potencia. *Información tecnológica*. Obtenido de: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000300014>
- Chicaiza, A., & Valencia, F. (2017). Evaluación del Estado de Transformadores de Potencia Mediante la Aplicación de Lógica Difusa al Análisis de Gases Disueltos en Aceite. *XXVII Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica*. Obtenido de: http://ciecfie.epn.edu.ec/wss/VirtualDirectories/80/JIEE/historial/XXVII/Contenido/MEMORIAS_XXVII-160-165.pdf
- Christian, F., & Marín, D. (2017). *Evaluación del índice de consecuencia de la falla final de un transformador de potencia usando lógica difusa basada en criterio experto*.
- Clemmons, R. (2006). *Diversified Technical Services, Inc. Puntos de Caso de Uso*. Obtenido de: <https://www.uv.mx/personal/asumano/files/2010/07/PUNTOS-DE-CASOS-DE-USO-2011.pdf>
- Contreras, J. (2013). *Fluidos Aislantes para Transformadores—Propiedades, Desempeño y Requerimientos*. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/255950423_Fluidos_Aislantes_para_Transformadores_-_Propiedades_Desempeno_y_Requerimientos

- Correa, M. (2012). *Transformadores aislados en resina, aceite y aire*. Obtenido de: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1892&ni=transformador-es-aislados-en-resina-aceite-y-aire>
- Coyaso, F., & Vermonden, A. (2015). Lógica difusa para la toma de decisiones y la selección de personal. *Universidad & Empresa*.
- Díaz, H. (2020). *Tipos de Transformadores*. EnergeticaHoy. Obtenido de: <https://www.energeticahoy.com/post/2020/01/29/tipos-de-transformadores>
- Díez, R., Gómez, A. G., & Martínez, N. de A. (2001). *Introducción a la inteligencia artificial: Sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva*. Universidad de Oviedo. Obtenido de: <https://books.google.com.ec/books?id=RKqLMCw3IUkC>
- FCCyT. (2018). *Inteligencia artificial*. Obtenido de: https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_18-012.pdf
- Gallo, E. (2005). *Diagnóstico y Mantenimiento de Transformadores en campo* (Primeera). ACIEM.
- Gauchat, J. (2017). *El gran libro de HTML5, CSS3 y Javascript*. Obtenido de: <https://elevaciondigital.pe/wp-content/uploads/2019/06/El-gran-libro-de-HTML5-CSS3-y-JavaScript.pdf>
- Goff, M. (2019). *Building a Transformer Health Index*. T&D World. Obtenido de: <https://www.tdworld.com/test-and-measurement/article/20972278/building-a-transformer-health-index>
- Gómez, S. (2012). *Metodología de la Investigación*. Obtenido de: http://www.aliat.org.mx/BibliotecasDigitales/Axiologicas/Metodologia_de_la_investigacion.pdf

- Gorgan, B., Notingher, P., Badicu, L., & Gabriel, T. (2010). Calculation of power transformers health indexes. *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series*. Obtenido de: https://www.researchgate.net/profile/Petru-Notingher/publication/228582140_Calculation_of_power_transformers_health_indexes/links/00b7d51d6880325498000000/Calculation-of-power-transformers-health-indexes.pdf
- Hernández, F. (2016). *Voltaje, corriente y potencia eléctrica*. Obtenido de: <http://www.cobaep.edu.mx/sitio/pdf/materialdidactico/guiasense%C3%B1anzas/zacencias/voltaje%20corriente%20potencia%20el%C3%A9ctrica.pdf>
- Hurtado, S., & Manco, O. (2007). *Diseño de un sistema experto difuso: Evaluación de riesgo crediticio en firmas comisionistas de bolsa para el otorgamiento de recursos financieros*. *Estudios Gerenciales*. Obtenido de: [https://doi.org/10.1016/S0123-5923\(07\)70019-0](https://doi.org/10.1016/S0123-5923(07)70019-0)
- IBM. (2021). *Modelos lógicos de datos*. Obtenido de: <https://www.ibm.com/docs/es/ida/9.1.2?topic=modeling-logical-data-models>
- Java. (2015). *Lógica de Presentación (Java)*. Obtenido de: <https://glosarios.servidor-alicante.com/java/logica-de-presentacion>
- López, G., Erika, L., Gómez, L., & Becerra, M. (2017). *Sistema experto difuso para la medición del capital humano en instituciones de educación superior en Colombia*. Obtenido de: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n34/a17v38n34p07.pdf>
- López, R. (2015). *Metodologías Ágiles de Desarrollo de Software Aplicadas a la Gestión de Proyectos Empresariales*. Obtenido de: <http://core.ac.uk/download/pdf/80296686.pdf>
- Lozano, M., Gonzalez, P., Ramos, I., Montero, F., & Pascual, J. (2006). *Desarrollo y generación de interfaces de usuario a partir de técnicas de análisis de*

- tareas y casos de uso. Inteligencia Artificial*. Obtenido de: <https://doi.org/10.4114/ia.v6i16.745>
- Malagón, C. (2013). *Introducción a la Inteligencia Artificial*. Obtenido de: http://www.nebrija.es/~cmalagon/ia/transparencias/introduccion_IA.pdf
- Marchesan, T., & Fanchin, A. (2010). *Natural ester fluid: The transformer design perspective. 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)*. Obtenido de: <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2010.5762902>
- Marín, R. (2019). *Los gestores de bases de datos (SGBD) más usados*. Canal Informática y TICS. Obtenido de: <https://revistadigital.inesem.es/informatica-y-tics/los-gestores-de-bases-de-datos-mas-usados/>
- Marini, I. E. (2012). *El Modelo Cliente/Servidor*. Obtenido de: <http://index-of.co.uk/REDES/linuxito%20-%20El%20Modelo%20Cliente-Servidor.pdf>
- Martínez, M. (2011). *Conocimiento y Bases de Datos: Una Propuesta de integración Inteligente*. Obtenido de: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1172/1de3.MAMcap2.pdf?s%20equence=2>
- Marulanda, J. (2014). *Aseguramiento de la calidad en el diseño del software*. Obtenido de: <https://core.ac.uk/download/pdf/47246132.pdf>
- Montané, O., Arce, J., Dorrbercker, D., Areu, S. (2011). *Estado actual del diagnóstico de transformadores de potencia en las centrales eléctricas cubanas*. Ingeniería Energética. Obtenido de: <https://marcalyc.redalyc.org/pdf/3291/329127746007.pdf>
- Nwinyi, O. (2011). *Enrichment and Identification of Askarel oil (PCB blend) degrading bacteria enriched from landfill sites in Edo State, Nigeria*.

Agriculture and biology journal of north america. Obtenido de: <https://doi.org/10.5251/abjna.2011.2.1.89.100>

Ortiz, F., Fernandez, I., Ortiz, A., Renedo, C., Delgado, F., & Fernandez, C. (2016). Health indexes for power transformers: A case study. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. Obtenido de: <https://doi.org/10.1109/MEI.2016.7552372>

Parraga, J. (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*. Obtenido de: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/5174/Parraga%20Acosta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pérez, P. (2020). *Transformadores de distribución: Teoría, cálculo, construcción y pruebas*. Reverte. Obtenido de: <https://books.google.com.ec/books?id=kF8OEAAAQBAJ>

Pignani, J. (2017). *Sistemas Expertos*. Obtenido de: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora1/monograis/pignani-sistemasexpertos.pdf

Ponce, C., Ponce, C., & Rojas, B. (2019). *Diseño de un Sistema Experto Difuso para la Determinación de la Densidad de Corriente en una Planta de Cromado*. Información tecnológica. Obtenido de: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000200157>

Pressman, R. (2013). *Ingeniería del software: Un enfoque práctico*. Obtenido de: <http://www.javier8a.com/itc/bd1/ld-Ingenieria.de.software.enfoque.para.ctico.7ed.Pressman.PDF>

Puig, L. (2009). *El Modelo de Competencia*. Obtenido de: <https://www.uv.es/puigl/lerp3.pdf>

- Python. (2021). *Tutorial de Python—Documentación de Python—3.9.2*. Obtenido de: <https://docs.python.org/es/3/tutorial/>
- Rexhepi, V. (2017). *An Analysis of Power Transformer Outages and Reliability Monitoring*. *Energy Procedia*. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.053>
- Rivera, L., & Sucozhañay, A. (2016). *Diagnóstico del Estado de los Transformadores de Potencia de las Centrales Molino y Mazar Basado en Análisis del Aceite*. Obtenido de: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/25891/1/Tesis.pdf>
- Robles, A. (2013). *Sistema experto basado en reglas para una aplicación de monitorización de producción industrial*. 68.
- Rodríguez, A., & Pérez, A. (2017). *Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento*. *Revista EAN*. Obtenido de: <https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647>
- Rodríguez, M. (2012). *Transformadores*. Obtenido de: <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Trafos.pdf>
- Rueda, S. (2010). *Descripción general de las técnicas de control borroso y aplicación en el control de nivel y flujo*.
- Salvador, A. (2006). *Simulación de un Convertidor Multinivel Apilable Controlado con Lógica Difusa*. Obtenido de: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/revelo_a_s/capitulo4.pdf
- Sampieri, R., Collado, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación* (5a ed). McGraw-Hill.

- Sánchez, C., Aranda, L., & Maldonado, D. (2016). *Diagnóstico de Transformadores de potencia utilizando Lógica Difusa. Facultad Politécnica UNE / ITAIPU BINACIONAL.*
- SciKit-Fuzzy. (2019). SciKit-Fuzzy. Obtenido de: <https://pypi.org/project/scikit-fuzzy/>
- ScrumManager. (2015). *Scrum Manager I. Las reglas de scrum.* Obtenido de: https://www.scrummanager.net/files/scrum_I.pdf
- SISDAT. (2021). *Sistema Único de Información Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano.* Obtenido de: <https://sisdatbi.controlrecursosyenergia.gob.ec/>
- Tamayo, C. A. (2017). *Análisis de causas y efectos producidos por el deterioro del aceite dieléctrico para transformadores pad mounted y su relación con el índice de fallas.*
- Urteaga, A. (2015). *Aplicación de la metodología de desarrollo ágil Scrum para el desarrollo de un sistema de gestión de empresas.* Obtenido de: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23750/TFG_Aitor_Urteaga_Pecharrroman.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- UVA. (2006). *El modelo cliente/servidor.* Obtenido de: https://www.infor.uva.es/~fdiaz/sd/2005_06/doc/SD_TE02_20060305.pdf
- Vargas, E. (2011). *Desarrollo de un Prototipo de Sistema Experto para el Apoyo en la Toma de Decisiones del Proceso de Selección de Personal.* 2011, 145.
- Vergara, P. (2011). *Arquitectura Aplicaciones Web.* Obtenido de: <http://ocw.udl.cat/enginyeria-i-arquitectura/enginyeria-del-software-iii/Continguts/1-%20-%20Introduccion/2-Arquitectura.pdf>


Vidal, T. (2014). *Introducción a la Lógica Difusa*. Obtenido de: [http://profesores.elo.utfsm.cl/~tarredondo/info/soft-comp/Introduccion %20 a%20la %20Lógica%2 0Difusa.pdf](http://profesores.elo.utfsm.cl/~tarredondo/info/soft-comp/Introduccion%20a%20la%20L%C3%B3gica%20Difusa.pdf)

Wormer, N. (2019). *Los sistemas expertos en las relaciones internacionales: Aplicación a la clasificación de conflictos violentos*. Obtenido de: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/51673/1/T40963.pdf>

ANEXOS

Anexo 1

Modelo de entrevista aplicado a los expertos y laboratoristas de la empresa de laboratorio de análisis de aceites dieléctricos con el fin de recolectar información sobre los criterios de análisis para el motor difuso y las reglas de la base de conocimiento, además, de los requisitos de la herramienta informática.

	
Modelo de entrevista para obtener información sobre el conocimiento para el desarrollo de un sistema experto para el índice de salud de transformadores	
Objetivo	Obtener información para el modelado de un sistema experto difuso para el cálculo de un índice de salud de transformadores inmersos en aceite mineral dieléctrico
Investigador	Franklin Camacho Cañizares Estudiante de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato
Consideraciones Generales <ol style="list-style-type: none"> 1. Se le solicita muy amablemente responder de forma abierta pero objetiva 2. La información aquí recolectada tiene fines investigativos 	
Desarrollo <ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Qué proceso se realiza actualmente para el diagnóstico del estado general de un transformador? <hr/> <hr/> <hr/>	

2. ¿Qué proceso se realiza actualmente para el registro de datos de los resultados de los diferentes análisis?

3. ¿Cómo almacena usted los registros de los resultados?

4. ¿Qué análisis considera usted que son los más relevantes para la determinación de un estado global del transformador?

5. ¿Qué normativas y criterios se emplean para el diagnóstico de los análisis de rigidez dieléctrica?

6. ¿Qué normativas y criterios se emplean para el diagnóstico de los análisis de contenido de humedad y porcentaje de saturación?

7. ¿Qué normativas y criterios se emplean para el diagnóstico de los análisis de índice de acidez?

8. ¿Qué normativas y criterios se emplean para el diagnóstico de los análisis de factor de disipación?

9. ¿Qué normativas y criterios se emplean para el diagnóstico de los análisis de gases disueltos?

10. ¿Qué normativas y criterios se emplean para el diagnóstico de los análisis de contenido de furfurales?

11. En base a que un sistema experto difuso es una herramienta que mediante lógica difusa y reglas almacenadas trata de interpretar datos ingresados y devolver una respuesta similar a la que realizaría un experto ¿Qué características considera usted relevantes que contarían en el sistema experto?

12. ¿Qué normativas y criterios se emplean para el diagnóstico de los análisis de contenido de furfurales?

13. ¿Cuáles son los grupos de procesos de análisis y que comprende cada uno de ellos?

14. ¿Cuál es el orden de importancia de los análisis que usted considera que afectan más al transformador en su estado global?


15. ¿Considera importante en el sistema experto difuso que la base de conocimiento sea modificada por parte de los usuarios? ¿Por qué?

16. ¿Considera importante en el sistema experto difuso que el motor de inferencia procese varias clases de transformadores según su voltaje? ¿Por qué?

Gracias por su colaboración

Anexo 2

Modelo de encuesta grupal aplicado a los expertos y laboratoristas de la empresa de laboratorio de análisis de aceites dieléctricos con el fin de comparar el diagnóstico del sistema experto para la clase mayor a 230kV en base a resultados no reales con fines experimentales y demostrativos.

	
Modelo de encuesta grupal para obtener información para la comparación del índice de salud para la clase mayor a 230 kV calculado por el sistema experto y los especialistas de diagnóstico	
Objetivo	Obtener información para la comparación del índice de salud lingüístico para la clase de equipos mayores a 230 kV emitidos por especialistas en contraste del sistema experto desarrollado
Investigador	Franklin Camacho Cañizares Estudiante de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato
Consideraciones Generales <ol style="list-style-type: none"> 1. Se le solicita muy amablemente responder de forma objetiva en base a su criterio 2. La información aquí recolectada tiene fines investigativos 	
Desarrollo <p>En base a los parámetros de las variables dadas de resultados experimentales de transformadores de clase mayor a 230 kV, que se observa en cada tabla de cada pregunta, por favor indique cual es el criterio más apropiado que calificaría usted al equipo en mención.</p>	

La abreviatura de los campos, se detalla: FP para factor de potencia, BDV para rigidez dieléctrica, DCG para el total de gases combustibles y DP representa el grado de polimerización.

Años

1. Para el equipo 1, se presenta la siguiente tabla de datos, marcar con una X el criterio que usted asignaría al diagnóstico del equipo

Humedad (ppm)	Acidez (mg KOH/g)	BDV 1mm (kV)	FP 25°C (%)	DCG (ppm)	DP
8	0.012	60	0.001	10	1100

Experto	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Muy Malo
1					
2					
3					

2. Para el equipo 2, se presenta la siguiente tabla de datos, marcar con una X el criterio que usted asignaría al diagnóstico del equipo

Humedad (ppm)	Acidez (mg KOH/g)	BDV 1mm (kV)	FP 25°C (%)	DCG (ppm)	DP
10	0.015	50	0.080	200	600

Experto	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Muy Malo
1					
2					
3					

3. Para el equipo 3, se presenta la siguiente tabla de datos, marcar con una X el criterio que usted asignaría al diagnóstico del equipo

Humedad (ppm)	Acidez (mg KOH/g)	BDV 1mm (kV)	FP 25°C (%)	DCG (ppm)	DP
12	0.020	45	0.250	350	450

Experto	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Muy Malo
1					
2					
3					

4. Para el equipo 4, se presenta la siguiente tabla de datos, marcar con una X el criterio que usted asignaría al diagnóstico del equipo

Humedad (ppm)	Acidez (mg KOH/g)	BDV 1mm (kV)	FP 25°C (%)	DCG (ppm)	DP
15	0.060	35	0.300	600	300


Experto	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Muy Malo
1					
2					
3					

5. Para el equipo 5, se presenta la siguiente tabla de datos, marcar con una X el criterio que usted asignaría al diagnóstico del equipo

Humedad (ppm)	Acidez (mg KOH/g)	BDV 1mm (kV)	FP 25°C (%)	DCG (ppm)	DP
20	0.100	30	0.350	800	220
Experto	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Muy Malo
1					
2					
3					
Gracias por su colaboración					

Anexo 3


Modelo de encuesta aplicado a los expertos y laboratoristas de la empresa de laboratorio de análisis de aceites dieléctricos con el fin de validar la calidad del sistema bajo los indicadores seleccionados y establecidos por la norma ISO/IEC 9126.

				
Modelo de encuesta aplicado a los expertos y laboratoristas para validar el producto de software desarrollado				
Objetivo	Validar el sistema experto desarrollado bajo los indicadores seleccionados y establecidos por la norma ISO/IEC 9126 para determinar la satisfacción del usuario frente al software.			
Investigador	Franklin Camacho Cañizares Estudiante de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato			
Consideraciones Generales				
<ol style="list-style-type: none"> 1. Se le solicita muy amablemente responder de forma objetiva 2. La información aquí recolectada tiene fines investigativos 3. Una vez revisado el software por favor califique las sub características en la tabla presentada bajo la siguiente escala de Likert: 				
Muy en desacuerdo	En desacuerdo	Indiferente	De acuerdo	Muy de acuerdo
1	2	3	4	5
Desarrollo				

Estándar	Característica	Sub característica	Explicación	Puntuación
ISO-IEC 9126-2, ISO-IEC 9126-3	Funcionalidad	Adecuación	Proporciona un conjunto adecuado de funciones	
		Exactitud	Proporciona los resultados correctos	
	Fiabilidad	Madurez	Pocos o nulos fallos en el uso del sistema	
		Recuperabilidad	Recupera los datos en caso de salidas inesperadas	
		Tolerancia a fallos	Mantiene prestaciones a pesar de haber sufrido fallos	
	Usabilidad	Aprendizaje	Permite al usuario aprender sobre el sistema	
		Comprensión	Permite al usuario comprender las funciones del sistema	
		Operatividad	Permite al usuario operar y controlar el sistema	
		Capacidad de atracción	Es atractiva la interfaz para el usuario	
	Eficiencia	Comportamiento en el tiempo	Tiempos de respuesta, proceso y potencia apropiadas	
	Gracias por su colaboración			

Anexo 4

Modelo de encuesta aplicado a los especialistas en informática de la empresa de laboratorio de análisis de aceites dieléctricos con el fin de validar la calidad del sistema bajo los indicadores seleccionados y establecidos por la norma ISO/IEC 9126.

														
Modelo de encuesta aplicado a los especialistas informáticos para validar el producto de software desarrollado														
Objetivo	Validar el sistema experto desarrollado bajo los indicadores seleccionados y establecidos por la norma ISO/IEC 9126 para determinar la satisfacción del usuario frente al software.													
Investigador	Franklin Camacho Cañizares Estudiante de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato													
Consideraciones Generales <ol style="list-style-type: none"> 4. Se le solicita muy amablemente responder de forma objetiva 5. La información aquí recolectada tiene fines investigativos 6. Una vez revisado el software por favor califique las sub características en la tabla presentada bajo la siguiente escala de Likert: 														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">Muy en desacuerdo</td> <td style="text-align: center;">En desacuerdo</td> <td style="text-align: center;">Indiferente</td> <td style="text-align: center;">De acuerdo</td> <td style="text-align: center;">Muy de acuerdo</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">5</td> </tr> </table>					Muy en desacuerdo	En desacuerdo	Indiferente	De acuerdo	Muy de acuerdo	1	2	3	4	5
Muy en desacuerdo	En desacuerdo	Indiferente	De acuerdo	Muy de acuerdo										
1	2	3	4	5										
Desarrollo														

Estándar	Característica	Sub característica	Explicación	Puntuación
ISO-IEC 9126-2, ISO-IEC 9126-3	Funcionalidad	Interoperabilidad	Interactúa con uno o más sistemas	
		Seguridad	Protege la información y datos	
		Cumplimiento de la funcionalidad	Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a funcionalidad	
	Fiabilidad	Madurez	Pocos o nulos fallos en el uso del sistema	
		Recuperabilidad	Recupera los datos en caso de salidas inesperadas	
		Tolerancia a fallos	Mantiene prestaciones a pesar de haber sufrido fallos	
		Cumplimiento de la confiabilidad	Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a confiabilidad	
	Usabilidad	Cumplimiento de la usabilidad	Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a usabilidad	
	Eficiencia	Comportamiento en el tiempo	Tiempos de respuesta, proceso y potencia apropiadas	
		Comportamiento de recursos	Cantidad de recursos empleados acorde al software	
		Cumplimiento de la eficiencia	Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a eficiencia	
	Mantenibilidad	Estabilidad	Evita efectos inesperados ante la modificación del software	

		Facilidad de análisis	Fácil de ser diagnosticado o identificado las partes a modificar	
		Facilidad de cambio	Fácil para implementar nuevos cambios o modificaciones	
		Facilidad de pruebas	Permite que el software sea probado	
		Cumplimiento mantenibilidad	Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a mantenibilidad	
	Portabilidad	Capacidad de Instalación	Permite ser instalado en un entorno específico	
		Capacidad de reemplazamiento	Permite reemplazar otro software similar	
		Adaptabilidad	Se adapta a diferentes entornos diferentes a, los cuales, fue diseñado	
		Coexistencia	Permite coexistir con otros productos de software	
		Cumplimiento de la portabilidad	Capaz de adherirse a regulaciones o normas relacionadas a portabilidad	
Gracias por su colaboración				