

Sistema experto difuso para el diagnóstico del índice de salud de transformadores eléctricos

*Diffuse expert system for the diagnosis
of the health index of electric transformers*

Franklin Rolando Camacho Cañizares¹  <https://orcid.org/0009-0003-6852-5268>
Galo Mauricio López Sevilla^{1*}  <https://orcid.org/0000-0003-4699-4875>
Teresa Milena Freire Aillón¹  <https://orcid.org/0000-0003-2324-6495>
Darío Javier Robayo Jacome¹  <https://orcid.org/0000-0002-0661-6573>

Recibido 07 de noviembre de 2022, aceptado 10 de octubre de 2023

Received: November 07, 2022 Accepted: October 10, 2023

RESUMEN

En Ambato - Ecuador la empresa “Liargy” se dedica entre sus servicios al análisis de aceites dieléctricos de transformadores para determinar las propiedades eléctricas físicas y químicas del aceite aislante para anticiparse a posibles fallas. Actualmente, se diagnostican los resultados de los análisis de aceites dieléctricos con el uso de lógica clásica que es un sistema formal de razonamiento y argumentación que se basa en principios y reglas bien definidos, basado en los parámetros de normativas vigentes, lo que causa lentitud en el proceso de diagnóstico. 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. 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. Desarrollando un sistema para 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, información de salud, transformadores, Scrum.

ABSTRACT

In the city of Ambato - Ecuador, the company “Liargy” is dedicated among its services for analyzing transformer dielectric oils to determine the insulating oil's to physical and chemical electrical properties to anticipate possible failures. Currently, the results of the analysis of dielectric oils are diagnosed with the use of classical logic, a formal system of reasoning and argumentation based on well-defined principles and rules based on the parameters of current regulations, which causes slowness in the diagnostic process. The objective of the research is to develop an experimental fuzzy expert system that, based on the results of the physicochemical, chromatographic, and dielectric analysis and compound contents of insulating mineral oils and the current regulations, allows the diagnosis the condition of the transformer based on

¹ Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Escuela de Ingenierías. Ambato, Ecuador.

E-mail: franklin.r.camacho.c@pucesa.edu.ec; glopez@pucesa.edu.ec; tfreire@pucesa.edu.ec; drobayo@pucesa.edu.ec

* Autor de correspondencia: glopez@pucesa.edu.ec

the calculation of a health index. The research work uses theoretical and empirical methods, where the research design is non-experimental transversal descriptive with an inductive-deductive method. The development methodology adopted is Scrum combined with fuzzy logic and classical analysis operational techniques to develop a system to automate the diagnosis of the state of electrical transformers based on the calculation of the health index with six variables of the physicochemical properties of the insulating oil, through fuzzy inference analysis and expert criteria rules.

Keywords: Expert system, fuzzy logic, health information, transformers, Scrum.

INTRODUCCIÓN

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 pueden llegar a superar la mitad del precio del activo [1]. Por lo tanto 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. Más de la mitad de las fallas pueden ser 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 [1].

Los sistemas expertos (SE) son considerados parte del grupo de la inteligencia artificial, son sistemas que utilizan el conocimiento humano almacenado en un computador para dar solución a los inconvenientes que demanden la experiencia de expertos, y a la vez puedan ser utilizados por personas no especializadas para resolver un problema [2]. Estos sistemas tienen como base el saber humano, por lo que, la estructura requiere técnicas para generar bases 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. [2] 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.

Actualmente, el análisis y diagnóstico del aceite dieléctrico es facilitado por valores recomendados de las normativas vigentes como la norma ASTM D1533, titulada “*Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography*”, que establece un método para analizar los gases disueltos en el aceite aislante eléctrico mediante cromatografía de gases, sin embargo, 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 entender los resultados y al encontrarse disgregados dificultan la toma de decisiones de medidas preventivas. [2] En el estudio de Cerón, Echeverry, Aponte y Romero [1] 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, Salama y Ibrahim [3] para transformadores menores a 69et al., sin embargo, no existe una herramienta que automatice este proceso y facilite el diagnóstico e integración de los resultados.

En la ciudad de Ambato - Ecuador existe la empresa INEDYC dedicada a proveer servicios de diseño, construcción y mantenimiento de redes y equipos eléctricos. Dentro de estos servicios una de las empresas asociadas bajo el nombre de “Liargy” se dedicada al análisis de aceites dieléctricos de transformadores con el fin de determinar las propiedades del aceite 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 una síntesis que sea reflejada 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. Para lograr una evaluación exhaustiva de la calidad del software desarrollado, se llevó a cabo una serie de pruebas en cada Sprint. Estas pruebas incluyeron pruebas unitarias, pruebas de integración y pruebas de aceptación, todas diseñadas para garantizar que las nuevas funcionalidades desarrolladas cumplan con los requisitos especificados y funcionen correctamente en el contexto del sistema más amplio.

Posteriormente se valida el producto en su totalidad, por una parte bajo la normativa ISO/IEC 9126 y por otra, por medio de la comparación de los resultados del sistema experto desarrollado con los resultados de las investigaciones que se toman como base: Abu-Elanien, Salama y Ibrahim [3] y Cerón, Echeverry, Aponte y Romero [1]; adicionalmente, se evalúa los resultados finales a través de pruebas que permiten verificar el funcionamiento correcto del software mediante la comparación de los diagnósticos emitidos por el sistema y el criterio de expertos en el área.

ESTADO DEL ARTE Y LA PRÁCTICA

El artículo presentado por Abu-Elanien, Salama y Ibrahim [3], 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, ya que, 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 pueda procesar múltiples resultados numéricos e inferir una salida lingüística para determinar un estado.

En Paraguay, el estudio de Sánchez, Aranda y Maldonado [4], 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 y Romero [1], 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 contexto nacional, la publicación de Chicaiza y Valencia [5], 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, ya que 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, 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 [6]. Además, Montané, Arce, Dorrbercker, Areu [7], 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.

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 pueda emular el razonamiento o funciones que son consideradas como inteligentes del ser humano [2]. 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 pueden llegar a pensar. Entre las propiedades de la IA resaltan, la transparencia y honestidad [8]. 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 [9]. 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. 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 [2]. Un SE es aquel programa que utiliza métodos y procesos analíticos, similares al razonamiento humano, para poder 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 [10]. Además, la definición clásica de sistema experto (SE) dada por Díez, Gómez y Martínez [11], 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 poder 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 pueda ser 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 puede ingresar 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 poder 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 poder utilizar la salida del sistema en algún beneficio o resolución de problema. La estructura se detalla en la Figura 1.

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.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

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 [12] como: “la rapidez con la que se realiza un trabajo o gasta energía”. 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 [13]. El transformador eléctrico de potencia es una máquina estática que como el nombre lo indica cambia los valores de tensión y corriente en un sistema [14]. Del mismo modo Álvarez [15], 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

Fuente: Adaptado de Badaró, Ibañez y Agüero [2] y Martínez [33].

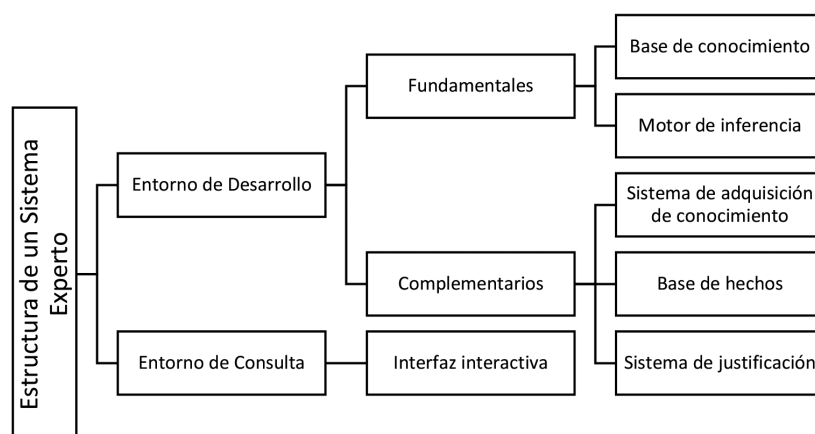


Figura 1. Estructura de un sistema experto.

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 poder 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 y Espinoza [16], 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 [17]. Dentro del grupo de operación se encuentran los transformadores eléctricos de potencia y distribución, el primero se caracteriza por potencias elevadas sobre 500et al.A. 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 [18].

Arquitectura 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 [19]. El modelo cliente-servidor, permite el desarrollo de una herramienta y su entendimiento posterior sobre lo que esta realiza. 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 puede interactuar con la interfaz y que, con base en los datos ingresados por el usuario, este produzca una salida procesada de información, es decir, mediante el uso de las distintas lógicas [20]. Permite la interacción del usuario con los diferentes procesos del servidor que cumplen un fin específico para la cual el usuario usa la aplicación como se aprecia en la Figura 2.

La lógica de presentación se encarga de todo lo relacionado a los procesos de interacción del usuario con la aplicación [19]. Al igual que la empresa Java [21] 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”. Presenta la información al usuario y este interactúa a través del ingreso de datos, su ejecución debe ser lo más independiente y transparente de la lógica del negocio, es decir, de

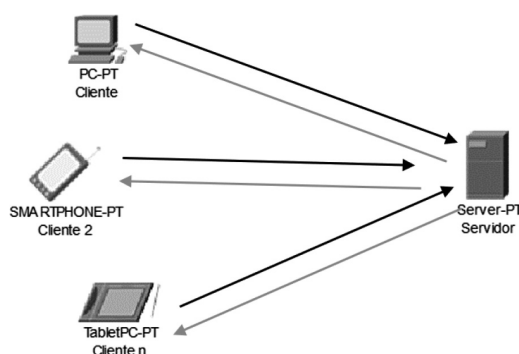


Figura 2. Arquitectura cliente - servidor.

los procesos que se llevan para el procesamiento de datos. En esta capa se presentan todos los procesos que debe realizar 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, por lo que 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 [22]. Al emplear esta lógica se manejan cambios rápidos en la infraestructura sin generar cambios sobre la presentación [22]. 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 es la gestión del almacenamiento de datos que incluye 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 [23].

METODOLOGÍA

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 [24]. Además, es definida como una implementación por fases o de estilo incremental centrándose en la simplicidad y la entrega de funciones lo antes posible [25]. 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.

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 seguido de una retrospectiva del producto llamada *Sprint Review*. El proceso se aprecia en la Figura 3.

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 pueden llegar a tener relación con el producto o los beneficios de este [24]. Los usuarios, son los destinatarios de la aplicación y pueden llegar a estar

Fuente: P. Deemer, G. Benefield, C. Larman y B. Vodde [24].



Figura 3. Proceso de Scrum.

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 pueda en etapas en orden de importancia adquirir datos, para 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, Gopalan y Shah [26], 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 [27]. El scripting es una técnica de programación, donde los comandos en un archivo son ejecutados en una línea de comandos [28]. *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* [29]. 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 poder 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 [30]. 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 pueda conocer 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 generen en los

servidores. Según Gauchat [30], 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 [31].

En la publicación de Aponte, Cadavid, Cerón, Zuñiga, Tariacuri, Calderón, Cortes, Gaona, Serna y Mena [32], 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 deber estar 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, Salama y Ibrahim [3] y Cerón, Echeverry, Aponte y Romero [3]. 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.

RESULTADOS

Para el desarrollo del sistema experto, 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 puede ser 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.

Con base a los resultados de la entrevista realizada, se determina que las características más importantes para el sistema experto difuso sean que cuente con un 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 llega a una determinada conclusión. En la Tabla 1, se detalla la recolección de las características resultantes de las entrevistas en la pila del producto.

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 4, que contiene el diagrama de los casos de uso de todo el sistema.

Un *Sprint* puede tener 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. En base a los datos recolectados, estimaciones, requerimientos generales del *Product Backlog* y la metodología *Scrum*, cada *Sprint* se diseña con el esquema representado en la Figura 5.

Tabla 1. 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

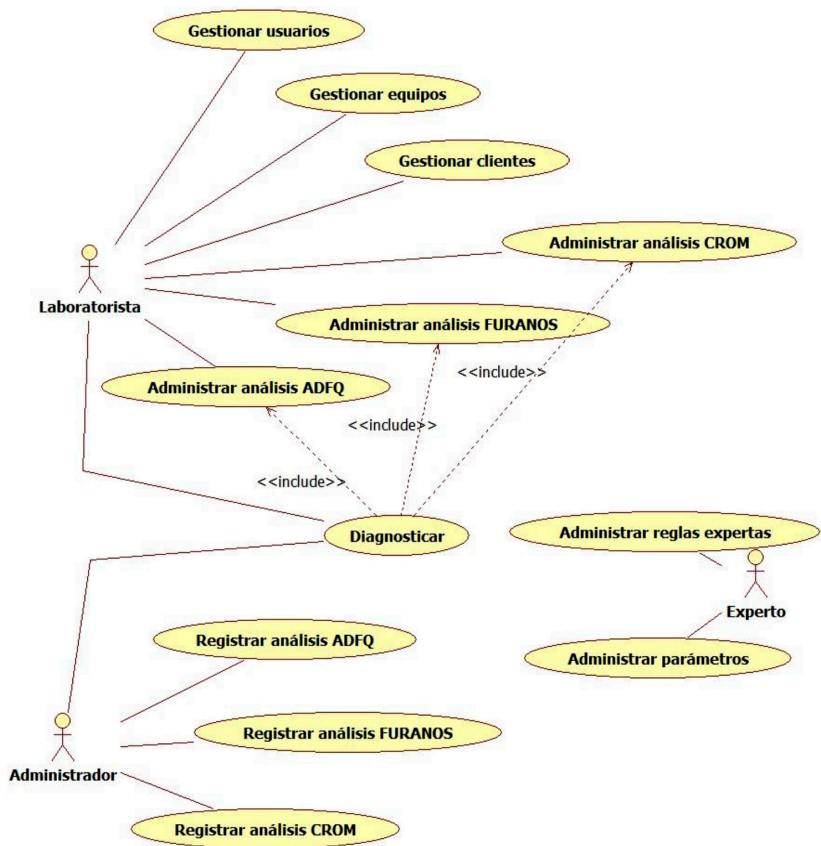


Figura 4. Casos de uso del sistema experto difuso.

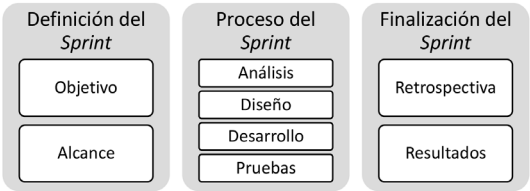


Figura 5. Detalle del Sprint.

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.

El objetivo del segundo Sprint es el de desarrollar las páginas de ingreso de resultados de los diferentes procesos del laboratorio que se convierten en los datos de entrada del sistema experto difuso. El alcance el segundo Sprint es el sistema de 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.

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.

En base a las investigaciones de Cerón, Echeverry, Aponte y Romero [1] y Abu-Elanien, Salama y Ibrahim [3] 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 6.

Iniciando con el ingreso de los diferentes resultados, donde se abarcan tres grupos de procesos: ADFQ, CROM y Furanos. Consiguientemente 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

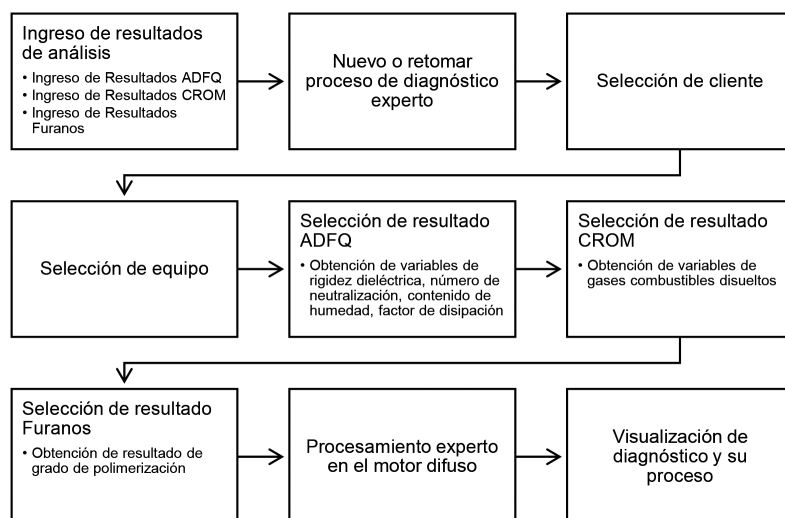


Figura 6. Proceso de ingreso y resultados de diagnóstico experto difuso.

equipo se presentan los análisis completados de cada grupo de muestras. Para que el diagnóstico experto pueda ser 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 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 serán visualizados en el informe experto programado como se muestra en la Figura 7.

Aquí se definen los conjuntos difusos de las variables en base a las investigaciones de Cerón, Echeverry, Aponte y Romero [1] para la clase de voltaje mayor a 69 kV y menor a 230 kV, el estudio de Abu-Elanien, Salama y Ibrahim [3] 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.

En la Tabla 2, 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.

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 (Figura 7) 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 rápido.

En la siguiente sección, mostrada en la Figura 8, 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. Esto permite corroborar la coherencia del sistema experto de la salida única en el índice de salud con los datos y procesamiento de entrada.

A continuación, en base a la investigación de Abu-Elanien, Salama y Ibrahim [3] se compara 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 la Tabla 3.

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

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

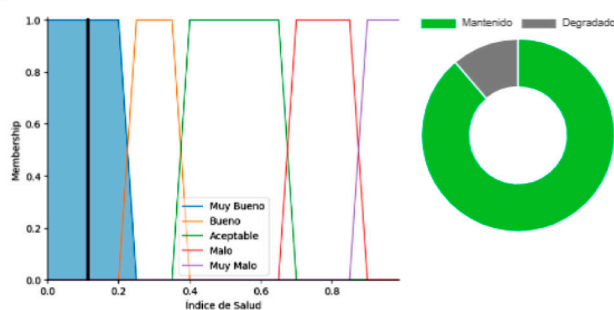


Figura 7. Desarrollo de página de informe experto sección índice de salud.

Tabla 2. Conjunto de funciones de membresía para contenido de humedad.

Variable	Contenido de Humedad (ppm).
Referencias	ASTM D1533 / IEEE C57.106 / Cerón, Echeverry, Aponte y Romero [1] / Abu-Elanien, Salama y Ibrahim [3].
Parámetros	Conjunto de Membresías.
<69 kV	
>69 kV <230kV	
>230kV	

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 ecuación (1) presentada en la investigación de Cerón, Echeverry, Aponte y Romero [1] que se detalla a continuación:

$$DP = \frac{1,51 - \log_{10}(2FAL_{ppm})}{0,0035} [ppm] \quad (1)$$

La ecuación (1) es la obtención del grado polimerización de transformadores con papel kraft

Las investigaciones mencionadas contienen la variable de 2-fal que se transformará para el sistema desarrollado en grado de polimerización a través de la fórmula 1.

La Tabla 4 contiene el número de diagnósticos agrupado por categoría que proviene tanto de la investigación mencionada como del sistema experto desarrollado. La cantidad en diferencia

Proceso de Diagnóstico

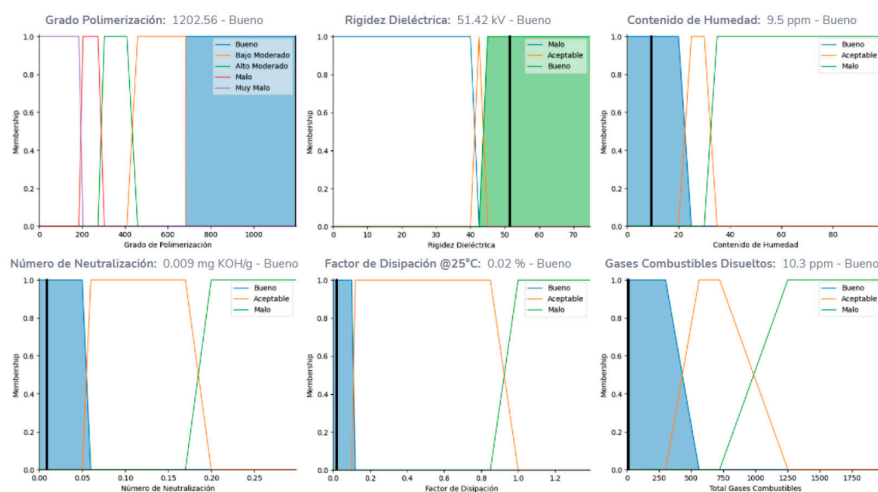


Figura 8. Desarrollo de página de informe experto sección proceso de diagnóstico.

de los diagnósticos es comparada con el número total de pruebas realizadas para calcular la similitud del diagnóstico global en contraste con las investigaciones.

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, por lo que se interpreta que la parametrización y conjuntos de membresía son más exigentes.

CONCLUSIONES

Los aspectos teóricos 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.

Como se aprecia en el desarrollo de los sets difusos que como ejemplo son listados en la Tabla 2, el criterio

mencionado en otras investigaciones conjunto con los datos recolectados en las encuestas da paso a la generación precisa de los diagnósticos que se validan en la Tabla 4 de la investigación. Adicionalmente, se observa que los cambios ligeros sobre los límites de los conjuntos difusos pueden llegar 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.

La metodología *Scrum*, a pesar de, no ser particular para la elaboración de los sistemas expertos, resulta adecuada para el desarrollo de este tipo de sistemas, además en la facilidad de identificación, diseño y cambio para las características a desarrollar en cada Sprint.

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 API cortas o interacción por línea de comandos entre lenguajes o módulos como

Tabla 3. 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, Salama y Ibrahim [3]		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

Tabla 4. 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, Salama y Ibrahim [3].	5	13	4	3	5	30
Diferencia Diagnósticos.	0	0	0	0	0	0
Similitud diagnóstico global.						100,00%

se aprecia 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.

REFERENCIAS

- [1] A. Cerón, D. Echeverry, G. Aponte y A. Romero, “Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos en Aceite Mineral con Voltajes entre 69et al. y 230et al. usando Lógica Difusa”, *Información Tecnológica*, vol. 26, no. 2, pp. 107-116, 2015, doi: 10.4067/S0718-07642015000200013.
- [2] S. Badaró, L. Ibañez y M. Agüero, “Sistemas Expertos: Fundamentos, Metodologías y Aplicaciones”, *Ciencia y Tecnología*, vol. 13, pp. 349-364, 2013, doi: 10.18682/cyt.v1i13.122.
- [3] A. Abu-Elanien, M. Salama, and M. Ibrahim, “Calculation of a Health Index for Oil-Immersed Transformers Rated Under 69et al. Using Fuzzy Logic,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 2029-2036, 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2205165.
- [4] C. Sánchez, L. Aranda y D. Maldonado, “Diagnóstico de Transformadores de potencia utilizando Lógica Difusa”, Tesis, Universidad Nacional del Este, Ciudad del Este, Paraguay, 2016. [En línea]. Disponible: <http://servicios.fpune.edu.py:8080/jspui/handle/123456789/333>
- [5] A. Chicaiza y F. Valencia, “Evaluación del Estado de Transformadores de Potencia mediante la aplicación de Lógica Difusa al análisis de gases disueltos en aceite”, en *XXVII Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica*, Quito, Ecuador, 2017. [En línea]. Disponible: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23994/1/2017AJIEEE-22.pdf>
- [6] J. Pignani, “Sistemas Expertos”, 2017. [En línea]. Disponible: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora1/monograias/pignani-sistemasexpertos.pdf
- [7] O. Montané, J. Arce, D. Dorrbercker y S. Areu, “Estado actual del diagnóstico de transformadores de potencia en las centrales eléctricas cubanas”, *Ingeniería Energética*, vol. 32, no. 1, pp. 53-61, 2011. [En línea]. Disponible: <https://marcalyc.redalyc.org/pdf/3291/329127746007.pdf>
- [8] B. Pérez, “Inteligencia artificial”, 2018. [En línea]. Disponible: https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_18-012.pdf
- [9] C. Malagón, “Introducción a la Inteligencia Artificial”, 2013. [En línea]. Disponible: https://www.nebrija.es/~cmalagon/ia/transparencias/introduccion_IA.pdf
- [10] N. Wormer, “Los sistemas expertos en las relaciones internacionales: Aplicación a la clasificación de conflictos violentos”, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2019. [En línea]. Disponible: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/51673/1/T40963.pdf>
- [11] R. Díez, A.G. Gómez y N. de A. Martínez, *Introducción a la inteligencia artificial: Sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva*, 1ra ed. Asturias: Servicio de Publicaciones Universidad de Oviedo, 2001. [En línea]. Disponible: <https://books.google.com.ec/books?id=RKqLMCw3IUkC>
- [12] F. Hernández, “Voltaje, corriente y potencia eléctrica”, 2016. [En línea]. Disponible: <https://educacionmediasuperior.sep.gob.mx/work/models/sems/Resource/12235/5/images/voltaje-ciencias.pdf>
- [13] V. Rexhepi, “An Analysis of Power Transformer Outages and Reliability Monitoring”, *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 418-422, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.053.
- [14] M. Rodríguez, “Transformadores”, 2012. [En línea]. Disponible: <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Trafos.pdf>
- [15] J. Álvarez, “Transformadores”, 2009. [En línea]. Disponible: https://frfq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/6735/mod_resource/content/1/7_transformador.pdf
- [16] J. Arévalo y D. Espinoza, “Análisis de Fallas en Transformadores de Potencia y su Prevención”, Tesis, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador, 2020. [En línea]. Disponible: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/21289>
- [17] P. Pérez, *Transformadores de distribución: Teoría, cálculo, construcción y pruebas*, 3ª ed. México D.F.: Reverte, 2020. [En línea]. Disponible: <https://books.google.com.ec/books?id=kF8OEAAAQBAJ>
- [18] H. Díaz, “Tipos de Transformadores”, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.energeticahoy.com/post/2020/01/29/tipos-de-transformadores>
- [19] P. Bazán, A. Fernández, N. del Río, L. Molinari, J.P. Perez, M. Banchoff, *Aplicaciones, servicios*

- y procesos distribuidos. Una visión para la construcción de software, 1ra ed. Buenos Aires: Editorial de la Universidad de La Plata, 2017. [En línea]. Disponible: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/62354/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1
- [20] J.R. Molina Ríos, M.P. Zea Ordóñez, M.J. Contento Segarra y F. G. García Zerda, “Glosas de innovación aplicadas a la pyme”, *3C Tecnología*, vol. 7, no. 1, pp. 1-19, 2018, doi: 10.17993/3ctecno.2018.v7n1e25.
- [21] Java, “Lógica de Presentación - Glosario Java”, 2015. [En línea]. Disponible: <https://glosarios.servidor-alicante.com/java/logica-de-presentacion>
- [22] Universidad de Valladolid, “El modelo cliente/servidor”, 2006. [En línea]. Disponible: https://www.infor.uva.es/~fdiaz/sd/2005_06/doc/SD_TE02_20060305.pdf
- [23] IBM, “Modelos lógicos de datos”, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.ibm.com/docs/es/ida/9.1.2?topic=modeling-logical-data-models>
- [24] P. Deemer, G. Benefield, C. Larman y B. Vodde, Información Básica de Scrum (The Scrum Primer), versión 1.1, Agile-Spain, 2009. [En línea]. Disponible: https://www.goodagile.com/scrumprimer/scrumprimer_es.pdf
- [25] A. Urteaga, “Aplicación de la metodología de desarrollo ágil Scrum para el desarrollo de un sistema de gestión de empresas”, Tesis, Universidad Carlos III, Madrid, España, 2015. [En línea]. Disponible: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23750/TFG_Aitor_Urteaga_Pecharroman.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [26] K. Bhavsar, S. Gopalan, and V. Shah, “Scrum: An Agile Process Reengineering in Software Engineering,” *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 9. no. 3, pp. 840-848, 2020, doi: 10.35940/ijitee.C8545.019320.
- [27] Python Software Foundation, “Tutorial de Python-Documentación de Python-3.9.2”, 2021. [En línea]. Disponible: <https://docs.python.org/es/3/tutorial/>
- [28] E. Bahit, *Introducción Al Lenguaje Python*, Libro de estudio del curso de la Escuela de Informática Eugenia Bahit, 2018. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/333965199_Introduccion_al_Lenguaje_Python
- [29] SciKit-Fuzzy, “SciKit-Fuzzy 0.4.2”, 2019. [En línea]. Disponible: <https://pypi.org/project/scikit-fuzzy/>
- [30] J. Gauchat, *El gran libro de HTML5, CSS3 y Javascript*, 2da ed. Barcelona, España: Marcombo S.A., 2012. [En línea]. Disponible: <https://gutl.jovenclub.cu/wp-content/uploads/2013/10/El+gran+libro+de+HTML5+CSS3+y+Javascrip.pdf>
- [31] R. Marín, “Los gestores de bases de datos (SGBD) más usados. Canal Informática y TICS”, *Revista Digital INESEM*, Abril 2019. [En línea]. Disponible: <https://revistadigital.inesem.es/informatica-y-tics/los-gestores-de-bases-de-datos-mas-usados/>
- [32] G. Aponte *et al.*, “Herramienta de Software para Estimar el Índice de Salud en Transformadores de Potencia”, *e-Gnosis*, Septiembre 2020. [En línea]. Disponible: <http://e-gnosis.udg.mx/index.php/eg/article/view/27/14>
- [33] M. Martínez, “Conocimiento y Bases de Datos: Una Propuesta de integración Inteligente”, Tesis Ph.D., Universidad de Cantabria, Santander, España, 2011. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1172/1de3.MAMcap2.pdf?s%20equence=2>