

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Diseño de un modelo computacional para la gestión inteligente de la información en los transformadores de potencia a partir de fuentes del Internet de la Energía (IoE)**

**Yoiner Tabares Galvis**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Departamento de Eléctrica, Electrónica y Computación  
Manizales, Colombia

2024

# **Diseño de un modelo computacional para la gestión inteligente de la información en los transformadores de potencia a partir de fuentes del Internet de la Energía (IoE) - Caso Central Hidroeléctrica de Caldas**

**Yoiner Tabares Galvis**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería – Automatización Industrial**

Directora:

Ph.D. Sandra Carvajal Quintero

Línea de Investigación:

Análisis de Datos

Grupo de Investigación:

Environmental Energy and Education Policy - E3P

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Computación

Manizales, Colombia

2024

*Dedico este trabajo a mi querida Madre.  
Aunque ya no estás físicamente conmigo, tu amor y enseñanzas perduran en cada rincón de mi corazón. Tu sabiduría siempre será una guía en mi vida. Te extraño profundamente y agradezco cada momento que compartimos. Vives en mí, y seguiré honrando tu memoria en todo lo que haga. Te llevo conmigo siempre, en cada paso que doy.*

# Declaración de obra original

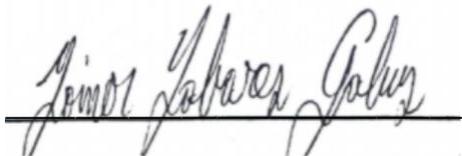
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

A handwritten signature in black ink, reading "Yoiner Tabares Galvis", is written over a solid horizontal line.

YOINER TABARES GALVIS

Octubre 16 de 2024

# Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a mis padres Amparo Galvis Cardona y Elias Tabares Agudelo por su apoyo incondicional y amor durante este trabajo; su guía y ejemplo de trabajo me han permitido alcanzar mis objetivos. A mi tutora la doctora Sandra Ximena Carvajal Quintero le expreso mi más sincero agradecimiento por creer en mí, por su orientación y motivación constante. Su capacidad para hacerme ver los objetivos y superar los obstáculos encontrados, ha sido invaluable su acompañamiento. A la docente y colega Monica Rosa Lopez Guayasamín por su apoyo, guía y colaboración durante mi trayectoria académica y profesional.

Quiero expresar mi reconocimiento a la Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P., por la oportunidad brindada en la construcción y desarrollo del presente proyecto el cual permite la investigación, innovación y competitividad en pro del crecimiento personal y profesional. Su labor para el desarrollo económico y social de la región.

A todas las personas que participaron en este proyecto investigativo de manera directa o indirecta mil gracias.

# Resumen

## ***Diseño de un modelo computacional para la gestión inteligente de la información en los transformadores de potencia a partir de fuentes del Internet de la Energía (IoE).***

Este proyecto investigativo presenta un prototipo computacional diseñado para obtener valor, optimizar la vida útil de los activos en especial de los transformadores de potencia, mediante la integración de datos y procesos en un ecosistema de Internet de la Energía (IoE). La integración de conceptos relacionados con la gestión de activos en los transformadores de potencia de las redes de distribución en Colombia requiere una metodología estructurada. Se propone metodología híbrida que combina el enfoque de pensamiento de diseño, con énfasis en el cumplimiento de la norma de Gestión de Activos (International Organization for Standardization, 2014) con tecnologías de vanguardia como Internet de las Energía y estándar como CRISP-DM.

El prototipo busca caracterizar, comprender el comportamiento y facilitar la interacción del transformador de potencia como activo físico productivo de la red eléctrica, mejorar su gestión y seguridad. El dispositivo Coresense ubicado en activos de la Central Hidroeléctrica de Caldas de acuerdo con la criticidad permite a través de sensores recolectar datos en tiempo real sobre variables como temperatura de aceite, el hidrogeno y la humedad de los transformadores de potencia. La plataforma tecnológica actúa como un ecosistema para procesar y almacenar estos datos. El análisis de la información genera indicadores que ayudan en la gestión y mantenimiento preventivo, prolongando la vida útil de los activos.

El análisis y visualización de datos en tiempo real permite optimizar la distribución de la energía, ya que se lograría tomar decisiones sobre posibles reemplazos de equipos o solamente necesidades de mantenimiento de los activos, a partir de medir el desempeño y comparar con los estándares internacionales (EIMAC, 2024) y

según el activo estudiado, determinar escenarios de operación que permitan mejorar la eficiencia de la red, y de esta manera impactar en la reducción de los costos de mantenimiento, reparación e interrupciones en el servicio, tal como lo plantea debe ser realizada la operación de las redes de distribución según la regulación colombiana (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2018)

Para lograr la visualización de información en la gestión de activos de transformadores de potencia, se requiere implementar un panel interactivo que presenta de manera clara las asociaciones entre variables y los comportamientos tempranos del equipo. Este panel se propone que integre gráficos y análisis de datos, facilitando la identificación de patrones y anomalías que podrían señalar problemas inminentes.

Lo anterior es la base para comenzar con la implementación de un prototipo computacional que ofrezca una solución tecnológica, fundamentando un ecosistema basado en el concepto IoE, para gestionar la seguridad, confiabilidad y vida útil de los activos en una red de distribución eléctrica (Iberdrola, 2024).

Palabras claves: Gestión de datos, gestión de activos, Internet de la Energía (IoE), transformador de potencia, análisis de datos, visualización de datos.

# Abstract

## ***Design of a computational model for the intelligent management of information in power transformers based on sources from the Internet of Energy (IoE).***

This research project presents a computational prototype designed to add value and optimize the lifespan of assets, especially power transformers, through the integration of data and processes in an Internet of Energy (IoE) ecosystem. The integration of concepts related to asset management in power transformers in distribution networks in Colombia requires a structured methodology. A hybrid methodology is proposed that combines the design thinking approach, with an emphasis on compliance with the Asset Management standard (International Organization for Standardization, 2014), along with cutting-edge technologies such as the Internet of Energy and standards like CRISP-DM.

The prototype aims to characterize, understand the behavior, and facilitate the interaction of the power transformer as a productive physical asset of the electrical grid, improving its management and safety. The Coresense device, located on assets in the Caldas Hydroelectric Power Plant according to their criticality, allows the collection of real-time data through sensors that measure variables such as oil temperature, hydrogen, and humidity in power transformers. The technological platform acts as an ecosystem for processing and storing this data. The analysis of this information generates indicators that aid in management and preventive maintenance, prolonging the lifespan of the assets.

Real-time data analysis and visualization enable the optimization of energy distribution, as decisions could be made regarding potential equipment replacements or maintenance needs based on performance measurements, comparing them with international standards (EIMAC, 2024), and according to the asset studied, determining operational scenarios that improve grid efficiency. In this

way, the system could impact the reduction of maintenance, repair, and service interruption costs, as outlined in the operational requirements for distribution networks under Colombian regulations (Energy and Gas Regulatory Commission, 2018).

To achieve the visualization of information in the asset management of power transformers, it is necessary to implement an interactive dashboard that clearly presents the relationships between variables and the early behaviors of the equipment. This dashboard is proposed to integrate graphs and data analysis, facilitating the identification of patterns and anomalies that could indicate imminent problems.

The above serves as the foundation for the implementation of a computational prototype that offers a technological solution, based on an IoE-based ecosystem, to manage the safety, reliability, and lifespan of assets in an electrical distribution network (Iberdrola, 2024).

Keywords: Data management, asset management, Internet of Energy (IoE), power transformer, data analysis, data visualization.

# Contenido

Resumen.....	6
Abstract.....	8
Lista de figuras .....	12
Listado de siglas.....	14
1.    Introducción .....	16
1.1.    Problema.....	16
1.2.    Justificación. ....	19
1.3.    Objetivos General .....	22
1.4.    Objetivos Específicos .....	22
1.5.    Alcance y metodología .....	23
2.    Antecedentes .....	26
2.1.    IoE (Internet Of Energy) .....	26
2.2.    Gestión de Activos.....	31
2.3.    Gestión de Datos.....	34
2.4.    Dispositivo de Monitoreo. ....	37
3.    Metodología .....	40
3.1.    Introducción a la metodología. ....	40
3.2.    Proceso de ETL (Extracción, Transformación y Carga de Datos). ....	47
3.2.1.    Diseño del modelo de datos .....	47
3.2.2.    Procesamiento de Datos. ....	50
3.3.    Visualización estratégica de Datos. ....	53
3.4.    Transformadores de potencia.....	55
3.5.    Protocolos de comunicación .....	58
4.    Estudio de Caso.....	67
4.1.    Zona de estudio.....	67

4.2.	Criticidad .....	70
4.3.	Análisis de riesgo y resultado de criticidad .....	71
4.4.	Activo transformador de potencia .....	73
5.	Resultados .....	78
5.1.	Extracción de Datos.....	78
5.2.	Transformación de Datos. ....	85
5.3.	Almacenamiento de Datos. ....	91
5.4.	Visualización y análisis de Datos. ....	94
6.	Conclusiones generales y Trabajos futuros .....	104
6.1.	Objetivo Especifico 1: .....	104
6.3.	Objetivo Especifico 2: .....	106
6.3.	Objetivo Especifico 3: .....	107
6.4.	Conclusiones generales. ....	109
6.5.	Trabajos futuros. ....	110
	Referencias .....	112

# Lista de figuras

Figura 1. SmartGrid, Conectividad y Analítica (Basado en Zahedi, 2011). .....	29
Figura 2. Ilustrativo dispositivo Coresense (ABB, 2018). .....	39
Figura 3. Modelo híbrido de Pensamiento de diseño y CRISP-DM. Adaptación propia. ....	41
Figura 4. Proceso del Modelo CRISP-DM (Martinez-Plumed et al., 2021). Adaptación propia metodología CRISP-DM. ....	43
Figura 5. Adaptación IoT Analytics.(IoT Analytics - ThingSpeak Internet of Things, 2022).(PushingBox, 2022). .....	49
Figura 6. Metodología para el desarrollo de proyectos loE. Fuente: Propia .....	51
Figura 7. Modelo del protocolo de comunicación OSI. (Kumar et al., 2014) .....	59
Figura 8. Modelo TCP/IP. (Bandhu Nath & Uddin, 2015) .....	60
Figura 9. Modelo Modbus TCP/IP. (Modbus-IDA, 2006).....	61
Figura 10. Modelo DNP3. Topología Maestro-Unidad remota. (East et al., 2009) 62	
Figura 11. Arquitectura MQTT. (Soni & Makwana, 2017). .....	63
Figura 12. Descripción general y funcionalidades del IEC 61850. (Baigent, Drew and Adamiak, Mark and Mackiewicz, Ralph and Sisco, 2004).....	65
Figura 13. Zona de influencia CHEC. GIS (Visor de redes). .....	68
Figura 14. Segmento clientes subestación de Estudio. CHEC 2022. ....	69
Figura 15. Resultado análisis de criticidad CHEC 2022.....	73
Figura 16. Modelo de Adquisición de Datos. Fuente propia. ....	76

Figura 17. Flujo del proceso loE Edge. Fuente propia.....	77
Figura 18. Representación sistema Scada CHEC. Creación propia.....	80
Figura 19. Dimensionamiento campos gestión de datos transformador de potencia. Fuente propia.....	84
Figura 20. Evaluación y dimensionamiento del crecimiento de datos y su almacenamiento. Fuente propia.....	85
Figura 21. Modelo de comunicación de datos CHEC. Elaboración propia.....	86
Figura 22. Dispositivo Coresense transformador de potencia subestación CHEC. Fuente propia.....	87
Figura 23. Procesamiento de datos SSIS - Microsoft. Fuente propia.....	89
Figura 24. Transformación y almacenamiento de datos SSIS - Microsoft. Fuente propia.....	90
Figura 25. Consulta SQL base de datos medidas Transformador Potencia. Fuente Propia.....	92
Figura 26. Resultado del monitoreo del Coresense. Fuente propia.....	95
Figura 27. Monitoreo de temperatura. Fuente propia.....	96
Figura 28. Monitoreo de humedad. Fuente propia.....	97
Figura 29. Monitoreo de hidrogeno. Fuente propia.....	97
Figura 30. Flujo de datos y validaciones Power Automate. Fuente propia.....	99
Figura 31. Mensaje electrónico controlado para el piloto de alerta automática. Fuente propia.....	100
Figura 32. Altos niveles de Hidrogeno. Fuente propia.....	101

# Listado de siglas

IoT: Internet of Things (Internet de las Cosas, por sus siglas en inglés).

IoE: Internet of Energy (Internet de la Energía, por sus siglas en inglés).

CRISP-DM: Cross-Industry Standard Process for Data Mining (Proceso estándar de la industria cruzada para minería de datos, por sus siglas en inglés)

OSI: Open Systems Interconnection (Interconexión de Sistemas Abiertos, por sus siglas en inglés)

DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency (Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa, por sus siglas en inglés)

DNP3: Distributed Network Protocol version 3 (Protocolo de Red Distribuida versión 3, por sus siglas en inglés)

MQTT: Message Queuing Telemetry Transport (Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes, por sus siglas en inglés)

CHEC: Central Hidroeléctrica de Caldas.

UPME: Unidad de Planeación Minero Energética.

ISO: International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización, por sus siglas en inglés)

DMBOK: Data Management Body of Knowledge (Marco de Conocimientos sobre Gestión de Datos, por sus siglas en inglés)



# 1. Introducción

## **1.1. Problema**

El sector eléctrico no ha sido ajeno a los cambios tecnológicos y la transformación digital trajo consigo nuevas áreas y evolución. En el campo de Internet de las Cosas (Internet of Things IoT, por sus siglas en inglés), se encuentran diversas investigaciones que se preocupan fundamentalmente por temas como: redes eléctricas inteligentes, domótica, monitoreo remoto y otros temas que han permitido la evolución del concepto y su aplicación real (Perera et al., 2014).

En un mundo cada vez más conectado, la integración de tecnologías heredadas con tendencias emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) plantea una serie de desafíos significativos. La interoperabilidad entre sistemas antiguos y nuevas tecnologías no solo demanda actualizaciones y desarrollos que pueden resultar costosos y complejos, sino que también incrementa los riesgos asociados a la ciberseguridad. Además, la creciente generación de datos por parte de los dispositivos IoT presenta retos en términos de gestión y análisis, mientras que la adaptación del personal a estas herramientas tecnológicas requiere procesos de capacitación continuos. Estos factores destacan la necesidad de abordar cuidadosamente las dificultades inherentes a la transición hacia un ecosistema tecnológico más integrado (Bhat et al., 2018).

El IoT a nivel industrial ofrece oportunidades para optimizar el control y la supervisión de los sistemas, pero también introduce retos como la interoperabilidad entre dispositivos y sistemas de diferentes fabricantes, así como la gestión de datos generados en tiempo real (Lee & Lee, 2015). Por otro lado, la transformación hacia la Industria 4.0 intensifica estas complejidades, ya que exige la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial y el big data, lo que puede resultar en una elevada inversión inicial y en la necesidad de adaptar los modelos de negocio existentes. Además, la ciberseguridad se convierte en un aspecto crítico,

dado que la conectividad aumenta las vulnerabilidades potenciales frente a ataques (Carreño Perez & Espinel Ortega, 2020). Estos desafíos destacan la importancia de diseñar estrategias que equilibren la innovación tecnológica con la sostenibilidad operativa.

En el negocio de distribución de energía eléctrica, es fundamental planificar las actividades necesarias para garantizar la disponibilidad y confiabilidad de los activos eléctricos instalados en el área de cobertura, en todos sus niveles de tensión. En el ámbito de la distribución de energía eléctrica, la planificación eficaz de actividades resulta esencial para asegurar la disponibilidad y confiabilidad de los activos eléctricos instalados dentro del área de cobertura (León Paime, 2019). Sin embargo, esta tarea enfrenta desafíos en un entorno donde la operación de las redes de distribución requiere un monitoreo constante para identificar y prevenir fallas. Asimismo, la incorporación de nuevas tecnologías, como sensores inteligentes y sistemas basados en IoT, plantea la necesidad de actualizar infraestructuras y capacitar al personal para su correcta implementación. Además, el volumen creciente de datos generados por estas tecnologías exige soluciones robustas de almacenamiento y análisis de información, lo que puede representar una barrera tanto técnica como financiera para muchas empresas del sector .

Es importante ejecutar acciones periódicas que optimicen la vida útil de los equipos de manera eficiente en términos de costos, a partir del uso de metodologías de gestión de activos. Además, estas acciones deben centrarse en asegurar la seguridad de las personas, la fauna, la flora y la preservación del medio ambiente, al tiempo que se previenen, minimizan o eliminan los riesgos de origen eléctrico. Los proyectos de gestión de datos y activos eléctricos enfrentan desafíos significativos que demandan soluciones innovadoras y eficientes. Los profesionales del sector eléctrico se encuentran en el epicentro de estos retos, donde la integración de dispositivos inteligentes y la optimización de recursos eléctricos permite mejorar la eficiencia operativa y reducir costos. Sin embargo, gestionar datos en tiempo real, asegurar la interoperabilidad de dispositivos y garantizar la

seguridad de la infraestructura son solo algunos de los desafíos complejos que deben abordarse.

Este proyecto investigativo explora desafíos que enfrentan las organizaciones en proyectos tecnológicos enfocados en la gestión de datos y activos, como el caso del transformador de potencia, analizar cómo estas tecnologías están transformando el panorama actual y qué estrategias pueden implementarse para superar estas barreras con éxito. La integración de tecnologías emergentes está revolucionando la gestión y optimización de activos críticos como los transformadores de potencia. Estos dispositivos fundamentales en la infraestructura eléctrica requieren una supervisión y mantenimiento precisos para garantizar su operación segura y eficiente a lo largo de su vida útil (Priyo Das & Carlos Leicht PGTR, 2019). Bajo este contexto, el desarrollo de un prototipo computacional que integre datos y procesos en los transformadores de potencia representa un avance significativo hacia la mejora de la caracterización, comportamiento e interacción en este ecosistema loE, explorar cómo los conceptos de Internet de la Energía y la implementación de un prototipo computacional puede contribuir a aumentar la seguridad, la gestión de su información y vida útil de los transformadores de potencia. Analizar los desafíos actuales en la gestión de estos activos, las ventajas de la aplicación de tecnologías loE, y cómo se puede optimizar la monitorización, diagnóstico y mantenimiento preventivo, proporcionando así un marco robusto para la gestión eficiente de infraestructuras eléctricas críticas.

## **1.2. Justificación.**

La amplia gama de opciones que brinda el IoT ha permitido la integración profunda de los enlaces en una cadena de energía y tecnología de la información contribuye al sistema eléctrico de una manera eficiente (Pawar & Vittal K, 2019). Ciertamente, la tecnología se ha convertido en un motor de impulso para solucionar muchos problemas en la integración de tecnología y electricidad, incluidas las características no lineales y multivariantes del campo eléctrico (International Energy Agency, 2015). Sobre esta base, la integración entre la tecnología de la información y la energía eléctrica logra realmente la Internet de la Energía (Internet of Energy IoE, por sus siglas en inglés) (Liu & Chen, 2018). La integración de componentes temáticos de Inteligencia Artificial, Computación ubicua y Análisis de grandes volúmenes de datos en repositorios, mediante el empleo de avanzadas técnicas de Minería de Datos, permite extraer patrones y conocimiento útil, optimizando la toma de decisiones y mejorando la eficiencia en la gestión de información, las implementaciones serán afines a los métodos aplicados en la obtención de datos a través de sensores IoT, vinculado la academia con la industria y la sociedad civil (Pincay-Ponce et al., 2020).

El gobierno colombiano, a través de su ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC) en el año de 2019 publica el documento CONPES 3975 que define los lineamientos y políticas para la “Transformación Digital e Inteligencia artificial” para el Estado colombiano (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia, 2019). Como resultado de estas políticas gubernamentales, el país asume el liderazgo regional al ser el primero en Latinoamérica en adoptarlas. Esto ha facilitado la eliminación de barreras para la adopción tecnológica, promovido la innovación digital en los sectores público y privado, fortalecido el capital humano y creado un entorno favorable para que Colombia aproveche las oportunidades y enfrente los retos de la cuarta revolución industrial.

La norma ISO 55000 (International Organization for Standardization, 2018) provee la terminología y la estructura necesaria para un sistema de gestión de activos, permite a la organización alcanzar sus objetivos a través de la gestión eficaz y eficiente de sus activos. La aplicación de un sistema de gestión de activos proporciona el aseguramiento de los objetivos empresariales y se pueden alcanzar de manera consistente y sostenible con el paso del tiempo.

Dos revoluciones tecnológicas están dando forma a los albores del siglo XXI: el desarrollo de la internet y el cambio hacia un sistema energético global libre de carbono. Este último desafío recibió un impulso en 2015, cuando el G7 se comprometió a eliminar los combustibles fósiles para el año (Huang et al., 2018). Con el advenimiento de la Internet de las cosas (IoT), las revoluciones tecnológicas en lo digital, energético y comunicaciones están convergiendo rápidamente gracias a la analítica de datos, redes inteligentes y tecnologías de energía renovable. Esto podría transformar la gestión y el consumo de energía, creando la 'Internet de la Energía' (IoE). Esta infraestructura permitirá la comunicación y gestión en tiempo real entre fuentes de energía, consumidores y redes, optimizando el consumo y promoviendo la sostenibilidad (Capasso et al., 2018; Y. Wu et al., 2021).

Aparece un nuevo concepto que integra computación y energía (IoE, Internet de la Energía), la tecnología se concebirá como una forma de promover la reducción en los costos de la infraestructura energética existente, optimizando el rendimiento de la generación, transmisión y utilización de la electricidad a través de la tecnología IoT (de Andrade, 2013). La integración de nuevas tecnologías y el monitoreo avanzado en redes de distribución eléctrica son esenciales para mejorar la eficiencia y confiabilidad en un entorno cada vez más complejo.

Los desafíos relacionados con el IoT a nivel industrial, como la interoperabilidad entre sistemas de diferentes fabricantes y la gestión segura de datos en tiempo real, reflejan la urgencia de adoptar enfoques innovadores. Asimismo, el contexto de la Industria 4.0 demanda la implementación de soluciones avanzadas como la

inteligencia artificial y el big data, que, aunque prometen revolucionar el sector, implican retos como altos costos iniciales, adaptación organizacional y la mitigación de riesgos de ciberseguridad. Este proyecto investigativo busca abordar estas problemáticas, ofreciendo estrategias que no solo permitan superar estas barreras, sino también posicionen a las redes de distribución como un pilar tecnológico alineado con las tendencias globales de innovación y sostenibilidad.

### **1.3. Objetivos General**

Diseñar un prototipo computacional que integre datos y procesos, en los transformadores de potencia que permita la caracterización, comportamiento e interacción en un ecosistema loE para aumentar la seguridad y vida útil en este activo.

### **1.4. Objetivos Específicos**

- Identificar una metodología que permita la integración de conceptos relacionados con la gestión de activos en los transformadores de potencia de las redes de distribución en Colombia
- Diseñar un modelo investigativo que permita encontrar asociaciones a partir del flujo de información, herramientas de software y procesos análisis de datos en el caso de estudio del transformador de potencia.
- Proponer un componente para la visualización de información que permita presentar las asociaciones encontradas y comportamientos tempranos del transformador de potencia.

### **1.5. Alcance y metodología**

En un mundo cada vez más digitalizado y con grandes volúmenes de datos, la industria energética se encuentra en constante búsqueda de soluciones innovadoras para optimizar la eficiencia operativa y garantizar la confiabilidad de sus activos críticos. En este contexto, la implementación de tecnologías de Internet de la Energía (IoE) en los transformadores de potencia surge como una estrategia prometedora para mejorar la gestión de datos y potenciar la eficacia de los procesos de mantenimiento y operación. La dificultad de integrar sistemas antiguos con nuevas tecnologías implica asegurar la compatibilidad entre los dispositivos y protocolos modernos, lo cual puede requerir inversiones significativas en actualizaciones, desarrollo de software y equipos; la gestión y análisis de los datos generados por los dispositivos IoE son un desafío.

El presente proyecto investigativo presenta una propuesta para el desarrollo de un prototipo de IoE aplicado a los transformadores de potencia, en consonancia con los principios y requisitos establecidos en la norma ISO 55001 sobre gestión de activos (AENOR, 2015; International Organization for Standardization, 2014). Esta norma proporciona un marco de referencia integral para la gestión eficaz de activos físicos, enfocándose en la gestión y optimización, el desempeño y rendimiento de los activos, la reducción de riesgos y la maximización del valor del activo a lo largo de su ciclo de vida. Asegurar la recolección, almacenamiento y procesamiento eficiente de los datos, incluye establecer una infraestructura tecnológica que permita la captura continua (Foster & Tom, 2013). Almacenarlos de manera segura y accesible para su posterior análisis, facilitando la detección temprana de anomalías, la toma de decisiones informadas y la gestión de los activos.

La gestión de activos se beneficia de la integración del pensamiento de diseño y la metodología CRISP-DM (Proceso estándar de la industria cruzada para minería de datos, por sus siglas en inglés), ya que ambos enfoques priorizan la comprensión profunda de las necesidades de los usuarios y la optimización de procesos (Pais,

2019). Al aplicar el pensamiento de diseño, los gestores pueden identificar no solo los requisitos funcionales de los activos, sino también las expectativas de los usuarios finales, lo que permite una toma de decisiones más informada y centrada en el ser humano. A través de la metodología CRISP-DM, se establece un marco sistemático que guía la recolección y análisis de datos relevantes, facilitando la identificación de patrones y tendencias que informan estrategias de gestión. Esta sinergia entre enfoques asegura que las decisiones en la gestión de activos sean más efectivas, alineadas con los objetivos organizacionales y adaptadas a las realidades cambiantes del entorno (Schröer et al., 2021).

El pensamiento de diseño es un enfoque centrado en el ser humano para la innovación que busca entender las necesidades del usuario, definir problemas y generar soluciones creativas (Córdoba Cely et al., 2015). Cuando se aplica a la metodología CRISP-DM, este enfoque puede transformar el análisis de datos en un proceso más efectivo y relevante (Schröer et al., 2021).

El pensamiento de diseño enfatiza la empatía con los usuarios, por lo tanto, es fundamental entender no solo los objetivos empresariales, sino también las necesidades y deseos de los usuarios finales. Esto ayuda a definir problemas más relevantes y a formular preguntas más efectivas. Los datos deben prepararse de manera que se alineen con las necesidades de los usuarios y las expectativas del negocio, involucrar a las partes interesadas puede mejorar significativamente este proceso. La combinación del pensamiento de diseño con la metodología CRISP-DM no solo mejora la calidad de los resultados, sino que también asegura que estos resultados sean realmente útiles y aplicables en la gestión de activos. Al centrarse en el ser humano en cada etapa del proceso, se puede lograr una mayor innovación y efectividad en el análisis de datos (Córdoba Cely et al., 2015; Martínez-Plumed et al., 2021).

La metodología propuesta se fundamenta en los siguientes pilares:

- **Análisis de requerimientos:** Se llevará a cabo una evaluación de las necesidades operativas y de mantenimiento de los transformadores de potencia, identificando los datos clave que deben ser capturados y analizados para optimizar su desempeño y prolongar su vida útil.
- **Diseño del sistema loE:** Se desarrollará un diseño detallado del sistema IoT enfocado en el activo transformador de potencia, definiendo los sensores, actuadores y dispositivos de comunicación necesarios para recopilar datos en tiempo real sobre el estado operativo y las condiciones ambientales de los transformadores. Se procederá a la implementación del prototipo de loE en un entorno piloto, siguiendo las mejores prácticas de ingeniería y asegurando la gestión con el sistema de gestión de activos existente.
- **Integración con la norma ISO 55001:** Se establecerán los procedimientos y controles necesarios para garantizar la conformidad del sistema loE con los requisitos de la norma ISO 55001 (International Organization for Standardization, 2014), incluyendo la gestión de riesgos, la planificación de mantenimiento y la mejora continua. Una evaluación exhaustiva del desempeño del prototipo de loE, analizando su impacto en la eficiencia operativa, la disponibilidad del activo y la reducción de costos asociados al mantenimiento.

Al adoptar esta metodología, las organizaciones del sector eléctrico pueden avanzar hacia una gestión de activos más proactiva y basada en datos, aprovechando el potencial de las nuevas tecnologías de la cuarta revolución para optimizar el rendimiento de los transformadores de potencia y garantizar la continuidad del suministro eléctrico en un entorno cada vez más dinámico y exigente.

## 2. Antecedentes

### 2.1. *IoE (Internet Of Energy)*

El constante avance tecnológico es un reto para las compañías día a día ya que se requiere con mayor rapidez dar respuesta a la creciente demanda de digitalización (Brown et al., 2019) para que se logre integrar el uso correcto de la tecnología en pro de mejorar la productividad de las empresas (Gartner Inc., 2018). La Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC SA ESP BIC) no es ajena a este reto, especialmente en el negocio de distribución el reto se encuentra en planear las actividades eficientes de planeación, operación e inversión que garanticen la disponibilidad y confiabilidad de los activos eléctricos instalados en el área de cobertura CHEC.

Para lograr abordar este reto en todos sus niveles de tensión es fundamental ejecutar acciones regulares que permitan garantizar la vida útil de los equipos de manera óptima y costo eficiente. Lo anterior, a partir de implementar prácticas que garanticen la seguridad de las personas, la vida animal, vegetal y la preservación del medio ambiente, previniendo, minimizando o eliminando los riesgos de origen eléctrico (Minenergía, 2024).

La actividad de distribución de energía plantea un problema para el sector eléctrico del país y la región; debido a que es el segmento de los sistemas eléctricos donde se presentan más del 70% de fallas y desconexiones (León Paime, 2019), entre las cuales se encuentra las de tipo natural como la topología de los territorios que se caracterizan por montaña, los efectos del cambio climático, tales como calentamiento en conductores en temporadas de verano y aumento en el nivel cerámico en temporada de lluvias (IDEAM, 2024).

Por lo anterior, aumentar la observabilidad de los activos de la red de distribución representa una oportunidad para el sector eléctrico colombiano que en los últimos

años ha enfrentado desconexiones fortuitas y que a través de la transformación propone modificar las redes de distribución pasivas, en redes de distribución monitoreadas y controladas (León Paimé, 2019).

En la actualidad las empresas del sector eléctrico se encuentran reguladas bajo estrictos esquemas regulatorios (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2018) que conllevan a estándares de altos servicio e indicadores de calidad garantizando su administración, operación y mantenimiento de los activos de eléctricos implicados en la distribución y transmisión eléctrica (Gómez & Suárez, 2017). La gestión de sus activos y la incorporación de estas políticas define un conjunto de requisitos y buenas prácticas que al ser implementados y mantenidos garantizan el buen desempeño de la gestión de activos de una organización, respondiendo a las necesidades y expectativas de los stakeholders y asegurando la creación y mantenimiento de valor, así como una visión global de los activos en una economía circular y digital (Pais, 2019).

El concepto de digitalización en las redes eléctricas e Internet de las Cosas (IoT) fue propuesto en 1999 en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) por Kevin Astohn, donde se investigaba la identificación por radiofrecuencia en red (RFID), que permite a los objetos conectarse e intercambiar datos, y tecnologías de detección por sensores (Bhat et al., 2018). En Colombia, para las empresas del sector eléctrico expone Las redes de distribución eléctrica deben incorporar varios elementos para transformarse en redes inteligentes: en primer lugar, sensores y medidores avanzados que permitan la monitorización en tiempo real del flujo de energía y del estado de la infraestructura. También requieren sistemas de comunicación bidireccional para facilitar el intercambio de datos entre usuarios, generadores y operadores de la red. Además, es fundamental implementar tecnologías de automatización que optimicen de manera integral la gestión tanto de la demanda como de la oferta de energía, alineándose con las mejores prácticas de eficiencia energética establecidas por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (León Paimé, 2019; UPME, 2016). Igualmente, la integración de soluciones

de almacenamiento de energía y herramientas avanzadas de análisis de datos, facilitan el trabajo en pro de mejorar la eficiencia operativa, la resiliencia del sistema eléctrico y su capacidad de respuesta ante contingencias. Estas medidas no solo contribuyen a la sostenibilidad y estabilidad del sistema, sino que también permiten una gestión más eficiente de los recursos energéticos, favoreciendo el cumplimiento de los objetivos nacionales de transición energética y reducción de emisiones. (UPME, 2016).

La consolidación de las SMART GRIDS (redes inteligentes), permiten optimizar la infraestructura de suministro de electricidad que mejora la eficiencia y la resiliencia de la red, al mismo tiempo que capacita a los consumidores y aborda los problemas de sostenibilidad energética (Brown et al., 2019). El concepto surgió de la necesidad de mejorar la distribución del sistema eléctrico, con el objetivo de contribuir a la combinación de tecnologías habilitadoras, hardware, software o prácticas que colectivamente hacen la entrega energética más eficiente y la red más confiable, versátil, segura, resistente y, en última instancia más útil para los consumidores (Blarke & Jenkins, 2013) (Díaz Andrade et al., 2011).

La evolución de las redes eléctricas tiene como dirección modernos sistemas eléctricos acordes a la nueva revolución industrial de donde se están implementando equipos y software que permitan el monitoreo en tiempo real de la red eléctrica, al igual que su gestión y apoyo a la toma de decisiones (International Energy Agency, 2015; Zhou et al., 2016). En el año 2011 se propuso un modelo de Smart Grid el cual se ha adaptado a contexto actual, como se observa en la Figura 1 denominado “SmartGrid, conectividad y analítica”, éste presenta la visión a futuro de la IEEE de cómo se daría el tema de redes eléctricas conectadas, redes inteligentes y auto gestionables, brindado mayor calidad y continuidad en sus servicios; desde su generación, pasando por su distribución, dando poder y decisión sobre los usuarios que cada día están más conectados, una visión de las redes eléctricas inteligentes que hoy es una realidad (Wang et al., 2018).

La infraestructura eléctrica debe acoplar estos nuevos elementos a las redes actuales en la búsqueda de redes inteligentes; con apoyo de los avances y desarrollos tecnológicos y computacionales permitan la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, optimizando la operación del sistema eléctrico en el país y de la región (Yaman & Bicen, 2019).

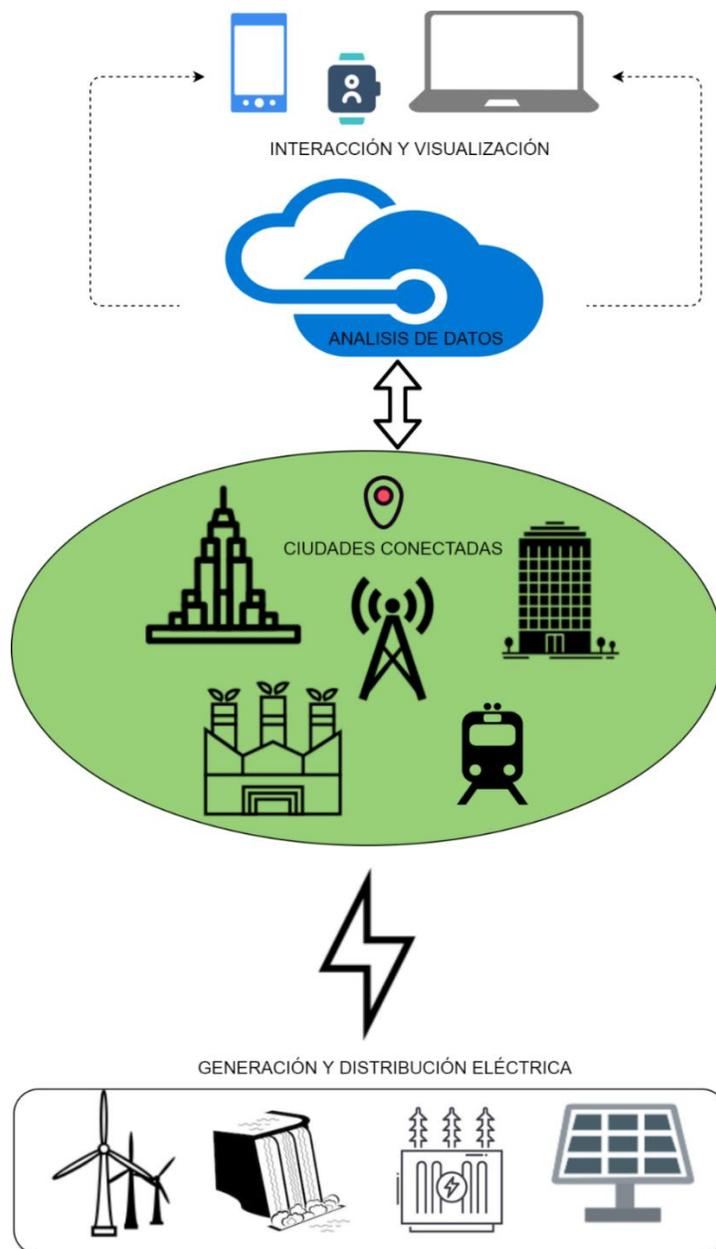


Figura 1. SmartGrid, Conectividad y Analítica (Basado en Zahedi, 2011).

Las redes inteligentes facilitan la prevención y reducción de fallas en los equipos, incluyendo las fallas humanas. Posteriormente, permitirá optimizar la capacidad instalada y automatizar los procesos en los diversos niveles del sector energético. Adicionalmente, permiten comprender y auditar las pérdidas en la transmisión y distribución de energía al implementar generación distribuida y hacer más eficiente el consumo gracias a las Smart Grid (Dileep, 2020).

La implementación de redes de distribución inteligentes constituye una oportunidad clave para optimizar la gestión de activos en el sector eléctrico. Estas redes posibilitan el monitoreo en tiempo real de la infraestructura eléctrica, lo que facilita la identificación temprana de fallas y permite una gestión más eficiente del mantenimiento preventivo. Mediante el uso de tecnologías avanzadas como sensores, medidores inteligentes y sistemas de comunicación de última generación, las empresas del sector pueden mejorar la eficiencia operativa, prolongar la vida útil de sus activos y reducir significativamente los costos operativos, contribuyendo a una operación más sostenible y resiliente (Brown et al., 2019).

## **2.2. Gestión de Activos.**

La norma ISO 55001 (International Organization for Standardization, 2014) permite a la organización alcanzar sus objetivos a través de la gestión eficaz y eficiente de sus activos. La aplicación de un sistema de gestión de activos proporciona el aseguramiento de los objetivos y se pueden alcanzar de manera consistente y sostenible con el paso del tiempo. La gestión de activos es un componente esencial en la operación eficiente y sostenible de organizaciones en diversos sectores. La Norma Internacional ISO 55001 establece un marco de referencia para la gestión de activos, proporcionando pautas y mejores prácticas que permiten a las organizaciones maximizar el valor de sus activos y mejorar su desempeño a lo largo del tiempo (AENOR, 2015).

La Gestión de Activos considera el ciclo completo de vida de los activos, desde su adquisición hasta su disposición, abarcando la planificación, adquisición, operación, mantenimiento y eliminación. Busca maximizar el valor que los activos aportan a la organización, equilibrando costos, riesgos y desempeño. La mejora y evolución de las redes eléctricas tiene como dirección modernos sistemas eléctricos acordes a la nueva revolución industrial de donde se están implementando equipos y software que permitan el monitoreo en tiempo real de la red eléctrica, al igual que su gestión y apoyo a la toma de decisiones (International Energy Agency, 2017; Zhou & Yang, 2015).

Los transformadores como activo físico son un elemento fundamental en la cadena de distribución de energía, son componentes fundamentales en los sistemas eléctricos de alta y media tensión. Su importancia radica en varios aspectos para el suministro eléctrico y el funcionamiento de las infraestructuras modernas (Cerón et al., 2015). De allí parte la importancia de identificar y abordar los riesgos asociados con los activos en este caso del transformador de potencia, permitiendo una toma de decisiones informada y una reducción de la incertidumbre, buscando el equilibrio

entre el rendimiento deseado de los activos y los costos asociados a su gestión (Pais, 2019).

La metodología de criticidad tiene como objetivo definir los criterios y directrices bajo los cuales se realiza el análisis de criticidad de los activos físicos productivos acorde a la norma ISO 55001 donde el numeral 9.1 nos presenta el “Seguimiento, medición, análisis y evaluación” de los activos (International Organization for Standardization, 2014), de tal forma que se puedan identificar los impactos que se generan a la calidad de la prestación del servicio, la seguridad de las personas, el medio ambiente, las finanzas y la reputación cuando ocurre una falla en un activo en el caso de esta tesis, el activo es transformador de potencia (Chec & Del, 2022).

Dentro de los pasos para el desarrollo de la metodología el primero de ellos consiste en identificar los componentes clave de la red de distribución eléctrica que pueden afectar significativamente la confiabilidad del suministro en las redes de distribución. A continuación, se debe establecer los criterios que se utilizarán para evaluar la criticidad de los componentes. Estos criterios pueden incluir la importancia del componente en el suministro de energía, el impacto de su falla en la continuidad del servicio, la disponibilidad de equipos de respaldo, la dificultad y el tiempo requerido para la reparación, indicadores de calidad, entre otros factores relevantes.

La recolección de datos detallados sobre los componentes de la red de distribución eléctrica, como su capacidad instalada, los clientes asociados, el historial de eventos, los tiempos de reparación y los indicadores de calidad del servicio, para mejorar la gestión operativa y la planificación estratégica del sector eléctrico en Colombia. Este enfoque no solo permite optimizar el mantenimiento preventivo y la respuesta ante fallas, sino que también facilita el cumplimiento de las normativas regulatorias del país y contribuye a la mejora continua del servicio. Una gestión adecuada de estos datos es fundamental para garantizar la eficiencia, la confiabilidad y la sostenibilidad del sistema eléctrico, favoreciendo el acceso a un servicio de calidad para todos los colombianos. Cada una de estas variables de

datos posee un valor y una asignación de pesos y puntajes a los diferentes criterios de criticidad identificados en función de su importancia relativa. Estos puntajes pueden basarse en datos históricos, o estimaciones de expertos técnicos. Finalmente, el análisis de los resultados examina los valores de criticidad calculados y clasifica los componentes de la red en función de su nivel de criticidad (Salamanca Jaimes et al., 2016). Esto permite identificar los componentes más críticos que requieren una mayor atención en términos de mantenimiento, monitoreo y planificación de contingencias de la red de distribución eléctrica.

El nivel de criticidad se encuentra dado por el resultado más alto entre los cinco impactos evaluados, el grado de criticidad resultante es un nivel cualitativo con definiciones (Bajo, Medio, Alto y Muy Alto). Los activos con resultados Alto y Muy Alto, deben ser considerados para una posterior evaluación y planificación de controles que permitan disminuir o controlar esta criticidad alcanzada (Chec & Del, 2022).

### **2.3. Gestión de Datos.**

La gestión de datos y el gobierno de datos son aspectos fundamentales en el funcionamiento eficiente y exitoso de las empresas en la era de la información. Una gestión adecuada asegura que los datos estén disponibles, sean precisos y se puedan analizar de manera efectiva para respaldar decisiones fundamentadas (Foster & Tom, 2013).

Una correcta gestión de datos permite una mayor eficiencia en las operaciones empresariales. Al tener acceso a información precisa y oportuna, los procesos pueden ser más ágiles y efectivos. En muchas industrias, existen regulaciones estrictas sobre cómo se deben gestionar y proteger los datos. El incumplimiento puede llevar a sanciones legales significativas (Hidalgo & Perez, 2017).

Los datos gestionados permiten a las empresas descubrir tendencias, patrones y oportunidades que pueden aprovechar para innovar y mantenerse competitivas. En cambio, la gestión ineficiente de datos puede llevar a redundancias, errores y pérdida de tiempo. Una gestión adecuada puede reducir estos costos operativos (Foster & Tom, 2013). En un mundo cada vez más digital y orientado a los datos, las empresas que no puedan gestionar sus datos de manera efectiva pueden quedarse rezagadas. Una buena gestión de datos prepara a la empresa para afrontar los desafíos y oportunidades futuras (Pincay-Ponce et al., 2020).

El Data Management Body of Knowledge (DMBOK) es un conjunto de conocimientos y mejores prácticas para la gestión de datos, desarrollado por Data Management Association (DAMA International). La calidad de datos de acuerdo con el DMBOK se refiere a la precisión, integridad, consistencia, relevancia y actualidad de los datos en una organización. Garantizar la calidad de los datos es esencial para tomar decisiones precisas y confiables (DAMA International, 2022). Para medir y evaluar la calidad de los datos se emplean técnicas y herramientas de software para evaluar la calidad de los datos. Este proceso puede involucrar la identificación

de errores, la verificación de la precisión y la validación de la integridad de los datos. Posteriormente la guía recomienda la implementación acciones correctivas y preventivas para mejorar la calidad de los datos. Esto puede incluir la limpieza de datos, la estandarización de formatos y la actualización de registros.

DMBOK proporciona un conjunto de mejores prácticas esenciales para la gestión exitosa de datos. En su enfoque, resalta la importancia de establecer una estrategia clara para la gestión de datos, asegurando la calidad, integridad y seguridad de los mismos (DAMA International, 2022). Entre los métodos más utilizados, se incluyen:

- **Gobernanza de Datos:** Definir roles, responsabilidades y políticas para asegurar que los datos sean gestionados de manera consistente y conforme a las normativas.
- **Calidad de los Datos:** Implementar procesos para garantizar que los datos sean precisos, completos y estén actualizados, lo cual incluye técnicas como la limpieza y la validación de datos.
- **Arquitectura de Datos:** Establecer una infraestructura sólida que facilite el almacenamiento, procesamiento y análisis de datos de manera eficiente.
- **Integración de Datos:** Utilizar herramientas y técnicas para combinar datos provenientes de diversas fuentes, asegurando su consistencia y accesibilidad.
- **Seguridad y Privacidad:** Implementar políticas y controles para proteger los datos sensibles y asegurar que solo las personas autorizadas tengan acceso.
- **Gestión de Metadatos:** Organizar y catalogar los datos mediante el uso de metadatos, lo que facilita su comprensión, rastreo y recuperación.

- Ciclo de Vida de los Datos: Gestionar los datos desde su creación hasta su eliminación, asegurando que los datos obsoletos o innecesarios se gestionen adecuadamente.

Estos métodos ayudan a las organizaciones a manejar sus datos de forma efectiva, asegurando que sean una fuente de valor estratégico.

#### **2.4. Dispositivo de Monitoreo.**

En el mundo actual, la eficiencia y la confiabilidad de los equipos industriales son importantes para reducir costos y aumentar la productividad en cualquier operación. En este sentido, la integración de dispositivos IoT ha cobrado gran relevancia, ya que permite la monitorización y el control remoto de procesos a través de sensores inteligentes conectados a la red (Deloitte Insights, 2018). Estos dispositivos IoT optimizan la eficiencia energética, mejoran la seguridad y facilitan la toma de decisiones en tiempo real, lo que convierte al sector eléctrico en un pilar indispensable para la transformación digital de diversas industrias (Yosuf et al., 2018).

Los dispositivos IoT en redes eléctricas incluyen una variedad de sensores inteligentes y equipos de comunicación diseñados para captar datos en tiempo real, como mediciones de voltaje, corriente, temperatura, humedad, entre otros (Huang et al., 2018). Estos dispositivos suelen estar equipados con tecnologías de conectividad avanzadas como LoRa, NB-IoT o Zigbee, lo que permite transmitir datos de manera eficiente, incluso en áreas de difícil acceso o con infraestructura limitada (Marksteiner et al., 2017). Además, tienen la capacidad de operar en condiciones extremas, siendo resistentes a factores como altas temperaturas, vibraciones o inclemencias climáticas, lo que los hace ideales para entornos industriales o zonas remotas.

Su integración con plataformas de gestión centralizada permite no solo la monitorización y diagnóstico en tiempo real, sino también la automatización de respuestas ante fallos, lo que mejora la eficiencia y fiabilidad de la red. Estos dispositivos, al recolectar y analizar grandes volúmenes de datos, también habilitan el uso de inteligencia artificial y aprendizaje automático, optimizando la distribución energética y el consumo a lo largo del tiempo, y proporcionando la base para el desarrollo de redes inteligentes o Smart Grids (Dileep, 2020).

En este contexto, el dispositivo CoreSense de ABB – Hitachi (Figura 2) cobra sentido, emerge como una innovación revolucionaria que no solo optimiza el monitoreo y rendimiento, sino que también maximiza la vida útil de estos equipos fundamentales en la transmisión eléctrica (Carreño Perez & Espinel Ortega, 2020).

El dispositivo CoreSense de Hitachi es un sistema avanzado de monitoreo y diagnóstico diseñado específicamente para donde en su versión básica monitorea temperatura del aceite, hidrogeno y humedad en el transformador de potencia (ABB, 2018). Es una solución para el monitoreo continuo en línea de transformadores de potencia. Este sensor de análisis de gases disueltos detecta y mide niveles de hidrógeno y humedad en el aceite del transformador, proporcionando datos críticos para el mantenimiento predictivo y la gestión de activos. Con una interfaz web intuitiva, alarmas configurables y compatibilidad con una amplia gama de aceites, CoreSense facilita la detección temprana de fallas y optimiza el mantenimiento. Además, su diseño robusto y de bajo mantenimiento garantiza un rendimiento fiable, contribuyendo a la prevención de fallas catastróficas y a la extensión de la vida útil de los transformadores.

Este dispositivo utiliza una combinación de sensores y algoritmos inteligentes para recopilar y analizar datos en tiempo real sobre el funcionamiento del transformador de potencia. Como lo denomina ABB “El CoreSense supervisa continuamente los niveles de hidrógeno y humedad en el aceite y alerta al usuario cuando cualquiera de ellos comienza a aumentar por encima de un umbral predefinido” (ABB, 2018).

La supervisión en tiempo real complementa el análisis periódico fuera de línea de gases disueltos alertando al usuario mucho antes de la evolución de las condiciones. El dispositivo CoreSense va más allá del simple monitoreo, ya que es capaz de identificar patrones de comportamiento que sugieren posibles fallos inminentes. Esto facilita la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, lo que significa que las reparaciones se realizan antes de que ocurra un

fallo catastrófico, evitando así costosas interrupciones en cadena de suministro de electricidad (Hitachi ABB, 2019).



Figura 2. Ilustrativo dispositivo Coresense (ABB, 2018).

El dispositivo CoreSense puede ser integrado en el enfoque metodológico e investigativo para optimizar la monitorización y gestión de redes eléctricas. Inicialmente, se definen los objetivos, como mejorar la eficiencia, reducir costos de mantenimiento y prevenir fallas. Luego, se recopilan datos en tiempo real de los sensores de CoreSense, estos datos se limpian y preparan para el análisis, donde se aplican técnicas de modelado para identificar patrones y predecir fallas. Los resultados se evalúan para asegurar su relevancia, y se implementan en el entorno operativo a través de dashboards y reportes, permitiendo decisiones informadas; lo que permite maximizar el valor del dispositivo en la gestión eficiente de activos eléctricos.

## 3. Metodología

### ***3.1. Introducción a la metodología.***

En la era digital, el sector eléctrico se enfrenta a desafíos cada vez más complejos, desde la gestión eficiente de la energía hasta la modernización de la infraestructura. En este contexto, el Pensamiento de Diseño emerge como una metodología para impulsar la innovación y la mejora continua, especialmente cuando se combina con las Tecnologías de Internet de la Energía (IoE) (Huang et al., 2018). El Pensamiento de Diseño en el contexto de las tecnologías IoE para el sector eléctrico implica un enfoque holístico que se centra en comprender las necesidades y desafíos de todas las partes interesadas, desde las empresas de servicios públicos hasta los consumidores finales. Al integrar la empatía con la tecnología, se pueden crear soluciones más efectivas y centradas en el usuario (Córdoba Cely et al., 2015).

Una de las aplicaciones más prometedoras del Pensamiento de Diseño en el sector eléctrico es la optimización de la infraestructura a través de la IoE. Al aprovechar sensores inteligentes y dispositivos conectados, las empresas pueden monitorear en tiempo real el rendimiento de la red eléctrica, identificar problemas potenciales y tomar medidas preventivas para evitar interrupciones en el suministro (Jaradat et al., 2015).

Además, el Pensamiento de Diseño puede mejorar la experiencia del cliente al permitir la personalización y la automatización de los servicios eléctricos. Por ejemplo, las tecnologías pueden proporcionar a los consumidores información detallada sobre su consumo de energía, ayudándoles a tomar decisiones informadas para reducir costos y aumentar la eficiencia. Otro aspecto clave es la seguridad, tanto física como cibernética. Al diseñar sistemas IoT para el sector eléctrico, es fundamental considerar la protección de datos sensibles y garantizar la integridad de la red eléctrica contra posibles amenazas externas (Liu & Chen, 2018).

El proceso de diseño iterativo del Pensamiento de Diseño también es fundamental para el desarrollo exitoso de soluciones IoE en el sector eléctrico. A través de la prototipación y la retroalimentación continua de los usuarios, las empresas pueden refinar y mejorar constantemente sus productos y servicios para satisfacer las necesidades cambiantes del mercado (Wang et al., 2018).

El pensamiento de diseño converge con la gestión de datos a partir de la metodología CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining), como lo observamos en la Figura 3 al colocar al usuario en el centro de ambas metodologías, permite diseñar soluciones tecnológicas que respondan a necesidades reales y específicas. Al integrar datos precisos y gestionados con el enfoque empático y creativo del pensamiento de diseño, se pueden generar indicadores desarrollos innovadores y mejoras continuas.

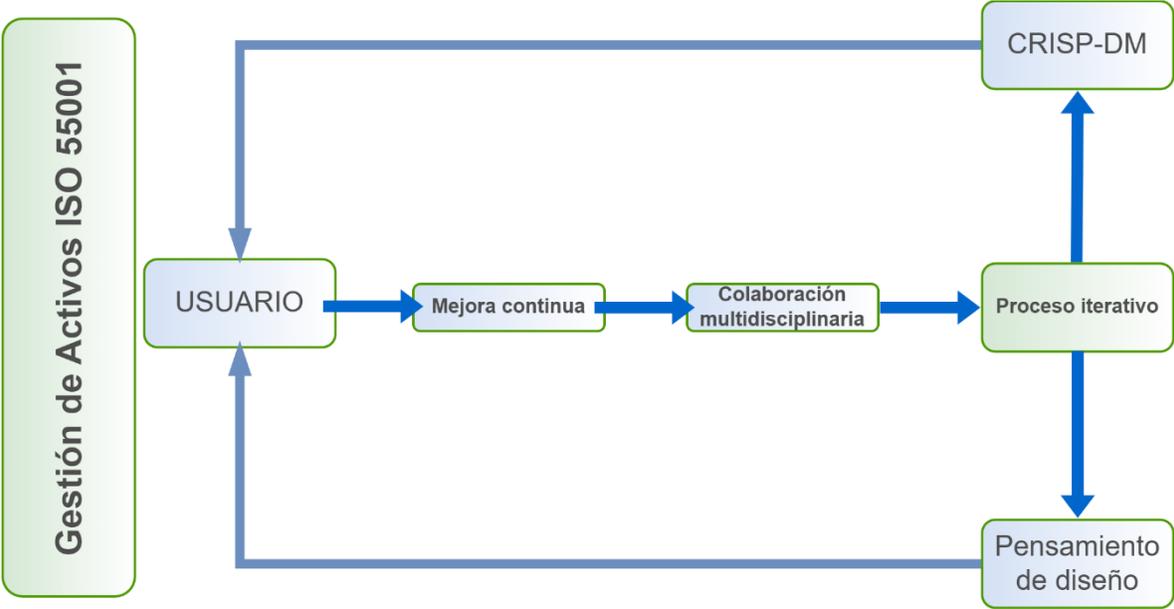


Figura 3. Modelo híbrido de Pensamiento de diseño y CRISP-DM. Adaptación propia.

La recopilación y análisis de datos detallados informan las fases de definición e ideación del pensamiento de diseño, permitiendo la creación de prototipos y soluciones basadas en evidencia real. Además, la evaluación continua de los prototipos mediante la retroalimentación de los usuarios y datos analíticos garantiza mejoras y decisiones informadas, resultando en soluciones efectivas y adaptadas a las necesidades del usuario.

Esta sinergia mejora la capacidad de respuesta, la eficiencia operativa y la relevancia de las soluciones implementadas, maximizando el valor tanto del diseño como de la gestión de datos.

La creciente interconexión de dispositivos y la acelerada digitalización están transformando profundamente la industria eléctrica. En este escenario, la Internet de la Energía se presenta como una herramienta clave, ya que posibilita una monitorización continua de la infraestructura energética, lo que permite no solo la optimización de los recursos disponibles, sino también la automatización de procesos en tiempo real. Sin embargo, para garantizar el éxito de los proyectos de loE en este sector, es fundamental contar con una metodología sólida de gestión de datos en conjunto con el pensamiento de diseño (Perera et al., 2014; Wang et al., 2018). En este sentido, la metodología CRISP-DM emerge como un marco eficiente y probado para abordar los desafíos de estos proyectos (Martinez-Plumed et al., 2021). La metodología CRISP-DM proporciona un marco robusto y estructurado para abordar proyectos tecnológicos en el sector eléctrico, desde la comprensión del negocio hasta el despliegue y la mejora continua. En la Figura 4 se explica el ciclo de la metodología CRISP-DM, al seguir este enfoque las organizaciones pueden maximizar el valor de sus iniciativas, optimizar la gestión de la energía y mejorando la eficiencia operativa en toda la cadena eléctrica (Pincay-Ponce et al., 2020; Yu et al., 2016).

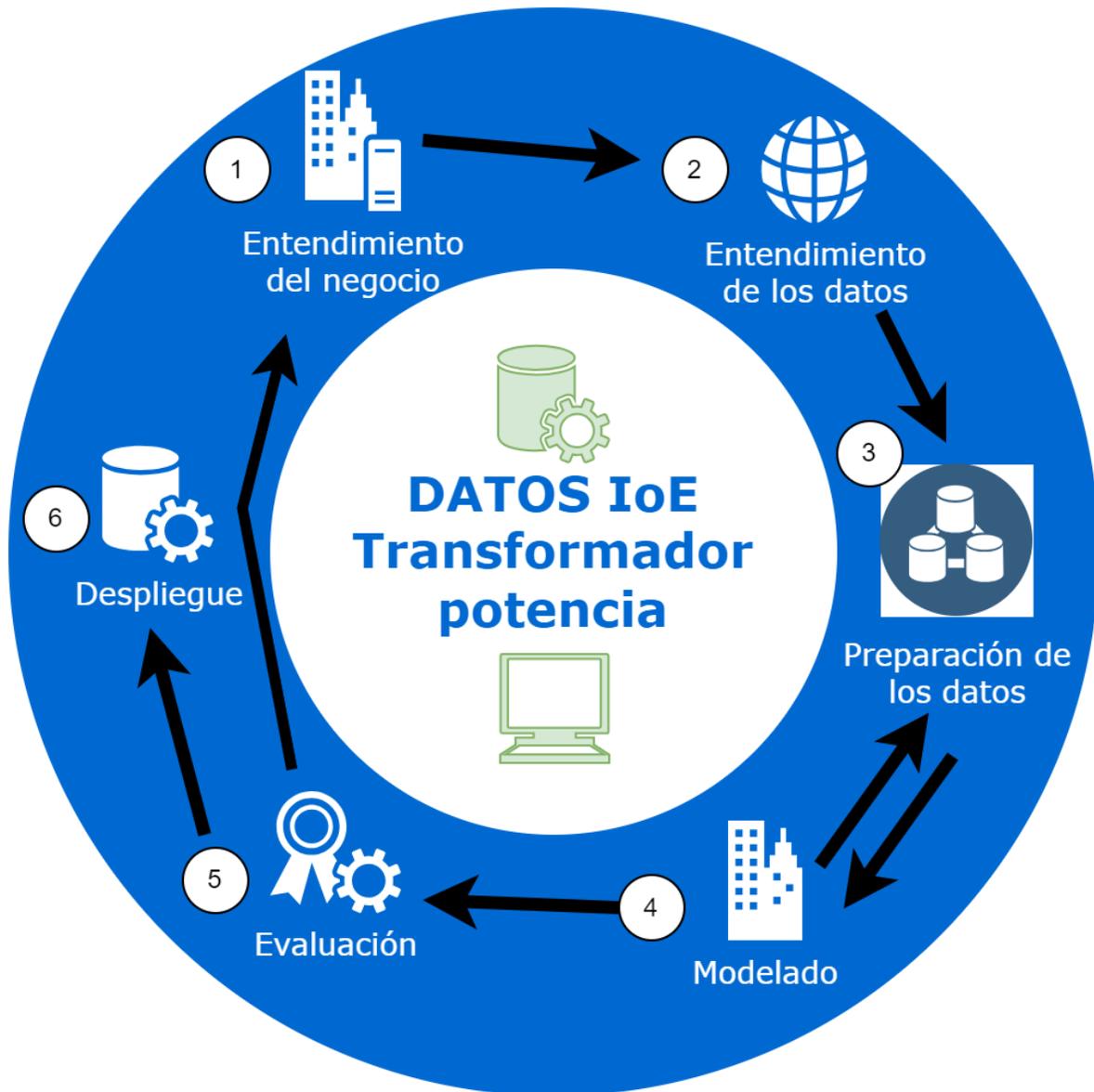


Figura 4. Proceso del Modelo CRISP-DM (Martinez-Plumed et al., 2021). Adaptación propia metodología CRISP-DM.

La metodología CRISP-DM ampliamente utilizada en la minería de datos proporciona un enfoque estructurado para desarrollar proyectos de análisis de datos. Se compone de seis fases interactivas: comprensión del negocio, comprensión de los datos, preparación de los datos, modelado, evaluación e implementación. Este enfoque flexible y adaptativo permite a los equipos abordar proyectos de minería de datos de manera sistemática, asegurando que se extraigan conocimientos valiosos para la toma de decisiones informadas.

## 1. Comprensión del Negocio:

El primer paso en la aplicación de CRISP-DM es comprender a fondo los objetivos y necesidades del negocio eléctrico (Schröer et al., 2021). Esto implica identificar los problemas específicos que la implementación de loE pretende resolver, como la gestión eficiente de la energía, la detección de fallos en la red eléctrica y la optimización de la distribución y los activos son aspectos clave en la mejora del sistema energético. Además, la comprensión del negocio debe incluir una visión integral de la regulación de la energía en Colombia, la cual se sustenta en un marco legal sólido que busca garantizar la estabilidad, eficiencia y sostenibilidad del suministro eléctrico. (Pais, 2019).

La CREG desempeña un papel fundamental en la regulación del mercado eléctrico, mientras que el gobierno, a través del Ministerio de Minas y Energía, establece las políticas y estrategias para el desarrollo energético del país. En este contexto, la Resolución 015 de 2018 es clave para entender el proceso mediante el cual se determinan las regulaciones de la distribución eléctrica en Colombia. Su objetivo es asegurar una remuneración justa y equitativa para las empresas distribuidoras, a la vez que protege los intereses de los usuarios finales y promoviendo la transparencia. Además, el análisis de datos es importante para la lograr la recopilación, interpretación y modelado de la información necesaria para tomar decisiones informadas, optimizando la asignación de recursos y ajustando las condiciones del mercado y las necesidades de los usuarios. (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2018)

## 2. Comprensión de los Datos:

Una vez comprendido y definido los objetivos de negocio, se procede a recopilar y explorar los datos relevantes para el proyecto de loE. Estos datos pueden provenir de una variedad de fuentes, como sensores en la red eléctrica, dispositivos de medición inteligente o sistemas de control. La comprensión de los datos incluye la

identificación de su calidad, integridad y relevancia para los objetivos del proyecto. La diversidad de fuentes que se utilizan para la monitorización y regulación de la red eléctrica refleja un avance significativo en la infraestructura tecnológica del país. Desde sensores integrados en la red eléctrica hasta dispositivos de medición inteligente y sistemas avanzados de control, cada uno desempeña una función relacionada con garantizar la eficiencia operativa y la estabilidad del suministro energético.

Los sistemas de control son esenciales para la regulación de la red eléctrica colombiana, ya que utilizan algoritmos avanzados para ajustar automáticamente la generación y distribución de energía, manteniendo el equilibrio entre la oferta y la demanda. En este proceso, la comprensión de los datos juega un papel clave, ya que permite analizar en tiempo real la información generada por la red, identificar patrones y prever comportamientos. Debido a su variabilidad inherente, la capacidad de comprender y analizar estos datos hace parte de las acciones que permitan realizar una gestión eficiente para garantizar la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico. (Corredor, 2010; León Paine, 2019).

### 3. Preparación de los Datos:

La preparación de los datos es un paso decisivo en un proyecto de análisis y minería de datos, y en proyectos de IoE en el sector eléctrico cobra una importancia aún mayor debido a la gran cantidad y variedad de datos involucrados. En esta etapa, se lleva a cabo la limpieza, integración y transformación de los datos para asegurar su idoneidad para el análisis posterior (Dileep, 2020).

### 4. Modelado:

Una vez que los datos están preparados, se procede al modelado, donde se aplican técnicas de análisis de datos y Machine Learning para extraer información útil. En el contexto tecnológico en el sector eléctrico, esto puede implicar la construcción de

modelos predictivos para predecir la demanda de energía, identificar patrones de consumo o detectar anomalías en la red (Zhou & Yang, 2015).

#### 5. Evaluación:

La evaluación de los modelos es esencial para determinar su eficacia y su capacidad para resolver los problemas identificados en la etapa de comprensión del negocio. En esta etapa, se utilizan métricas y técnicas de validación para medir el rendimiento de los modelos y su capacidad de generalización a nuevos datos (Schröer et al., 2021).

#### 6. Despliegue:

Una vez que se ha validado un modelo satisfactorio, se procede a su despliegue en el entorno operativo. En proyectos tecnológicos en el sector eléctrico, esto puede implicar la integración del modelo en sistemas de control de la red eléctrica o en aplicaciones de gestión de energía (Martinez-Plumed et al., 2021; Schröer et al., 2021).

#### 7. Monitorización:

Finalmente, se establece un sistema de mejora continua para asegurar el rendimiento y la fiabilidad del modelo en producción. Esto puede incluir la monitorización de indicadores clave de rendimiento, la detección de desviaciones y la retroalimentación de datos para mejorar y actualizar los modelos y retroalimentar el proyecto en tiempos de desarrollo (Martinez-Plumed et al., 2021). La aplicación de Business Intelligence (BI) en la gestión de activos eléctricos revoluciona la forma en que las empresas monitorean y optimizan sus infraestructuras energéticas. Mediante la integración de datos en tiempo real provenientes de sensores y sistemas de información, las herramientas de BI proporcionan dashboards interactivos que permiten a los gestores visualizar el estado operativo de los

equipos, detectar anomalías y anticipar fallos potenciales (Bordeleau et al., 2018). Esta capacidad de análisis facilita la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, lo cual no solo prolonga la vida útil de los activos, sino que también reduce los costos asociados a reparaciones emergentes y paradas no planificadas.

### **3.2. Proceso de ETL (*Extracción, Transformación y Carga de Datos*).**

El procesos de ETL es un conjunto de pasos para integración de datos, esta metodología computacional se da como una gestión fundamental del dato, cuya función completa el resultado de todo el desarrollo de la cohesión de aplicaciones y sistemas. Todo proceso ETL consta de estas tres fases: extracción, transformación y carga (Runtuwene et al., 2018).

Para la fase de extracción de datos, se destacan los siguientes puntos:

- Extraer los datos desde los sistemas de origen.
- Analizar los datos extraídos obteniendo un chequeo.
- Interpretar este chequeo para verificar que los datos extraídos cumplen la pauta o estructura que se esperaba. Si no fuese así, los datos deberían ser rechazados.
- Convertir los datos a un formato preparado para iniciar el proceso de transformación (Andersen et al., 2018; Runtuwene et al., 2018).
- En el capítulo 5 se explicará a profundidad los pasos del proceso ETL y su aplicación.

#### **3.2.1. *Diseño del modelo de datos***

Con el fin de enmarcar el desarrollo y resultado del trabajo, para esta Tesis se entiende Modelo computacional para la gestión inteligente de la información en los transformadores de potencia a partir de fuentes del Internet de la Energía y sus componentes de recopilación y envío de datos, centralización y descentralización de datos, y análisis y toma de decisiones.

La evolución de las tecnologías y la industria de la energía eléctrica en el mundo continúa creciendo, también se vuelve más rastreable e inteligente con la tecnología en desarrollo (Yaman & Bicen, 2019). Naturalmente, la integración de estas tecnologías en los sistemas de energía eléctrica conlleva un costo adicional. La mayoría de las veces, los productores y consumidores luchan bajo la presión de estos costos adicionales y prueban nuevos productos que reducirán el costo. En este sentido, los productos competitivos en el mercado deben ser ventajosos en términos de costo. En este estudio, se ha desarrollado un sistema original de monitoreo de transformadores basado en IoT utilizando software de código abierto, componentes modulares y de bajo costo como alternativa a los estudios en la literatura. Yaman y Bicen proponen un trabajo donde utilizaron un microcontrolador Arduino Mega 2560 como componente del sistema como lo observamos en la Figura 5. Adaptación IoT Analytics.(IoT Analytics - ThingSpeak Internet of Things, 2022).(PushingBox, 2022).Figura 5. El sistema puede adquirir datos de una amplia variedad de sensores utilizando transductores internos y externos. Los datos se pueden guardar en el sistema en la nube de forma sincrónica con la tarjeta de memoria en el sistema de monitoreo. El sistema de monitoreo desarrollado utilizó plataformas confiables y gratuitas, como la interfaz web “ThingSpeak”(IoT Analytics - ThingSpeak Internet of Things, 2022) y la aplicación de notificación PushingBox (PushingBox, 2022).

Con el acceso cada vez mayor a los recursos de energía renovable y la conexión rápida y de computación ubicua (Y. Wu et al., 2021), el flujo de energía unidireccional tradicional desde la generación centralizada a los consumidores finales dará paso al flujo de energía bidireccional con una red de energía multidireccional entre las redes centrales y los prosumidores distribuidos. Para potenciar la Internet de la energía centrada en los productores y mejorar la integración de los servicios conscientes de la energía, la digitalización y la descentralización son los habilitadores claves para lograr Smart City (Jaradat et al., 2015). Una descripción general sistemática de cómo Internet de las Cosas impulsa

la digitalización de la industria energética transactiva y cómo blockchain potencia la descentralización de la energía transactiva (Y. Wu et al., 2021).

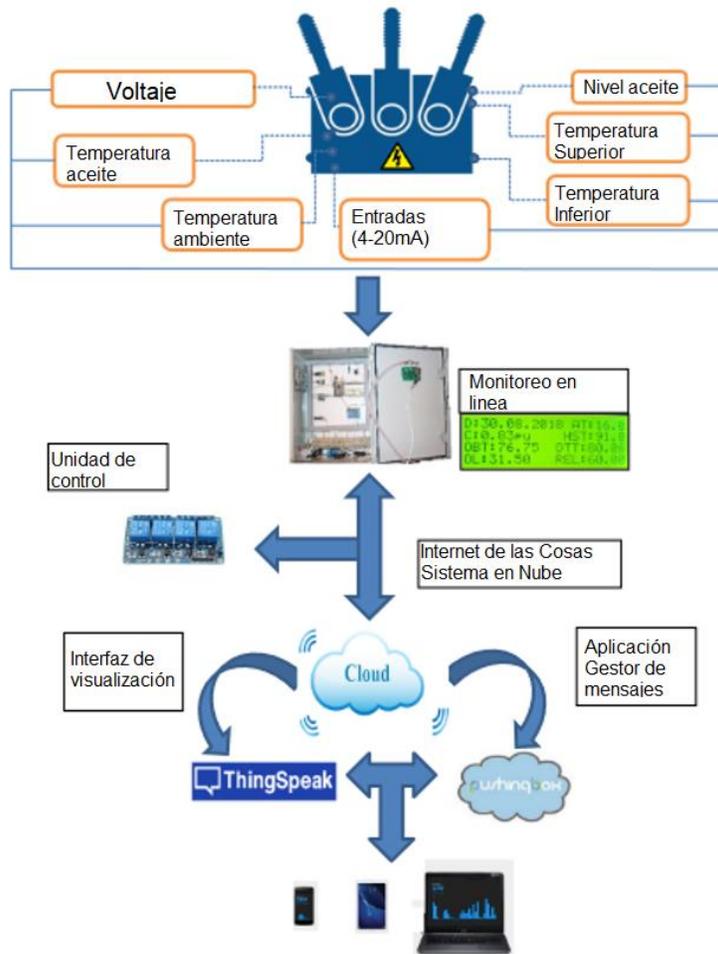


Figura 5. Adaptación IoT Analytics. (IoT Analytics - ThingSpeak Internet of Things, 2022). (PushingBox, 2022).

Las infraestructuras clave para implementar la digitalización y descentralización de la industria eléctrica transaccional son fundamentales para modernizar el sector. En este contexto, la 'última milla', representada por la 'Infraestructura de Medición Avanzada' (AMI), integrador de energías renovables "inversor inteligente", ajustador de flujo de energía "enrutador de energía" y coordinador "Microrred". Los desafíos y las tendencias futuras se discuten desde un amplio punto de vista, incluido el

espacio físico energético, el ciberespacio de datos y el espacio social humano (Al-Turjman & Abujubbeh, 2019).

### **3.2.2.            *Procesamiento de Datos.***

En la actual era de la información, el análisis de datos se ha convertido en una herramienta fundamental para las organizaciones que buscan tomar decisiones basadas en información precisa y actualizada. Sin embargo, la mayoría de los datos se encuentran dispersos en diferentes fuentes y formatos, lo que dificulta su análisis eficiente. Es aquí donde entra en juego la metodología ETL (Extracción, Transformación y Carga), un proceso clave para la integración y preparación de datos antes de su análisis. En este caso de estudio se propone una estructura secuencial como la expuesta en la Figura 6, permite la exploración de un modelo de investigativo y de desarrollo de productos mínimos viables basados en metodologías ágiles que permiten explorar e implementar la metodología de un modelo IoE, generar requerimiento, detallar su importancia, los beneficios y el valor que aporta a las organizaciones este tipo de soluciones (Runtuwene et al., 2018).



Figura 6. Metodología para el desarrollo de proyectos IoE. Fuente: Propia

La metodología ETL es un enfoque sistemático utilizado en la gestión de datos para extraer, transformar y cargar información desde diversas fuentes hacia un almacén de datos centralizado (Andersen et al., 2018). La aplicación de la metodología

aplicada en la Central Hidroeléctrica de Caldas consiste en tres etapas claves: extracción de datos de diversas fuentes, transformación de esos datos para limpiarlos, integrarlos y darles el formato adecuado, y finalmente, carga de los datos transformados en un sistema de almacenamiento centralizado en una base de datos. Esta metodología mejora la calidad de los datos, facilita el análisis y permite tomar decisiones más informadas, optimizando los procesos de gestión de la información dentro de la empresa.

#### Extracción:

En esta etapa, los datos se recopilan de diferentes fuentes, como bases de datos, archivos planos, sistemas ERP, entre otros. La extracción puede ser realizada de manera periódica o en tiempo real, dependiendo de las necesidades de la organización. Es esencial seleccionar los datos relevantes y asegurar su integridad durante el proceso de extracción (Andersen et al., 2018).

#### Transformación:

Una vez extraídos los datos, es necesario someterlos a una serie de transformaciones para que sean coherentes, consistentes y adecuados para su análisis. En esta etapa, se llevan a cabo actividades como la limpieza de datos, la eliminación de duplicados, la corrección de errores, la normalización de formatos y la aplicación de reglas de negocio. Además, es posible realizar operaciones más avanzadas, como el enriquecimiento de datos, la agregación y la generación de nuevas variables (Runtuwene et al., 2018).

#### Carga:

Finalmente, los datos transformados y preparados se cargan en un almacén de datos centralizado, como un datawarehouse o un datamart (Chen et al., 2014). En esta etapa, se estructuran los datos de manera que sean accesibles para su

posterior análisis y generación de informes (Runtuwene et al., 2018). La carga puede ser realizada de forma incremental o completa, dependiendo de los requisitos y la frecuencia de actualización de los datos.

### ***3.3. Visualización estratégica de Datos.***

En la actualidad, existe una gran cantidad de datos generados constantemente por diversas fuentes. La empresa consultora y de investigación en tecnologías Gartner, elaboró un informe en donde afirma que para 2019 se poseían conectados alrededor de 14.200 millones de dispositivos y hacia finales del año 2021 se preveía un incremento significativo de los dispositivos conectados a internet, alcanzando alrededor de 25.000 millones de “cosas” conectadas a internet (Gartner Inc., 2017, 2018). Sin embargo, la simple acumulación de datos no es suficiente para tomar decisiones informadas y obtener conocimientos significativos. Es aquí donde entra en juego la visualización de datos, una herramienta que permite representar y comprender la información de manera clara y efectiva. Explorar la importancia de la visualización de datos, sus beneficios y cómo puede influir en la toma de decisiones a partir y generación de valor para las corporaciones empresariales (Pincay-Ponce et al., 2020).

La visualización de datos implica una exploración, búsqueda y representación gráfica y visual de la información con el objetivo de comunicar patrones, tendencias, relaciones y conceptos complejos de manera más accesible y comprensible (Shadare et al., 2016). A continuación, se presentan algunos aspectos clave sobre la importancia de la visualización de datos:

#### **Comprensión rápida y efectiva:**

El ser humano tiene una capacidad innata para comprender y procesar información visual de manera más eficiente que los datos en bruto. Al utilizar gráficos, tablas, diagramas y otros elementos visuales, los datos se presentan de forma más clara y

concisa, lo que facilita la comprensión de patrones y relaciones complejas (Shadare et al., 2016).

#### Identificación de tendencias y patrones:

La visualización de datos permite identificar patrones, tendencias y anomalías que podrían pasar desapercibidos en los datos sin procesar. Al representar los datos en gráficos de líneas, barras, dispersión u otros formatos visuales, es posible observar rápidamente las fluctuaciones, las correlaciones y las variaciones en los datos, lo que ayuda a identificar patrones y tomar decisiones fundamentadas (Provost & Fawcett, 2013).

#### Comunicación efectiva:

La visualización de datos es una forma efectiva de comunicar información compleja de manera clara y concisa. Al presentar datos visualmente, se eliminan barreras lingüísticas y técnicas, lo que facilita la comunicación entre diferentes audiencias y equipos multidisciplinarios. Las visualizaciones permiten contar una historia, transmitir mensajes clave y convencer a través de datos objetivos (Provost & Fawcett, 2013).

#### Exploración interactiva:

Las herramientas de visualización de datos modernas ofrecen capacidades interactivas que permiten a los usuarios explorar los datos desde diferentes ángulos, realizar filtros, seleccionar variables y profundizar en los detalles. Esto fomenta un enfoque investigativo y permite descubrir nuevas perspectivas y conocimientos ocultos en los datos (Chen et al., 2014).

### Toma de decisiones informadas:

La visualización de datos proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas. Al tener una representación visual clara de la información, los tomadores de decisiones pueden evaluar rápidamente las opciones, analizar diferentes escenarios y evaluar el impacto de las decisiones antes de implementarlas (Provost & Fawcett, 2013). La gestión estratégica de datos en la gestión de activos permite transformar grandes volúmenes de información compleja en representaciones gráficas claras y comprensibles, facilitando una comprensión rápida y precisa del estado y rendimiento de los activos eléctricos. Mediante el uso de dashboards interactivos, gráficos, mapas y otras herramientas visuales, los gestores pueden monitorear en tiempo real indicadores clave como el estado de los equipos, el consumo energético y los costos operativos. Esta visualización no solo ayuda a identificar tendencias y anomalías de manera oportuna, sino que también apoya la toma de decisiones estratégicas al proporcionar una visión integral y accesible de los datos, permitiendo una planificación más efectiva y una respuesta ágil ante problemas emergentes.

### **3.4. Transformadores de potencia**

Los transformadores de potencia son uno de los activos críticos, de mayor importancia y valor alcanzando un aproximado alrededor de 60 % de la inversión realizada en una subestación. Este equipo que en condiciones normales puede tener una vida útil de 40 años, pero el paso del tiempo y sus operaciones conllevan posibles fallas que ocasionan contingencias en el servicio eléctrico (Cerón et al., 2015; Priyo Das & Carlos Leicht PGTR, 2019). La gestión de activos en transformadores de potencia se ha vuelto esencial en el contexto de la infraestructura eléctrica moderna. Los transformadores desempeñan un papel crítico al facilitar la transmisión eficiente de energía eléctrica a lo largo de las redes,

convirtiendo niveles de voltaje para minimizar pérdidas y asegurar un suministro eléctrico confiable (Salamanca Jaimes et al., 2016). La gestión efectiva de estos activos es importante para garantizar la continuidad del servicio, maximizar la eficiencia operativa y optimizar los recursos financieros asociados.

En esencia, la gestión de activos en transformadores de potencia se refiere al conjunto de prácticas y estrategias destinadas a supervisar, mantener y mejorar el rendimiento de estos equipos a lo largo de su ciclo de vida. Este enfoque implica la combinación de diversas disciplinas, como la ingeniería eléctrica, la gestión de mantenimiento, la planificación estratégica y la gestión financiera (Cerón et al., 2015). El objetivo final es asegurar que los transformadores operen de manera confiable y eficiente, minimizando el riesgo de fallas, maximizando la disponibilidad y prolongando su vida útil.

La gestión de activos en transformadores de potencia abarca varias dimensiones clave. En primer lugar, implica la implementación de programas de mantenimiento preventivo y predictivo. Estas estrategias buscan identificar y abordar posibles problemas antes de que se conviertan en fallas críticas. La monitorización continua del estado del transformador mediante técnicas avanzadas, como el análisis de gases disueltos en el aceite, las termografías y los sistemas de monitoreo en línea, permite detectar anomalías y realizar intervenciones proactivas (Aponte et al., 2020).

Además, la gestión de activos en los transformadores también se ocupa de la planificación y programación de la reposición o actualización de transformadores obsoletos o con problemas. Este aspecto es esencial para garantizar la conformidad con los estándares y normas técnicas para adaptarse a los cambios en la demanda de energía. La toma de decisiones informada, sobre la inversión en nuevos equipos se beneficia de la evaluación del rendimiento pasado, el análisis de riesgos y la proyección de costos de ciclo de vida (Pais, 2019).

El análisis en aceite y papel es un componente esencial para evaluar la salud de un transformador de potencia. El aislamiento de papel impregnado en aceite es vulnerable al deterioro con el tiempo, afectando la capacidad del transformador para funcionar eficientemente. La detección temprana de posibles fallas en el sistema de aislamiento para prevenir daños mayores y garantizar la vida útil del transformador. Además, el análisis de gases disueltos en el aceite proporciona información valiosa sobre la presencia de fallas incipientes, permitiendo intervenciones preventivas y reduciendo el riesgo de interrupciones inesperadas (Prasojo & Suwarno, 2018).

El factor de potencia es un indicador clave de la eficiencia energética. Un factor de potencia bajo puede provocar pérdidas significativas de energía y disminuir la capacidad de carga del sistema. Mantener un factor de potencia cercano a la unidad es esencial para optimizar la transferencia de energía y reducir las pérdidas (Mata et al., 2023). Asimismo, la capacitancia y las tensiones en el transformador influyen en la calidad del suministro eléctrico. Un control adecuado de estos parámetros es esencial para prevenir sobretensiones, asegurar una operación estable y minimizar el riesgo de daños a los equipos conectados al sistema (Carmelo et al., 2019).

Aunque las vibraciones y el ultrasonido son factores de menor importancia en comparación con el análisis en aceite y papel, y el factor de potencia, no deben subestimarse. Las vibraciones pueden indicar problemas mecánicos o desequilibrios en el transformador, lo que, si no se aborda, podría llevar a un fallo prematuro. El ultrasonido, por su parte, puede ser una herramienta valiosa para detectar descargas parciales y problemas internos. Aunque estos factores son menos críticos, su monitoreo constante puede contribuir a la identificación temprana de posibles problemas y, por ende, a la prevención de fallos mayores (Bartoletti et al., 2004).

El desarrollo y la implementación de tecnologías IoE en los activos eléctricos como el transformador de potencia enfrenta desafíos relacionados con la infraestructura de comunicación. En las zonas urbanas, la densidad de dispositivos y la necesidad

de una alta capacidad de red pueden requerir actualizaciones en la infraestructura de telecomunicaciones. En las zonas rurales, la falta de cobertura y la calidad variable de las redes móviles y de datos pueden limitar la efectividad de las soluciones IoE en la gestión de los activos. Superar estos desafíos es clave para maximizar el impacto en el país (Díaz Andrade et al., 2011). La comunicación en las tecnologías IoT es fundamental para mejorar la gestión de servicios y recursos, tanto en entornos urbanos como rurales. Mientras en las ciudades, facilita la optimización de servicios y la confiabilidad eléctrica, en las áreas rurales, transforma la calidad del servicio y la gestión de los recursos eléctricos distribuidos. A medida que la infraestructura y la conectividad mejoran, el potencial de las nuevas tecnologías permite contribuir al desarrollo sostenible y a la mejora de la calidad de vida (Giral-Ramírez et al., 2017).

### **3.5. *Protocolos de comunicación***

Dentro del modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos OSI (por sus siglas en inglés, Open Systems Interconnection). Este modelo de referencia describe la creación de redes como una serie de capas de protocolo con un conjunto específico de funciones asignadas a cada capa (Kumar et al., 2014). Como se observa en la Figura 7 cada capa ofrece servicios específicos a las capas superiores mientras protege estas capas de los detalles de cómo se implementan los servicios. Una interfaz bien definida entre cada par de capas adyacentes define los servicios ofrecidos por la capa inferior a la superior y cómo se accede a esos servicios (ZIMMERMAN, 1980).

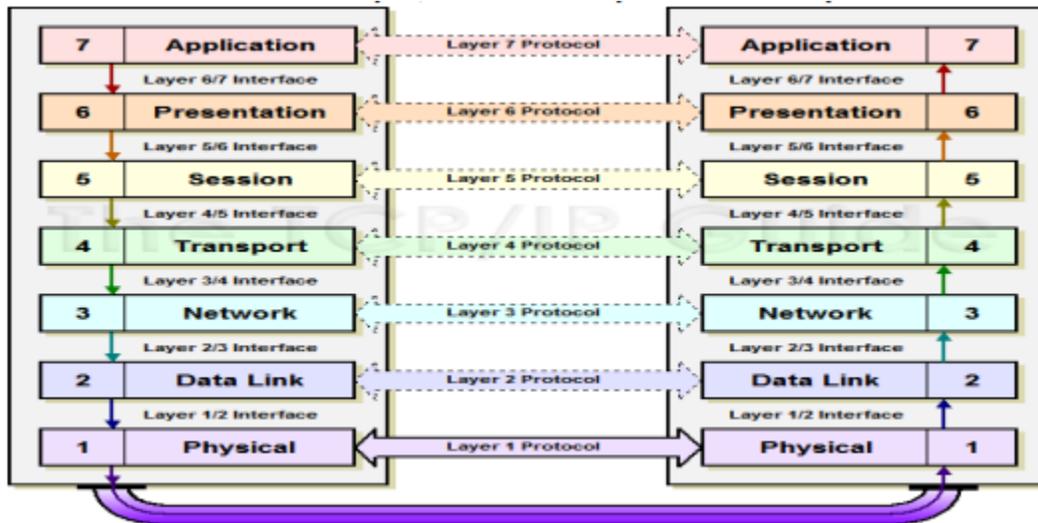


Figura 7. Modelo del protocolo de comunicación OSI. (Kumar et al., 2014)

Otro protocolo robusto y que soporta los modelos de comunicación modernos es el modelo TCP/IP. El proyecto que fue desarrollado por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa (DARPA, por su sigla en inglés) y se ha utilizado ampliamente en sistemas militares y comerciales (Kumar et al., 2014). A pesar de que existen numerosos documentos y especificaciones que describen el funcionamiento de los protocolos, en ocasiones resulta difícil comprender el motivo detrás de su diseño. Por ejemplo, el protocolo de Internet se basa en un modelo de servicio sin conexión o de datagramas, cuya motivación ha sido frecuentemente malinterpretada (Figura 8). Es fundamental entender los razonamientos iniciales que dieron forma a los protocolos de Internet, ya que estos son clave para comprender su estructura y funcionamiento actual (Clark, 1995).

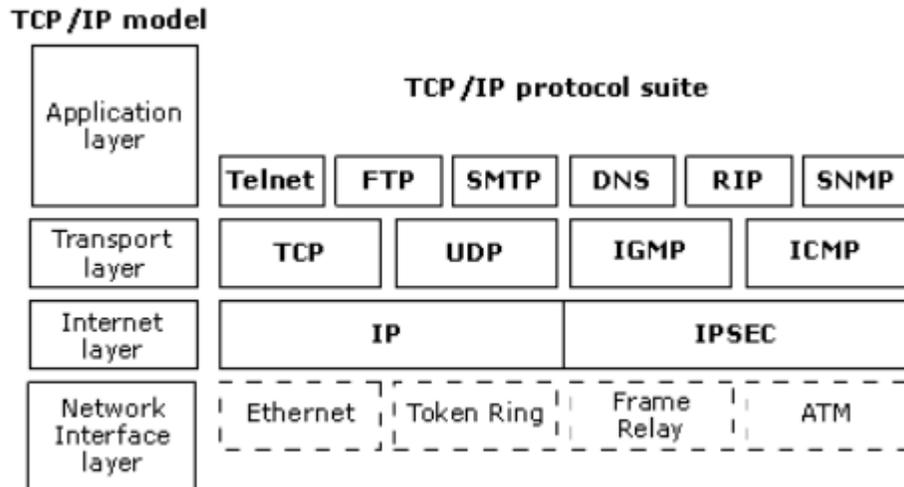


Figura 8. Modelo TCP/IP. (Bandhu Nath & Uddin, 2015)

El protocolo de comunicación Modbus se sitúa en los niveles 1, 2 y 7 del Modelo OSI, basado en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor (TCP/IP) (Modbus-IDA, 2006), diseñado en 1979 por Modicon para su gama de controladores lógicos programables (PLCs). El protocolo Modbus de comunicaciones goza de la mayor disponibilidad para la conexión de dispositivos electrónicos usado en el ámbito industrial (Kuang, 2014). La interacción de los dispositivos dentro de una red Modbus se basa en la existencia de un dispositivo maestro. En las aplicaciones SCADA (control de supervisión y adquisición de datos), los datos de los dispositivos se obtienen mediante la lectura de registros (Figura 9). Esta lectura se realiza periódicamente por el dispositivo maestro, cuya frecuencia de actualización de los valores depende del tipo de datos almacenados. En función del tipo de dispositivo, algunas mediciones pueden variar entre una lectura y otra (Corotinschi & Găitan, 2018).

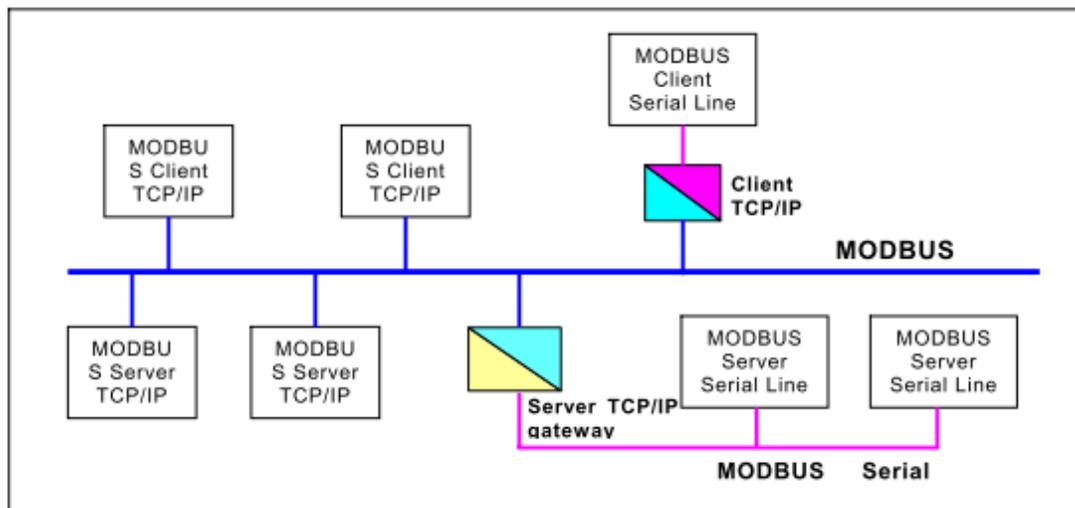


Figura 9. Modelo Modbus TCP/IP. (Modbus-IDA, 2006).

Otros de los protocolos con una alta predominancia es el protocolo DNP3 (Distributed Network Protocol por sus siglas en inglés, protocolo de red distribuida versión 3), este protocolo de comunicaciones industriales, fue desarrollado por la empresa Westronic a principios de la década de 1990. El protocolo define cómo los dispositivos en un sistema SCADA comunican los comandos de control y procesan los datos. (East et al., 2009). La comunicación entre dispositivos permite a los elementos maestros y las unidades remotas se comuniquen utilizando un ancho de banda limitado para transportar valores de datos y comandos simples entre los extremos del sistema como se observa en la Figura 10. Permitiendo que las señales se envíen a través de enlaces en serie, enlaces en serie multipunto y a través de redes dedicadas mediante TCP/IP (Darwish & Saadawi, 2018; East et al., 2009).

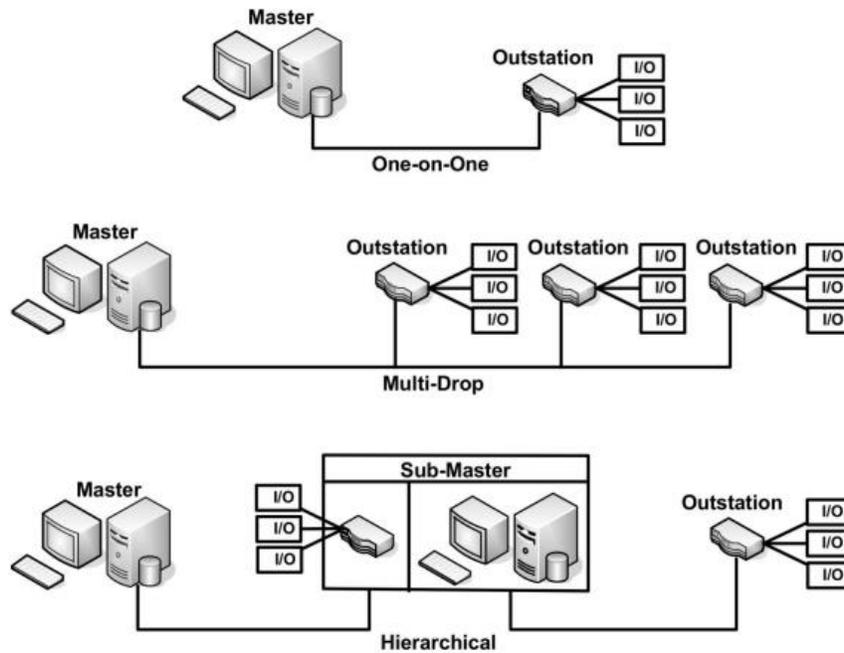


Figura 10. Modelo DNP3. Topología Maestro-Unidad remota. (East et al., 2009)

La evolución de los protocolos de comunicación industrial ha facilitado el desarrollo de estándares como el protocolo IEC 61850. Este protocolo se ha establecido como un pilar fundamental para la automatización de redes, posicionándose como el motor clave en el avance de las Smart Grids a mediano y largo plazo. (Schmutzler et al., 2013). A pesar de que se introdujo inicialmente como un estándar de automatización de subestaciones, superó rápidamente este mandato y ahora se utiliza para modelar diferentes equipos, como medidores inteligentes, plantas de energía virtuales, vehículos eléctricos y otros componentes novedosos (Ustun, 2021).

Por otro lado los dispositivos electrónicos en un entorno IoT han popularizado el protocolo de comunicación MQTT (Message Queing Telemetry Transport por sus siglas en ingles), fue lanzado por IBM en 1999, planeado para enviar datos con precisión dentro de la red y bajo condiciones mínimas de ancho de banda (Soni & Makwana, 2017). Dentro del protocolo el editor que publica mensajes y usuarios que se suscriben a temas que comúnmente se consideran como un modelo de “Publicación/Suscripción” observados en la Figura 11. Finalmente, cada cliente dispone los mensajes en topicos organizados jerárquicamente (Corotinschi & Găitan, 2018; Soni & Makwana, 2017).

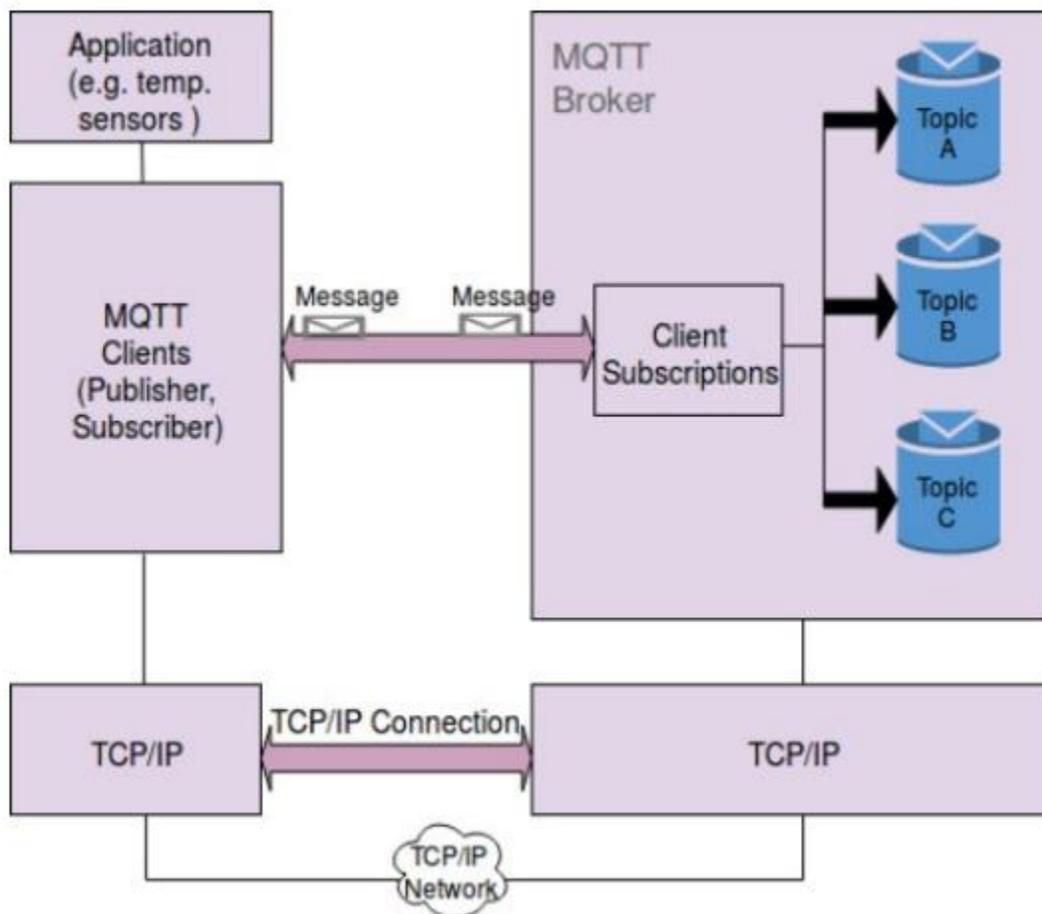


Figura 11. Arquitectura MQTT. (Soni & Makwana, 2017).

Actualmente, donde la demanda energética es cada vez más compleja y sofisticada, la comunicación efectiva entre dispositivos eléctricos eléctricos. El Protocolo IEC 61850, desarrollado por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), ha surgido como un estándar revolucionario que redefine la forma en que los dispositivos eléctricos se comunican y colaboran en los sistemas de potencia (Baigent, Drew and Adamiak, Mark and Mackiewicz, Ralph and Sisco, 2004). El Protocolo IEC 61850, inicialmente lanzado en 2004 pero con pasado se remite hacia 1960 donde aparecen sistemas SCADA que permiten recopilar datos de las subestaciones eléctricas; en 1988 se empezó a trabajar en una arquitectura de comunicaciones de "próxima generación" con el desarrollo de la Arquitectura de Comunicaciones de Servicios Públicos. El resultado de este trabajo fue un perfil de protocolos "recomendados" para las distintas capas del modelo de sistema de comunicación Open System Interconnect (OSI) como los mencionados anteriormente, protocolos fueron concebido con el propósito de superar las limitaciones de los protocolos de comunicación existentes en el ámbito de la automatización de subestaciones eléctricas (Figura 12). IEC 61850 prevé un enfoque centrado en la información y basado en estándares abiertos lo ha convertido en una herramienta fundamental para la gestión inteligente de redes eléctricas.

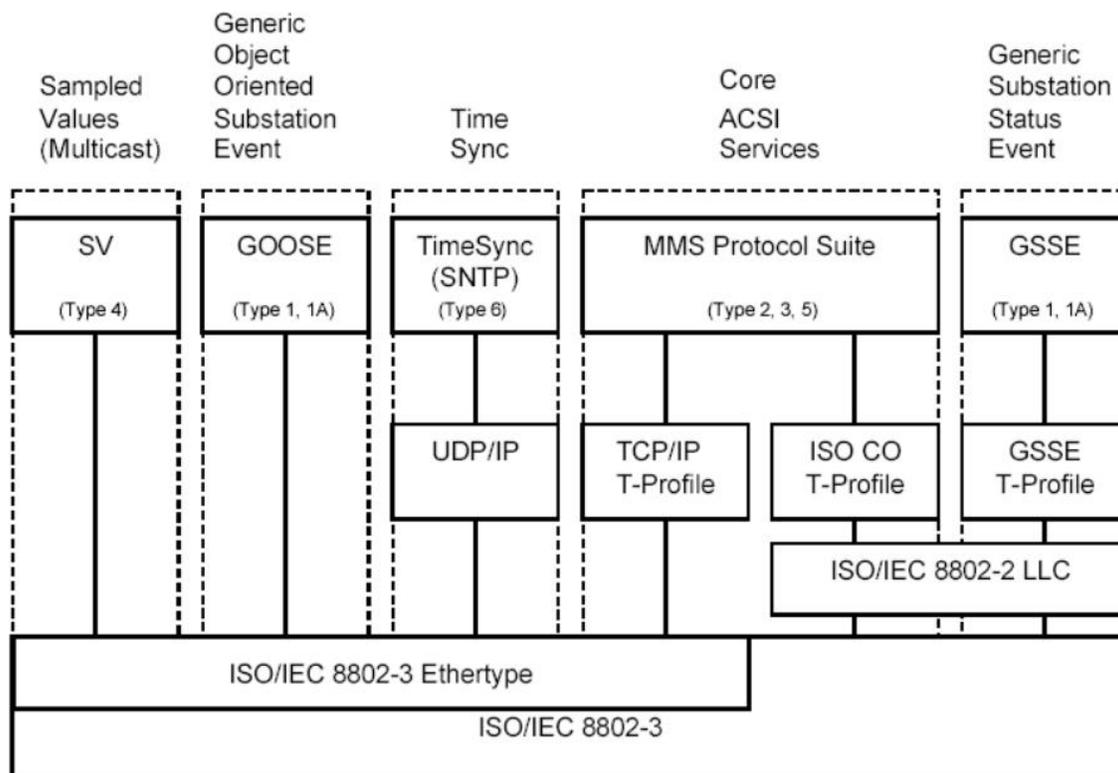


Figura 12. Descripción general y funcionalidades del IEC 61850. (Baigent, Drew and Adamiak, Mark and Mackiewicz, Ralph and Sisco, 2004)

El protocolo se basa en principios fundamentales que buscan mejorar la interoperabilidad y la integración de dispositivos eléctricos en sistemas complejos. La estandarización de los datos, la ingeniería basada en modelos y la capacidad de autoconfiguración son características clave que permiten la fácil integración y comunicación entre dispositivos de diferentes fabricantes. El IEC 61850 ha allanado el camino para la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes proveedores. Al adoptar un enfoque basado en estándares abiertos, el protocolo elimina las barreras tradicionales asociadas con la heterogeneidad de dispositivos. Esto no solo facilita la integración de nuevos equipos, sino que también mejora la flexibilidad operativa al permitir la expansión y actualización sin mayores complicaciones (Ustun, 2021).

La capacidad de autoconfiguración del IEC 61850 reduce significativamente la complejidad asociada con la puesta en marcha y el mantenimiento de dispositivos eléctricos. Los dispositivos pueden autoconfigurarse según la topología de la red, lo que agiliza el proceso de instalación y reduce los errores humanos.

La gestión eficiente de datos es esencial en entornos eléctricos modernos. El IEC 61850 utiliza el lenguaje de descripción de sistemas de energía (SCL) para estandarizar la ingeniería y la configuración de dispositivos. Esto no solo simplifica la gestión de datos, sino que también facilita la integración con sistemas de control y monitoreo (Zeynal et al., 2014).

## 4. Estudio de Caso

La contribución al logro del objetivo de la investigación al proporcionar los fundamentos técnicos y metodológicos necesarios para el desarrollo de un prototipo que integre datos y procesos en los transformadores de potencia. A través de un enfoque detallado sobre las tecnologías IoE se abordan aspectos clave como la caracterización de los transformadores, el monitoreo de su comportamiento y la interacción de estos dispositivos dentro de un ecosistema interconectado. Al integrar sensores y datos, el prototipo propuesto permitirá mejorar la seguridad operativa y prolongar la vida útil de los transformadores, alineándose directamente con la optimización de la gestión de activos y generación de valor para la compañía

### **4.1. Zona de estudio**

La Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC SA ESP), empresa del grupo EPM, presta sus servicios en las zonas urbanas y rurales de Caldas y Risaralda, impactando 40 municipios, 19 corregimientos y 14 resguardos indígenas, con una cobertura del servicio de energía de alrededor 1.500.000 habitantes; prestando los servicios de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía. En el presente estudio de caso analiza con detalle una subestación ubicada en la zona de influencia de CHEC que abarca los departamentos de Caldas y Risaralda, la cual se muestra en la Figura 13. La ubicación geográfica de la zona de influencia en Colombia, y como está subestación de CHEC desempeña un papel en el sector eléctrico tanto a nivel local como regional. Su importancia en temas de población y economía lo hace clave para el desarrollo y funcionamiento de infraestructuras eléctrica. El municipio donde se ubica la subestación ha visto un crecimiento en su población, lo que genera una mayor demanda de servicios básicos, como la energía eléctrica. Esto requiere infraestructuras energéticas eficientes y confiables para atender las necesidades residenciales, oficiales, comerciales e industriales.

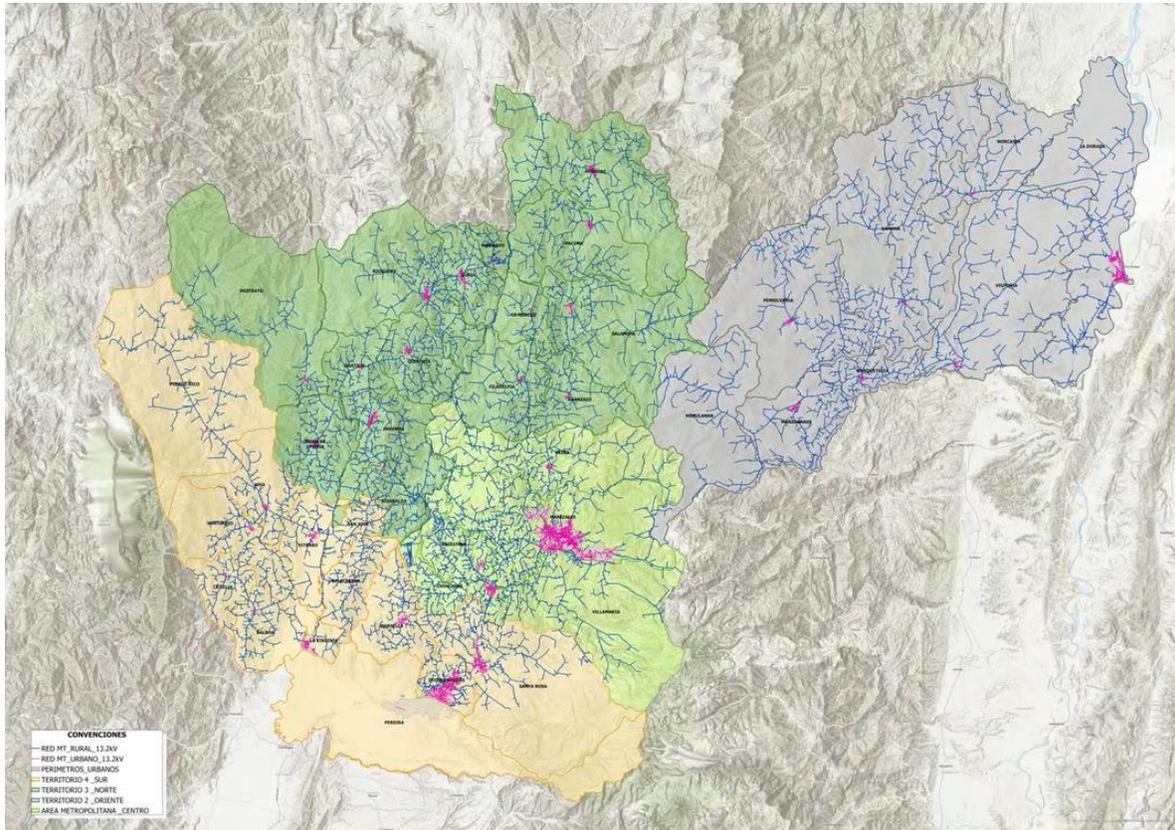


Figura 13. Zona de influencia CHEC. GIS (Visor de redes).

En esta zona de estudio se alberga un importante tejido industrial, con diversas empresas dedicadas a sectores como manufactura, agroindustria, tecnología, entre otros. Estas actividades requieren un suministro eléctrico estable y de calidad para operar de manera óptima. La disponibilidad de energía eléctrica influye directamente en la competitividad y productividad de las empresas, así como en la generación de empleo y riqueza en la región. Esta zona en la cual nos apoya el caso de estudio cuenta con una infraestructura energética desarrollada, que incluye subestaciones, redes de distribución y transmisión. Estos activos son fundamentales para garantizar el suministro continuo de energía a la población y las empresas. La adecuada gestión y mantenimiento de esta infraestructura son elementos para prevenir cortes de energía y garantizar la seguridad del sistema eléctrico. La subestación tiene un potencial de clientes de alrededor de 54 mil, donde se percibe la predominancia de los clientes como lo vemos en la Figura 14, sin desconocer la importancia y relevancia de los demás clientes como los son

Comercial, Industrial y Oficial. Esto permite deducir la importancia comercial e industrial de esta zona del eje cafetero donde representa una aproximación del 7% de la población de clientes totales; un porcentaje alto a comparación de otros municipios.

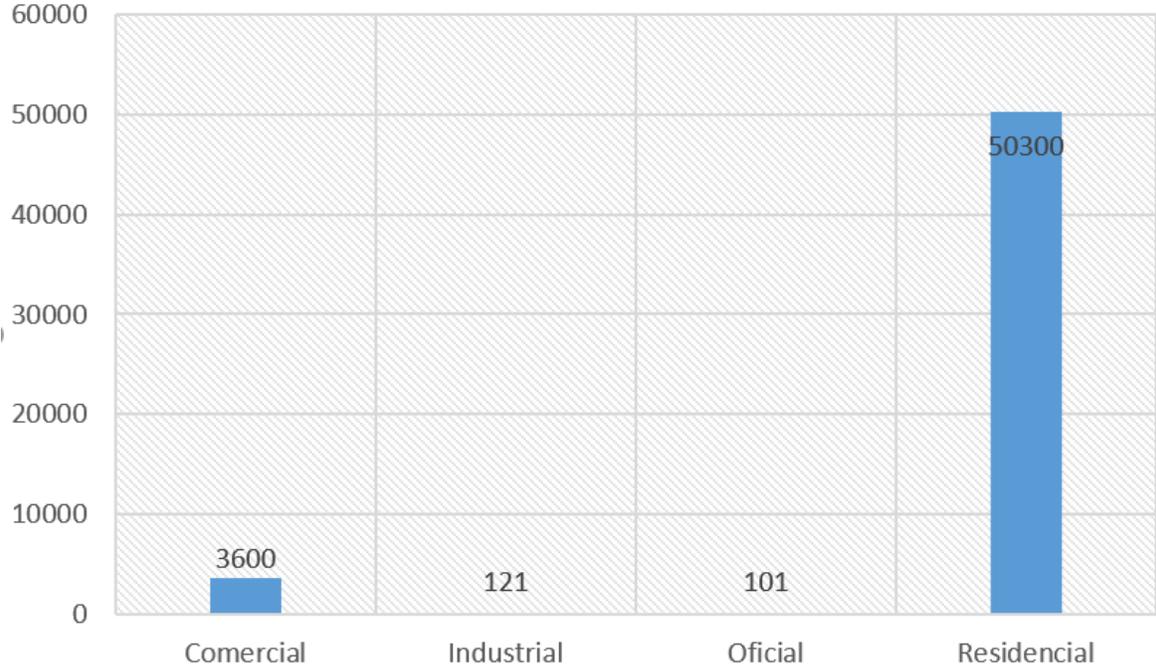


Figura 14. Segmento clientes subestación de Estudio. CHEC 2022.

La subestación tiene asociado al igual un total de consumos para en el año 2022 de alrededor de 14.686.941 kWh / Mes, al igual que una ENS de 78.590 kWh. Se percibe una cifra considerable, que representa un costo anual significativo en las compensaciones generadas por los eventos ocurridos durante el año, con estimaciones de COP \$137.274.176.

## **4.2. Criticidad**

La criticidad es una metodología que tiene como objetivo definir los criterios y directrices bajo los cuales se realiza el análisis de criticidad de los activos físicos productivos, de tal forma que se puedan identificar los impactos que se generan a la calidad de la prestación del servicio, la seguridad de las personas, el medio ambiente, las finanzas y la reputación cuando ocurre una falla en un activo (Chec & Del, 2022).

Dentro de los pasos para el desarrollo de la metodología la compañía trabaja con un grupo interdisciplinar con el cual busca primero identificar los componentes clave de la red de distribución eléctrica que pueden afectar significativamente la confiabilidad del suministro en las redes de distribución. A continuación, se debe establecer los criterios que se utilizarán para evaluar la criticidad de los componentes. Estos criterios pueden incluir la importancia del componente en el suministro de energía, el impacto de su falla en la continuidad del servicio, la disponibilidad de equipos de respaldo, la dificultad y el tiempo requerido para la reparación, indicadores de calidad, entre otros factores relevantes.

La recolección de los datos necesarios sobre los componentes de la red de distribución eléctrica, su capacidad y clientes asociados, historial de eventos, tiempo de reparación e indicadores de calidad del servicio. A cada una de estas variables se realiza una asignación de pesos y puntajes a los diferentes criterios de criticidad identificados en función de su importancia relativa. Estos puntajes pueden basarse en datos históricos, o estimaciones de expertos técnicos. Finalmente, el análisis de los resultados examina los valores de criticidad calculados y clasifica los componentes de la red en función de su nivel de criticidad (Salamanca Jaimes et al., 2016). Esto permite identificar los componentes más críticos que requieren una mayor atención en términos de mantenimiento, monitoreo y planificación de contingencias de la red de distribución eléctrica. La norma ISO 55001 establece un marco para la gestión de activos que asegura que las organizaciones maximicen el

valor de sus activos mientras gestionan los riesgos asociados a ellos de manera efectiva (International Organization for Standardization, 2014). La gestión de riesgos requiere que las organizaciones identifiquen, evalúen y gestionen los riesgos relacionados con sus activos a lo largo de todo su ciclo de vida. Esto incluye la evaluación de los posibles eventos que podrían afectar la capacidad de los activos para cumplir sus objetivos, como fallos operacionales, riesgos financieros o impactos ambientales. La norma promueve la implementación de un enfoque sistemático y basado en evidencia para mitigar estos riesgos, asegurando que se adopten medidas proactivas y correctivas para mantener la integridad y el rendimiento de los activos. A través de un proceso continuo de evaluación y revisión, la ISO 55001 (International Organization for Standardization, 2014) ayuda a las organizaciones a anticipar y responder a los desafíos, garantizando que los activos se gestionen de manera eficiente y efectiva en sintonía con los objetivos estratégicos y operacionales de la organización (Pais, 2019). El nivel de criticidad se encuentra dado por el resultado más alto entre los cinco impactos evaluados y su riesgo, el grado de criticidad resultante es un nivel cualitativo con definiciones (Bajo, Medio, Alto y Muy Alto). Los activos con resultados Alto y Muy Alto, deben ser considerados para una posterior evaluación y planificación de controles que permitan disminuir o controlar esta criticidad alcanzada (Chec & Del, 2022).

#### ***4.3. Análisis de riesgo y resultado de criticidad***

Es de interés para CHEC capitalizar oportunidades relacionadas con el aprovechamiento de los datos que se viene extrayendo de los equipos y activos productivos instalados en la red y que son de interés particular para la realización de actividades de operación, mantenimiento y reposición, de tal manera que se puedan tomar decisiones de negocio que permitan generar ingresos y optimizar costos para la empresa. En el marco de la actualización tecnológica y la cuarta revolución que se viene adelantando con el fin de prestar un mejor servicio, en lo relacionado con las variables de calidad y confiabilidad, cada vez se cuenta con bancos de datos de mayor tamaño que permiten extraer información con algoritmos

de avanzados de análisis de datos para la operación y el negocio energético (Kock et al., 2014).

A su vez, se evidencian oportunidades en la reducción de indisponibilidades de servicio, que impacta directamente a los ingresos empresariales, puesto que cada vez que se detiene el funcionamiento de los activos críticos transmisión eléctrica para realizar mantenimientos, implica la reducción en los ingresos y pago de compensaciones a los usuarios. Al tener menos indisponibilidades de servicio relacionadas con el mantenimiento preventivo y/o correctivo, se puede hacer una asignación de funciones y/o responsabilidades al personal dando prioridad a lo estratégico. Lo anterior se puede resumir en que hay oportunidades manifiestas relacionadas con hacer más eficiente la prestación del servicio a través de la optimización y priorización a través de la criticidad en las actividades de mantenimiento.

En el caso de la subestación y su zona de estudio analizada se obtiene la siguiente calificación para los circuitos asociados a esta subestación de estudio como se observa en la Figura 15, allí se encuentran dos circuitos en el top 3 del listado de criticidad, con lo cual se concluye la importancia y relevancia de esta para la red de distribución eléctrica de CHEC esta zona geográfica sobre la cual se realiza el estudio.

	CIRCUITO	Descripción del Activo	TOTAL CALIFICACION	INDICE DE RIESGO	VALOR DE CRITICIDAD	TOTAL CALIFICACION	CRITICIDAD
1	CIR1	ZONA DE ESTUDIO	66	203,36%	80	66	MUY ALTO
2	CIR A	CIRCUITO A	57	209,67%	80	57	MUY ALTO
3	CIR2	ZONA DE ESTUDIO	57	102,84%	80	57	MUY ALTO
4	CIR B	CIRCUITO B	57	71,91%	80	57	MUY ALTO
5	CIR C	CIRCUITO C	56	108,24%	80	56	MUY ALTO
6	CIR D	CIRCUITO D	56	84,79%	80	56	MUY ALTO
7	CIR E	CIRCUITO E	42	137,40%	80	42	MUY ALTO
8	CIR F	CIRCUITO F	40	442,81%	80	40	MUY ALTO
9	CIR G	CIRCUITO G	37	128,56%	40	37	MUY ALTO
10	CIR H	CIRCUITO H	37	67,30%	80	37	MUY ALTO

Figura 15. Resultado análisis de criticidad CHEC 2022.

Los transformadores de potencia juegan un papel fundamental en el funcionamiento eficiente y confiable de una subestación eléctrica. Estos dispositivos son responsables de aumentar o disminuir el voltaje de la corriente eléctrica, facilitando su transmisión y distribución a lo largo de las redes de energía. Dada su importancia crítica, es importante implementar un programa de monitoreo para asegurar su funcionamiento óptimo y prevenir posibles fallas (Aponte et al., 2020). Al anticipar y abordar los problemas potenciales de manera proactiva, el monitoreo del transformador ayuda a prevenir fallas catastróficas que podrían resultar en interrupciones del servicio eléctrico, daños costosos al equipo, riesgos para la seguridad pública, medioambiente y comunidad.

#### 4.4. Activo transformador de potencia

Un transformador de potencia es un elemento fundamental en la red eléctrica, ya que tiene la función de aumentar o disminuir la tensión de la electricidad para su transporte y distribución eficiente. Sin embargo, este equipo también es vulnerable a varios factores que pueden comprometer su funcionamiento y afectar la continuidad del servicio eléctrico (Mata et al., 2023). Una de las vulnerabilidades de un transformador de potencia es su exposición a sobrecargas. Cuando se excede la capacidad de carga del transformador, este puede sobrecalentarse y sufrir daños

en el aislamiento interno, lo que puede resultar en cortocircuitos e incluso incendios (Salamanca Jaimes et al., 2016). Por esta razón, es importante contar con sistemas de protección y supervisión adecuados para evitar sobrecargas y proteger la integridad del transformador. Para garantizar un funcionamiento óptimo de los transformadores de potencia, es fundamental el monitoreo constante de su rendimiento a través de la recopilación y almacenamiento de datos relevantes a través de los SCADAS. Estos datos permiten a los operadores de la red eléctrica identificar posibles fallas o problemas en los transformadores, prevenir eventos y tomar decisiones informadas respecto al mantenimiento y la operación de estos (Darwish & Saadawi, 2018). Los datos recopilados de los transformadores de potencia pueden ser muy diversos, y van desde mediciones de corriente y voltaje, hasta datos relacionados con el historial de operación y mantenimiento del equipo. Estos datos son almacenados en sistemas de información empresarial o plataformas de monitoreo en tiempo real, donde son procesados y analizados para obtener información valiosa sobre el estado y el rendimiento de los transformadores. Los análisis y datos de las pruebas cromatográficas en los transformadores de potencia son fundamentales para detectar la presencia de compuestos orgánicos que puedan indicar la degradación del aceite dieléctrico. Estas pruebas permiten identificar y determinar los malos funcionamientos de los diferentes componentes presentes en el aceite, como ácidos, alcoholes, gases, entre otros, que pueden ser indicativos de problemas en el transformador. Además, las pruebas cromatográficas también permiten evaluar la calidad del aceite dieléctrico, detectar la presencia de contaminantes externos, como humedad o partículas sólidas, y monitorear la eficacia de los procesos de mantenimiento y reciclaje del aceite (H. Wu et al., 2020).

El protocolo 61850 es un estándar de comunicación utilizado en la industria eléctrica para la comunicación y control de dispositivos en sistemas de energía eléctrica. Este protocolo ha revolucionado la forma en que se gestionan las subestaciones, al permitir la integración de diferentes equipos de distintos fabricantes en un solo sistema de gestión (Baigent, Drew and Adamiak, Mark and Mackiewicz, Ralph and Sisco, 2004). Este protocolo ha contribuido a una mejor gestión y control de los

transformadores de potencia, al facilitar la comunicación entre estos equipos y los centros de control de la subestación. Permitiendo monitorizar en tiempo real el estado de los transformadores, detectar posibles problemas antes de que ocurran y realizar un mantenimiento preventivo de manera más eficiente. La integración ha facilitado la integración de los transformadores de potencia en sistemas de gestión tecnológica de las subestaciones inteligentes, permitiendo una mayor automatización y optimización de la red eléctrica (Schmutzler et al., 2013; Zeynal et al., 2014). Lo cual conlleva a la operación de manera más eficiente, reduciendo los costos de operación y aumentando la confiabilidad del sistema.

El dispositivo Coresense de la ABB nos suministra la información de variables como el hidrogeno, la humedad y temperatura del gas en el transformador de potencia en tiempo real (Hitachi ABB, 2019). Coresense es un dispositivo de monitoreo diseñado para proporcionar información avanzada sobre el estado de los transformadores eléctricos. Su función es evaluar y supervisar las condiciones del aceite aislante de transformadores de potencia. Proporciona un nuevo nivel de servicio "basado en inteligencia" que mejora el rendimiento, la disponibilidad y la eficiencia de la base instalada del transformador de potencia.

El transformador de potencia es el activo más importante en una red eléctrica (Arias Velásquez et al., 2019) . Durante su vida operativa, los transformadores de potencia están sujetos a esfuerzos térmicos, mecánicos y eléctricos, que conducen al envejecimiento del transformador (Prasojo & Suwarno, 2018).

El proceso de adquisición de datos a través del protocolo de comunicación Modbus TCP/IP (Corotinschi & Găitan, 2018), la Figura 16 “*Modelo de Adquisición de Datos*” permite extraer desde el dispositivo remoto (Coresense) hasta un servidor central que hemos denominado IoE Edge (Puente) donde se alojan herramientas de software permitiendo a futuro nuevos puentes hacia dispositivos con diferentes protocolos de comunicación utilizados en este ecosistema IoE (Capasso et al., 2018).

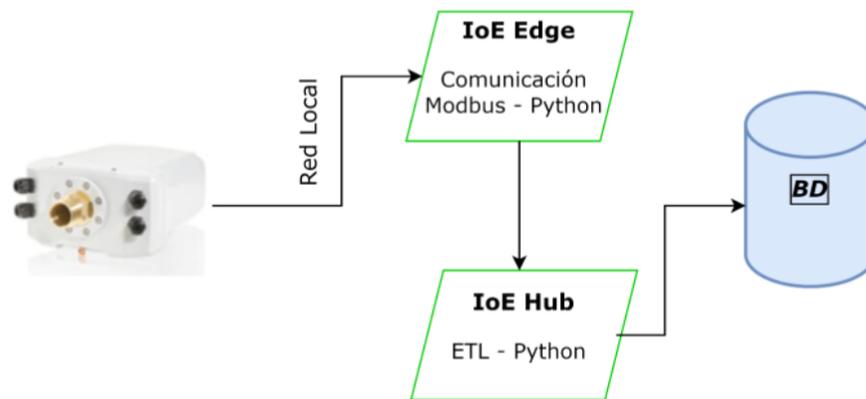


Figura 16. Modelo de Adquisición de Datos. Fuente propia.

Dentro del proceso de desarrollo de software se ha utilizado la librería ModbusTCP, esta librería facilita un cliente Modbus – TCP/IP simple para Python, la Figura 17 nos representa la utilización de código Python en conjunto con la librería PyModbusTCP .

Es código Python sin ninguna extensión o dependencia de módulo externo (Loic Lefebvre, 2022). Este proceso emula un procesamiento sistemático de ETL donde se prepara y transforma los datos telemétricos para su análisis, elaboración de informes y almacenamiento.

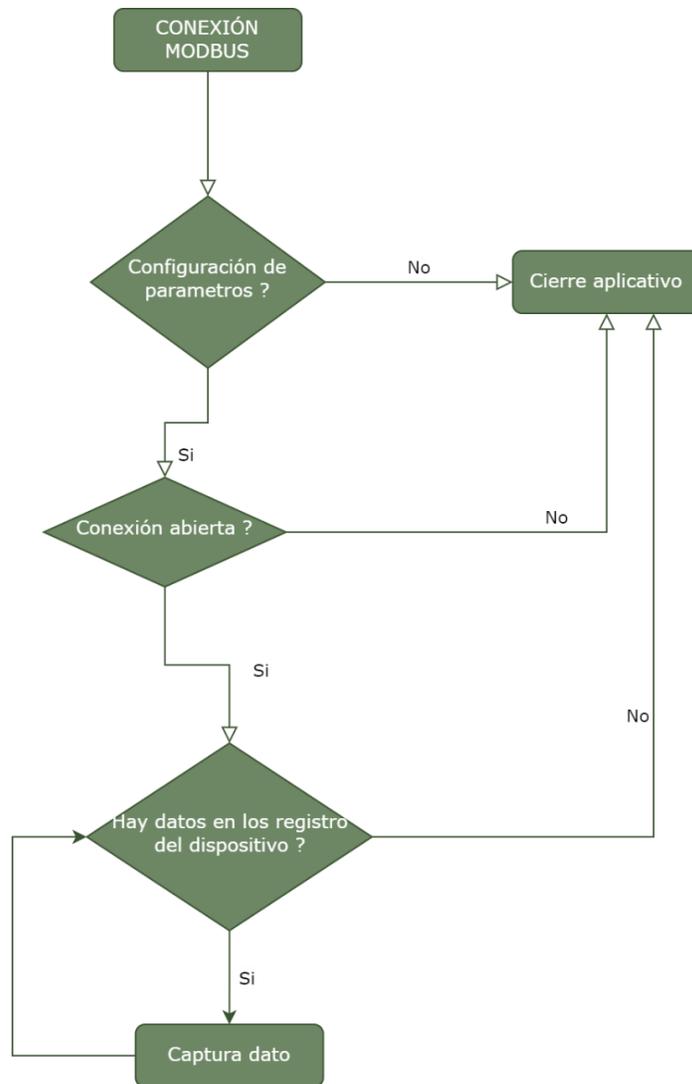


Figura 17. Flujo del proceso loE Edge. Fuente propia

## 5. Resultados

Los resultados de la automatización del proyecto investigativo a partir del pensamiento de diseño y la metodología CRISP-DM desarrolla una estrategia de valor para las compañías en las temáticas de Internet de la Energía (IoE). Con respecto a los objetivos propuesto se discutirá como una estrategia fundamental en el campo de la tecnología y la innovación para mejorar la eficiencia y la confiabilidad de las operaciones, el mantenimiento y la gestión de activos eléctricos.

Se presentan los resultados del modelo tecnológico que aplica conceptos de ETL (Extracción, Transformación y Carga) para automatizar y gestionar datos en el transformador de potencia. Durante la fase de ETL, los complementos logran automatizar tareas complejas, como la limpieza de datos, la integración de fuentes múltiples fuentes y la transformación de datos, facilitan la obtención de información precisa y coherente para análisis posteriores.

Estos complementos, como conectores de bases de datos y herramientas de procesamiento, permiten una manipulación eficiente y flexibilidad en la gestión de datos. En la fase de visualización y análisis de datos, los complementos se integran en herramientas de BI para ofrecer gráficos interactivos y capacidades de análisis, mejorando la capacidad de los usuarios para interpretar y tomar decisiones basadas en datos. Estas fases y sus resultados son ampliados a continuación.

### **5.1. Extracción de Datos.**

Los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) han revolucionado la gestión y supervisión de infraestructuras críticas en el sector eléctrico, siendo los transformadores de potencia uno de los activos clave en el sector (Zeynal et al., 2014). El análisis de los datos operativos SCADA de estos transformadores se ha convertido en una herramienta invaluable para optimizar su rendimiento, mejorar la eficiencia y garantizar la fiabilidad del suministro eléctrico.

Los transformadores de potencia son esenciales para transmitir y distribuir energía eléctrica, ya que convierten voltajes para reducir pérdidas y asegurar un suministro estable (Cerón et al., 2015; Prasajo & Suwarno, 2018). El análisis de datos operativos SCADA proporciona una visión detallada del rendimiento en tiempo real de estos activos críticos en la Figura 18 se observa la topología de red y un esquema preliminar del componente y las tecnologías de la operación en CHEC. Esta tecnología permite monitorear parámetros como la temperatura, la carga, cargas, consumos y las condiciones ambientales, lo que ayuda a detectar anomalías, prevenir y corregir fallos en la red de distribución.

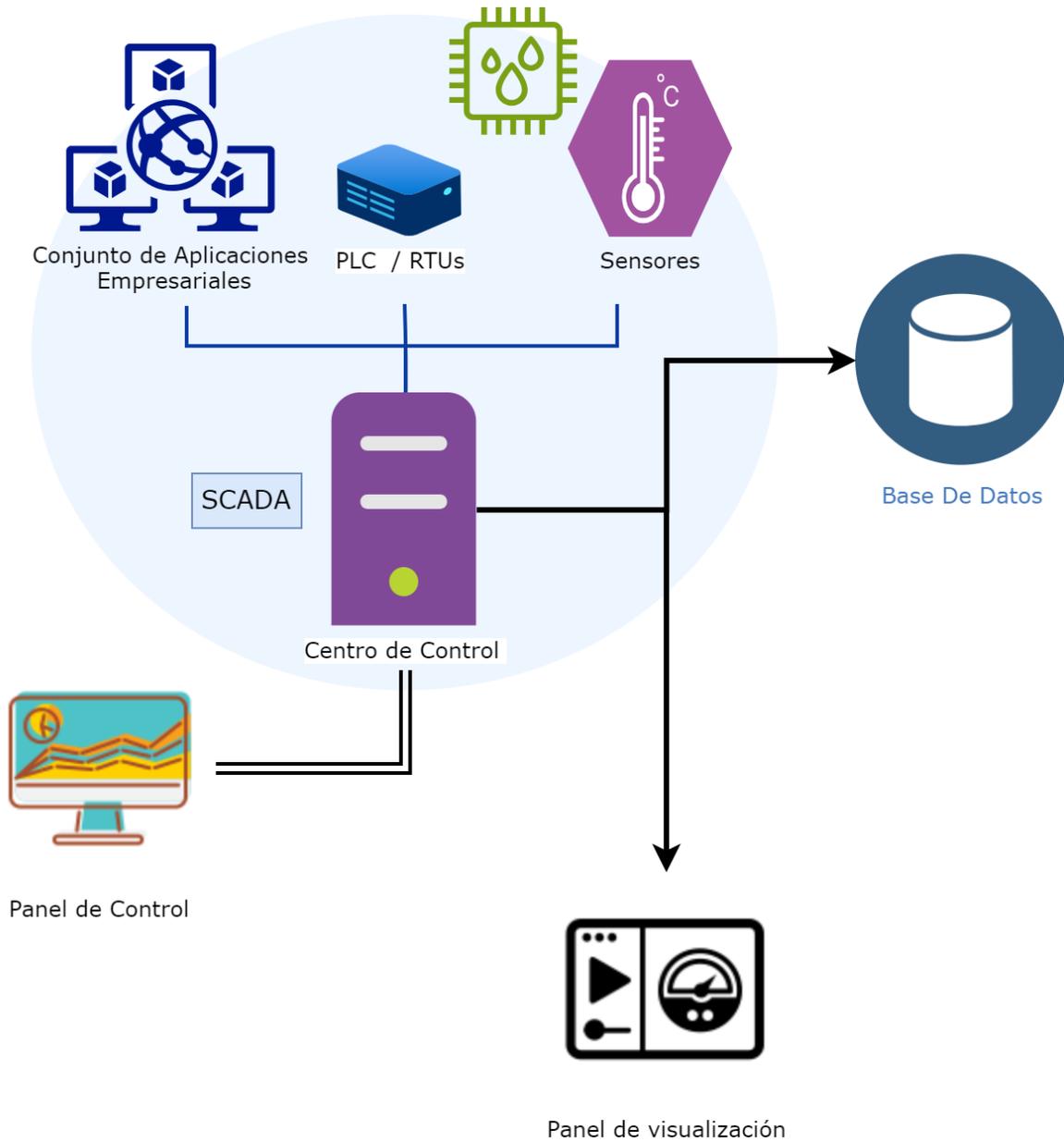


Figura 18. Representación sistema Scada CHEC. Creación propia.

El beneficio del análisis de datos operativos SCADA en transformadores de potencia es su capacidad para optimizar las estrategias de mantenimiento. El seguimiento de indicadores de salud y rendimiento, las empresas pueden implementar un mantenimiento predictivo y preventivo más eficiente (Khan et al., 2020). La identificación de tendencias anómalas en los datos permite programar

intervenciones de mantenimiento de manera proactiva, reduciendo los costos asociados y prolongando la vida útil del transformador.

Otro aspecto que debe tenerse en cuenta en el análisis de datos operativos SCADA, en transformadores de potencia, es su contribución a la mejora de la eficiencia energética. Al monitorear de cerca los patrones de carga y consumo, las empresas pueden identificar oportunidades para optimizar la distribución de la carga, minimizar las pérdidas energéticas y mejorar la utilización de los activos. Esto no solo reduce los costos operativos, sino que también promueve una operación más sostenible y respetuosa con el medio ambiente (Mata et al., 2023). La seguridad es una preocupación primordial en la operación de infraestructuras eléctricas, y el análisis de datos operativos SCADA juega un papel fundamental en la gestión de riesgos. Al detectar condiciones operativas anómalas o potencialmente peligrosas, la CHEC pueden tomar medidas correctivas inmediatas para evitar accidentes o daños, la cual termina afectando aspectos financieros y reputacionales. Además, el análisis de datos también facilita el cumplimiento de normativas y estándares regulatorios, proporcionando documentación detallada sobre el rendimiento y la integridad de los transformadores de potencia.

Los numerosos esfuerzos empresariales y los grandes beneficios del análisis de datos operativos SCADA en transformadores de potencia, existen desafíos significativos que deben abordarse. La gestión de datos y el análisis de grandes volúmenes de datos requiere infraestructuras robustas y herramientas analíticas avanzadas (Schuelke-Leech et al., 2015). Además, la interoperabilidad entre sistemas SCADA de diferentes fabricantes y la seguridad cibernética son áreas de preocupación creciente. La adopción de tecnologías emergentes como el Internet de la Energía (IoE), el aprendizaje automático y la inteligencia artificial mejoran aún más la capacidad de análisis de datos operativos SCADA. Estas tecnologías permitirán una supervisión más detallada y una toma de decisiones más inteligente, impulsando la eficiencia y la confiabilidad de los transformadores de potencia en la era digital.

La hipótesis plantea que la aplicación de técnicas de minería de datos a los datos operativos de SCADA y dispositivos Coresense en los transformadores de potencia puede proporcionar información valiosa para mejorar su desempeño y eficiencia operativa. La aplicación de técnicas de minería de datos a los datos operativos recopilados de sistemas SCADA y dispositivos Coresense en transformadores de potencia revelará patrones, tendencias y relaciones ocultas que pueden ser utilizadas para mejorar el desempeño de los transformadores. Se postula que, mediante la identificación de correlaciones significativas entre variables operativas, como temperatura, carga, tensiones, corriente, y condiciones ambientales; y desde el coresense la temperatura de aceite, la humedad y el hidrogeno se podrán desarrollar modelos predictivos precisos para predecir el desgaste, la eficiencia y la vida útil restante de los transformadores (Pincay-Ponce et al., 2020). Se espera que la aplicación de minería de datos permita una optimización proactiva de la operación y el mantenimiento de los transformadores, lo que resultará en una reducción de costos, una mayor confiabilidad del sistema y una mejor gestión de la infraestructura eléctrica en general.

Los dispositivos Coresense recopilar datos operativos y de rendimiento de los transformadores de potencia, monitoreo continuo en línea de gases de transformadores, como hidrógeno y humedad (Hitachi ABB, 2019). Estos datos se recopilan en series temporales. Se pueden aplicar técnicas de análisis de series de tiempo, como modelos ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) o modelos de espacio de estado, para detectar patrones, tendencias y anomalías en los datos recopilados (Priyo Das & Carlos Leicht PGTR, 2019). Esto permite identificar posibles problemas o cambios en el rendimiento del transformador antes de que se conviertan en fallas graves.

Utilizando modelos de series de tiempo entrenados con datos históricos, se puede prever el rendimiento futuro del transformador y anticipar posibles fallas o degradaciones. Esto permite a los operadores de la red tomar medidas preventivas, como el mantenimiento programado o la sustitución de componentes, para evitar

interrupciones en el suministro de energía. Al utilizar datos en tiempo real y técnicas de análisis de series temporales, se logra optimización de los programas de mantenimiento de los transformadores. En lugar de realizar mantenimiento de manera regular o basada en el tiempo, pueden programar intervenciones solo cuando sea necesario (mantenimiento predictivo), lo que puede reducir los costos operativos y minimizar el tiempo de inactividad de este activo.

Para el presente caso la gestión de datos y su dimensionamiento de almacenamiento en los IoE y este caso de uso el activo transformador de potencia se refiere a cómo se recopilan, almacenan y utilizan los datos generados por los sistemas eléctricos y equipos asociados. Es fundamental identificar qué datos son relevantes para el monitoreo y la gestión eficiente de los sistemas eléctricos. En este caso se posee tres variables fundamentales (Hitachi ABB, 2019) :

1. La temperatura de Aceite
2. La humedad
3. El hidrogeno

Una vez recopilados, los datos deben almacenarse de manera segura y accesible. Se utilizan sistemas de almacenamiento como bases de datos, almacenamiento en la nube o sistemas de gestión de datos históricos para mantener un registro histórico y permitir análisis retrospectivos. Para el presente caso se dimensiona una serie de campos como lo observamos en la Figura 19 allí se detalla los tipos y cantidad de espacio requerido para estos datos recopilados en base de datos SqlServer.

<b>Campo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Tamaño en byte</b>
Id dispositivo	VARCHAR(12)	14
Fecha	DATETIME	8
H2O	FLOAT	8
H2OTmp	FLOAT	8
H2	FLOAT	8
H2Oppm	FLOAT	8
H2ORoC	FLOAT	8
MstRoC	FLOAT	8
	<b>TOTAL</b>	<b>56</b>

*Figura 19. Dimensionamiento campos gestión de datos transformador de potencia. Fuente propia.*

El dimensionamiento adecuado del almacenamiento de los datos implica calcular la capacidad necesaria para manejar los datos recopilados durante períodos específicos, considerando la frecuencia de captura de datos y la granularidad requerida. Esto asegura que no se pierdan datos importantes y que el sistema pueda escalar según sea necesario (Daki et al., 2017). En el presente caso de estudio se ha proyectado un crecimiento adecuado acorde a la incorporación de los dispositivos de monitoreo asociados al transformador de potencia como se observa un crecimiento aproximado y la capacidad de almacenamiento requerida para 7 dispositivos que me generan alrededor de 49.613KB. La evaluación y dimensionamiento constante del crecimiento de datos y su almacenamiento son esenciales para garantizar que las organizaciones puedan gestionar de forma eficaz su información e infraestructura tecnológica a medida que aumenta. Analizar datos actuales, proyectar su crecimiento, y evaluar los requerimientos de almacenamiento, las empresas pueden anticiparse a sus necesidades futuras, optimizar costos y asegurar la escalabilidad de sus infraestructuras tecnológicas.

	Registros hora	Registros Diarios						
REGISTRO POR DISPOSITIVO	5	120						
DISPOSITIVOS	Registros mensuales	Registros anuales	bytes	En KB	Registros Tres años bytes	En KB		
1	3600	43200	2419200	2363	129600	7257600	7088	
2	7200	86400	4838400	4725	259200	14515200	14175	
3	10800	129600	7257600	7088	388800	21772800	21263	
4	14400	172800	9676800	9450	518400	29030400	28350	
5	18000	216000	12096000	11813	648000	36288000	35438	
6	21600	259200	14515200	14175	777600	43545600	42525	
7	25200	302400	16934400	16538	907200	50803200	49613	

Figura 20. Evaluación y dimensionamiento del crecimiento de datos y su almacenamiento. Fuente propia.

Los datos almacenados en base de datos pueden integrarse con sistemas de gestión de energía o el Sistemas de Gestión de Activos para análisis en tiempo real, generación de informes y propuestas de valor. Estos análisis pueden proporcionar indicadores valiosos sobre el rendimiento del activo, tendencias de las variables evaluadas y optimización de mantenimientos.

## 5.2. Transformación de Datos.

La gestión, comunicación y transformación de datos en el contexto de temas eléctricos activos se refiere a cómo se manejan, transmiten y procesan los datos generados por dispositivos y sistemas eléctricos en tiempo real (Hasan et al., 2019). Los dispositivos electrónicos asociados a los activos eléctricos, como sensores de corriente, voltaje o temperatura generan constantemente datos. Estos datos son capturados en tiempo real para monitorear el estado operativo de los equipos y sistemas eléctricos. Los datos capturados deben ser transmitidos de manera eficiente y segura a través de redes de comunicación como lo observamos en la Figura 21.

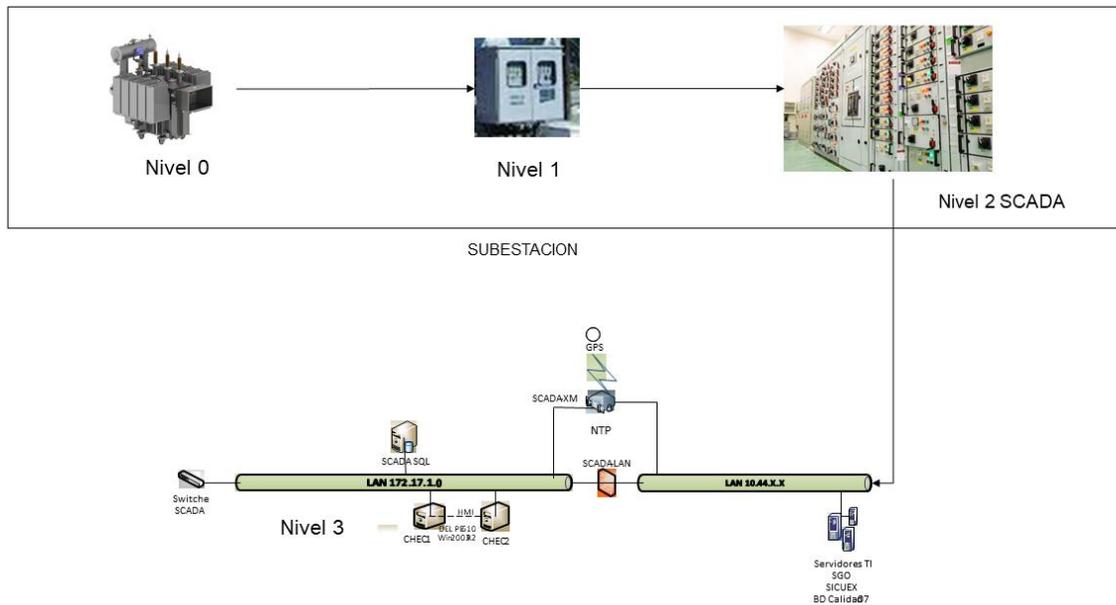


Figura 21. Modelo de comunicación de datos CHEC. Elaboración propia.

Esto puede implicar el uso de protocolos estándar como Modbus, DNP3, IEC61850 o tecnologías más modernas como MQTT, dependiendo de las necesidades de la aplicación y del entorno. Una vez que los datos son recibidos, se transforman y procesan para obtener información útil. Esto puede incluir la conversión de formatos, el cálculo de valores agregados como consumo energético acumulado, o la detección de anomalías basada en análisis avanzados.

La Figura 22 se observa el dispositivo Coresense en la subestación de CHEC donde se percibe la conectividad y el monitoreo en tiempo real del activo, este a su vez le permite la transmisión efectiva de datos entre diferentes dispositivos y sistemas dentro de una red eléctrica. Esto implica el uso de protocolos de comunicación estándar como IEC 61850, para asegurar la interoperabilidad y el intercambio de información entre equipos de diferentes fabricantes hacia un sistema SCADA como lo observamos en el esquema de la Figura 21 para la comunicación en sitios remotos que posee la compañía.



*Figura 22. Dispositivo Coresense transformador de potencia subestación CHEC. Fuente propia.*

En el presente caso investigativo los datos que provienen del Coresense presentan diferentes formatos y estructuras. La integración y transformación de datos consiste en combinar estos datos en un formato común y coherente, facilitando su análisis, almacenamiento y utilización posterior.

Esta etapa implica la aplicación de reglas de negocio, cálculos o funciones para transformar los datos en información significativa. Convertir unidades de medida, calcular promedios o realizar agregaciones según sea necesario para el análisis. Los datos capturados pueden enriquecerse con información adicional para proporcionar contexto o facilitar análisis más profundos. Esto podría incluir datos meteorológicos externos, información geográficos o datos históricos. Finalmente, los datos transformados y enriquecidos se almacenan en sistemas de gestión de

bases de datos, datalakes o bodegas para su posterior análisis, visualización o aplicación de modelos de aprendizaje automático (Huang et al., 2018).

SQL Server Integration Services (SSIS) es una herramienta robusta desarrollada por Microsoft que facilita la extracción, transformación y carga (ETL) de datos desde múltiples fuentes hacia bases de datos u otros destinos (Microsoft, 2023). En el contexto del presente proyecto de IoE y la gestión de información, SSIS desempeña una actividad en la transformación de datos gracias a sus características y funcionalidades avanzadas.

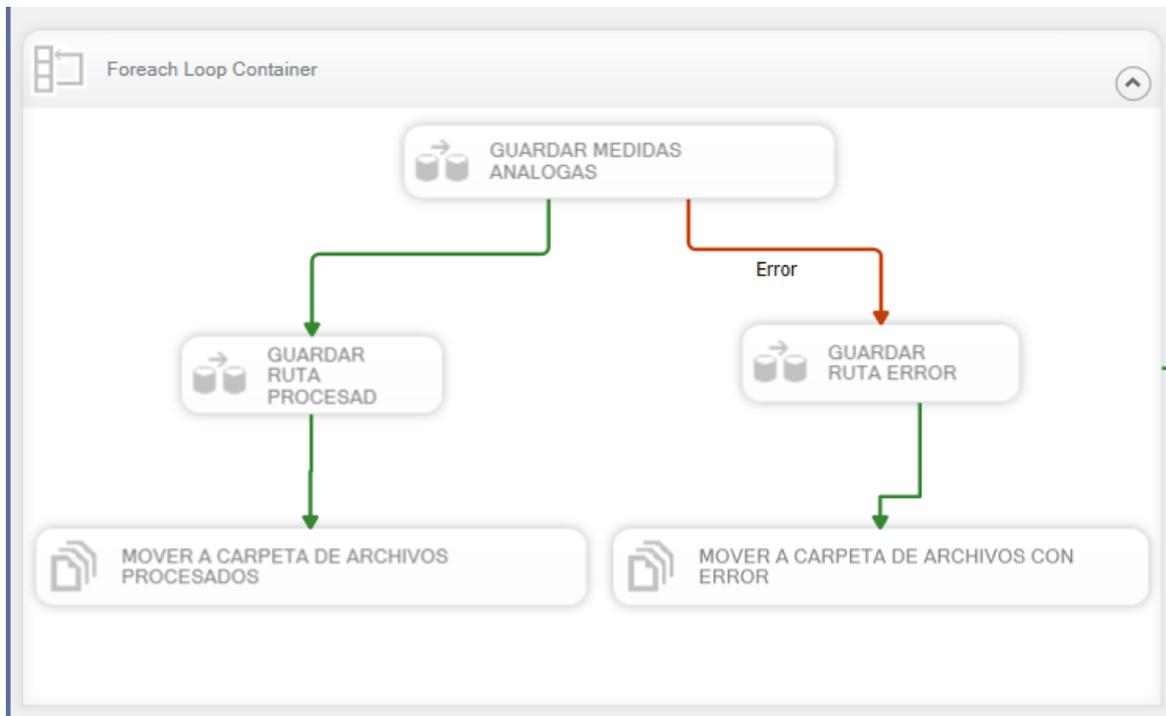


Figura 23. Procesamiento de datos SSIS - Microsoft. Fuente propia.

SSIS ofrece conectividad con una amplia gama de fuentes de datos, incluidas bases de datos relacionales, archivos planos, servicios web, y sistemas de almacenamiento en la nube, lo cual es fundamental dado que los datos en proyectos loE pueden provenir de múltiples dispositivos y plataformas. Mediante el uso de transformaciones predefinidas (como filtros, uniones, y conversiones) y la capacidad de implementar transformaciones personalizadas a través de scripts y componentes, SSIS permite adaptar los datos según las necesidades específicas del proyecto. La automatización y Programación de rutinas en SSIS generan la posibilidad de automatizar los flujos de trabajo de ETL, programar tareas de transformación de datos según horarios específicos o eventos desencadenantes, lo cual es esencial para el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos generados por dispositivos electrónicos.

En el proyecto de IoE, los sensores instalados en los transformadores de potencia recogen datos en tiempo real sobre varios parámetros, como temperatura, humedad, nivel de aceite, y otros operativos. Estos datos se envían a una base de datos central como lo observamos en la Figura 23. SSIS puede conectarse a múltiples fuentes de datos, incluidas bases de datos SQL y archivos planos como se observa en este caso.

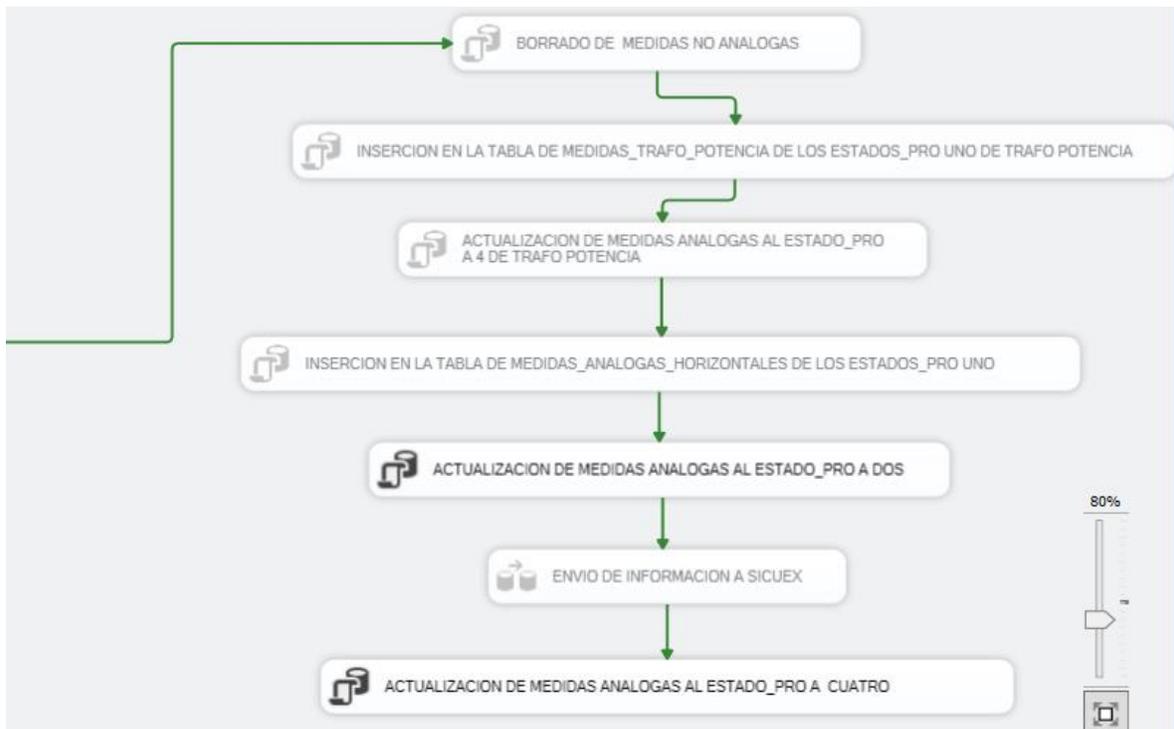


Figura 24. Transformación y almacenamiento de datos SSIS - Microsoft. Fuente propia.

SSIS proporciona una variedad de herramientas para transformar los datos, como la conversión de tipos de datos, la agregación de datos, la limpieza de datos duplicados o erróneos, y la aplicación de reglas de negocio.

Mediante los flujos de datos en SSIS como los expuestos en la Figura 24, se puede diseñar un proceso que transforme los datos en bruto en un formato adecuado para

el análisis. Cargar los datos transformados en una variedad de destinos, incluidos las bodegas de datos de SQL Server. Los procesos de carga son automatizados para ejecutarse en intervalos programados de 15 minutos, garantizando que los datos siempre estén actualizados y almacenado la información para su posterior análisis.

### ***5.3. Almacenamiento de Datos.***

El almacenamiento de datos dentro de los proyectos IoE permite el monitoreo en tiempo real de los activos en especial de los transformadores de potencia por su importancia en el suministro eléctricos. Los sensores del dispositivo CoreSense recopilan información sobre variables clave como la temperatura del aceite, el hidrogeno y la humedad como se observa en la Figura 25. El almacenamiento de datos, tiene como objetivo para las organizaciones analizar patrones y detectar anomalías que podrían indicar problemas emergentes y fallas en progreso. La identificación temprana de estos problemas ayuda a prevenir eventos inesperados, evitando interrupciones en el suministro eléctrico y reduciendo el riesgo de daños costosos.

```
Select Top 1000 * From dbo.MEDIDAS_TRAFO_POTENCIA
```

CIRCUITO	TIEMPO_AJUSTADO	TEMP_ACEITE	HIDROGENO	HUMEDAD
ROS30T15	2023-03-01 15:45:00.000	30,21802	0	10,54965
CHA30T13	2023-03-01 16:00:00.000	35,98218	0	6,921767
ROS30T15	2023-03-01 16:00:00.000	29,88696	0	10,53457
CHA30T13	2023-03-01 16:15:00.000	34,65601	0	6,913043
ROS30T15	2023-03-01 16:15:00.000	30,35864	0	10,51988
CHA30T13	2023-03-01 16:30:00.000	33,77783	0	6,903012
ROS30T15	2023-03-01 16:30:00.000	30,84668	0	10,50391
CHA30T13	2023-03-01 16:45:00.000	33,41309	0	6,893288
ROS30T15	2023-03-01 16:45:00.000	31,29175	0	10,48916
CHA30T13	2023-03-01 17:00:00.000	33,16382	0	6,882174
ROS30T15	2023-03-01 17:00:00.000	31,6936	0	10,47365
CHA30T13	2023-03-01 17:15:00.000	33,20801	0	6,871134
ROS30T15	2023-03-01 17:15:00.000	32,0105	0	10,45736
CHA30T13	2023-03-01 17:30:00.000	33,07715	0	6,860358
ROS30T15	2023-03-01 17:30:00.000	32,37134	0	10,43947
CHA30T13	2023-03-01 17:45:00.000	33,14966	0	6,849643
ROS30T15	2023-03-01 17:45:00.000	32,93311	0	10,42303
CHA30T13	2023-03-01 18:00:00.000	33,39722	0	6,840044
ROS30T15	2023-03-01 18:00:00.000	33,22095	0	10,40679
CHA30T13	2023-03-01 18:15:00.000	33,32471	0	6,831254
ROS30T15	2023-03-01 18:15:00.000	33,30859	0	10,3907
CHA30T13	2023-03-01 18:30:00.000	33,32471	0	6,823016

Figura 25. Consulta SQL base de datos medidas Transformador Potencia. Fuente Propia.

La Figura 25 representa una consulta SQL en bases de datos de medidas de transformadores de potencia. Estas consultas facilitan la extracción y análisis de datos históricos, lo que ayuda a identificar patrones de comportamiento y posibles fallos. Al utilizar SQL para filtrar y agrupar datos, es posible generar reportes precisos que optimicen el monitoreo y la gestión de los transformadores, mejorando

la eficiencia operativa y contribuyendo a la toma de decisiones informadas para la prolongación de su vida útil.

La interoperabilidad de datos y su almacenamiento son aspectos críticos para garantizar el funcionamiento eficiente y la integración efectiva de diversos dispositivos y sistemas. La interoperabilidad se refiere a la capacidad de diferentes sistemas y dispositivos para intercambiar, procesar y utilizar datos de manera coherente, a pesar de las diferencias en sus formatos, protocolos y plataformas (DAMA International, 2022). Para lograr esto, es fundamental utilizar estándares y protocolos comunes, así como adoptar enfoques de integración que faciliten la comunicación entre dispositivos heterogéneos. En cuanto al almacenamiento de datos, es esencial contar con soluciones que permitan manejar grandes volúmenes de datos generados por los dispositivos IoT, asegurando su disponibilidad, integridad y seguridad. El almacenamiento puede ser tanto en la nube como en servidores locales, dependiendo de las necesidades del proyecto y los requisitos de latencia y procesamiento. Implementar estrategias adecuadas para la interoperabilidad y el almacenamiento de datos optimiza el rendimiento del sistema, facilita la toma de decisiones basadas en datos y habilita el desarrollo de aplicaciones más inteligentes y efectivas.

#### **5.4. Visualización y análisis de Datos.**

El componente de visualización propuesto tiene como objetivo proporcionar una representación clara y accesible de los datos relevantes para facilitar la toma de decisiones informadas a partir de la metodología y flujo de datos propuesto para el proyecto IoE. A continuación, se presentan algunos aspectos destacados del componente propuesto de visualización.

El componente de visualización desarrollado en PowerBI incluye un panel de control intuitivo que muestra una visión general del activo a monitorear y sus resultados asociados como se observa en la Figura 26 (Ferrari & Russo, 2016; Power et al., 2021). Proporciona información rápida y precisa sobre el estado actual de los activos, como el resultado de temperatura, hidrogeno y humedad. La Figura 26 demuestra ser una herramienta eficaz para la detección temprana de anomalías en el rendimiento de los transformadores. Los resultados indican que permite una supervisión constante de parámetros clave, como temperatura, la humedad y el hidrogeno, lo que facilita la identificación de posibles fallos antes de que se conviertan en problemas graves. Esto no solo mejora la seguridad operativa, sino que también contribuye a la optimización del mantenimiento y prolonga la vida útil de los transformadores al garantizar una intervención más precisa y oportuna.

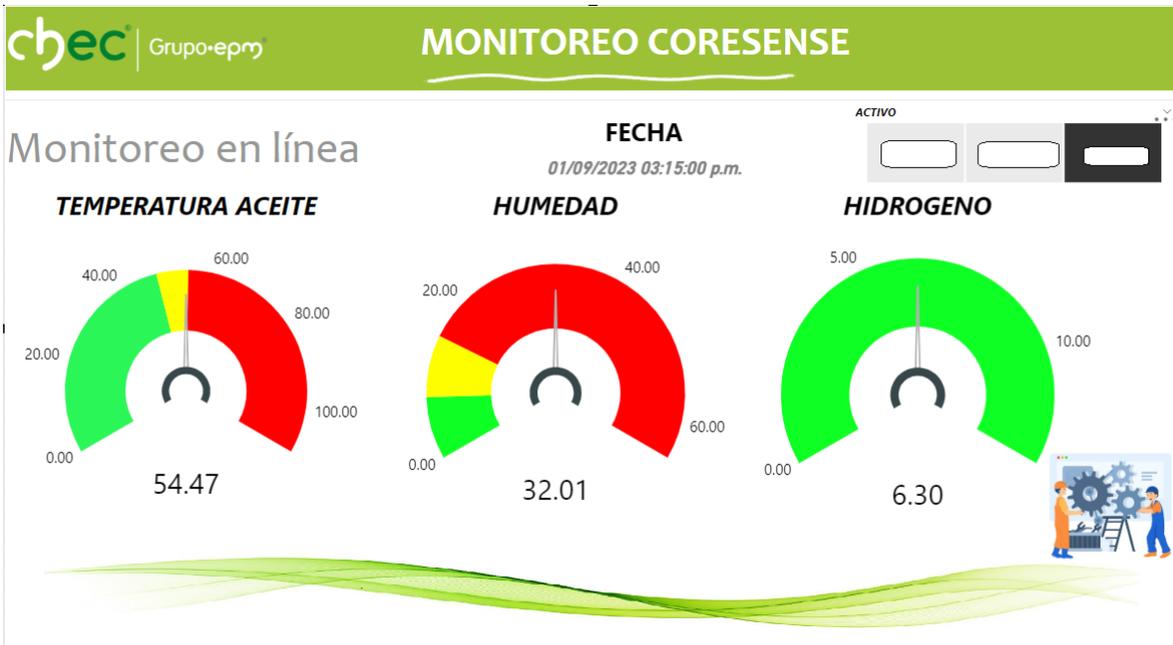


Figura 26. Resultado del monitoreo del Coresense. Fuente propia.

Para el presente prototipo propuesto tiene como objetivo ayudar a monitorear la actividad del transformador de potencia, el componente utiliza indicadores visuales, como colores o iconos, para representar su estado y comportamiento de la temperatura, la humedad, y el hidrogeno en el tiempo como se observa en la Figura 27, Figura 28 y Figura 29 respectivamente. La información generada a partir de observaciones y criterios de un personal técnico es valiosa por su especificidad y aplicabilidad. Durante el monitoreo de equipos, inspecciones visuales y mediciones manuales, los técnicos recopilan datos como rendimiento, niveles de presión y condiciones visibles del equipo. Además, realizan evaluaciones de rendimiento basadas en su experiencia, registran el historial de mantenimiento y observaciones de seguridad. Estos datos permiten detectar problemas tempranamente, optimizar el funcionamiento del equipo y tomar decisiones informadas y proactivas, mejorando la eficiencia y efectividad de las operaciones técnicas. En la gestión tecnológica cotidiana, el uso de datos facilita la identificación de áreas de mejora, la planificación de mantenimiento preventivo y la implementación de soluciones personalizadas, lo que se traduce en una mayor confiabilidad y eficiencia operativa.

Las observaciones realizadas en las figuras descritas permiten concluir que el monitoreo de la temperatura, la humedad y el hidrógeno en transformadores de potencia hace parte del conjunto de variables relacionadas que garantizan el funcionamiento óptimo y prevención de fallos. Los resultados indican que el monitoreo constante de la temperatura (Figura 27) permite identificar sobrecalentamientos tempranos, lo que facilita la implementación de medidas correctivas antes de que se produzcan daños graves. La humedad es un factor que puede afectar el aislamiento del transformador, por lo que su monitoreo ayuda a prevenir la corrosión y el deterioro del equipo observaciones de la Figura 28. Además, el hidrógeno como se observa en la Figura 29 es un indicador crítico de posibles fugas de gas o fallos internos, por lo que su detección temprana contribuye a la seguridad y fiabilidad operativa (H. Wu et al., 2020). En conjunto, estos parámetros mejoran la gestión del mantenimiento, optimizan la vida útil del transformador y reducen los riesgos de fallos inesperados.

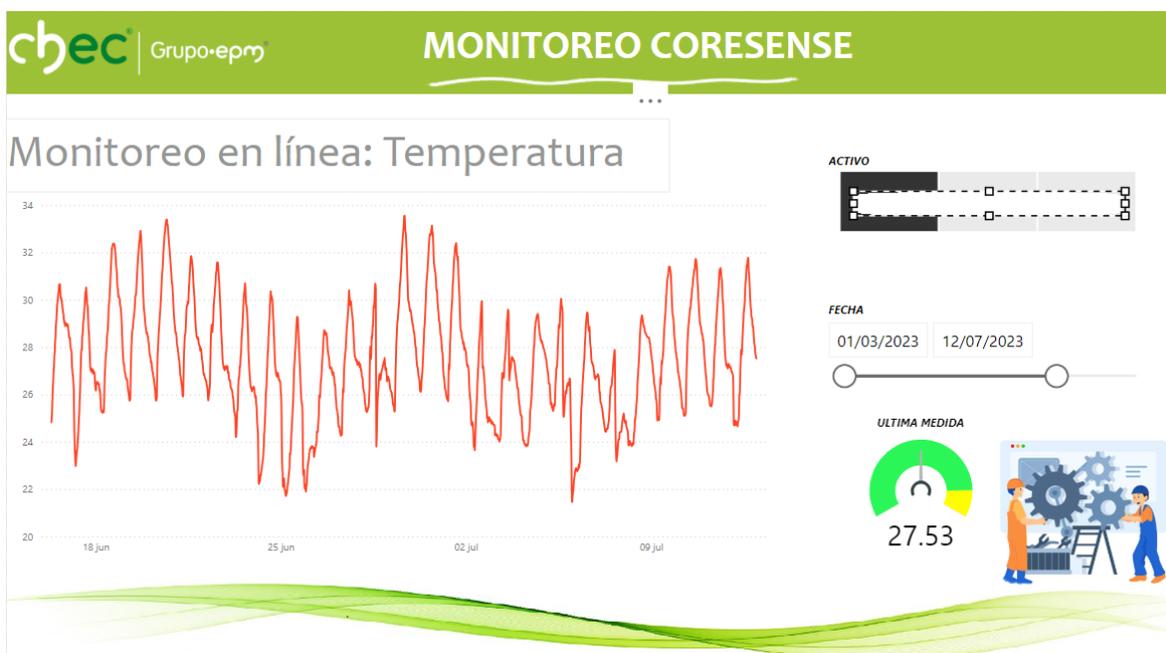


Figura 27. Monitoreo de temperatura. Fuente propia.

Monitoreo en línea: Humedad



Figura 28. Monitoreo de humedad. Fuente propia.

Monitoreo en línea: Hidrogeno



Figura 29. Monitoreo de hidrogeno. Fuente propia.

En resumen, este componente de visualización brinda una plataforma interactiva y fácil de usar para observar y evaluar las condiciones del activo, así como para respaldar la toma de decisiones en los procesos de operación y mantenimiento de los activos. Su enfoque en la representación clara de datos, la accesibilidad y las funcionalidades de análisis lo convierten en una herramienta valiosa para mejorar la eficiencia y la gestión de activos en procesos críticos.

Como complemento para el componente de análisis de dato se desarrolla un piloto de un módulo de automático de alertas a través de PowerAutomate, es una plataforma de automatización de flujos de trabajo creada por Microsoft. Su objetivo es simplificar y automatizar tareas repetitivas y procesos empresariales al integrar diferentes aplicaciones y servicios, tanto en la nube como locales.

Los flujos de trabajo pueden incluir condiciones y lógica de los sensores del equipo Coresense, permitiendo que las acciones se realicen solo cuando se cumplen ciertos criterios. Esto añade un nivel de sofisticación a la automatización, permitiendo flujos de trabajo más complejos y adaptables como se observa en la Figura 30.

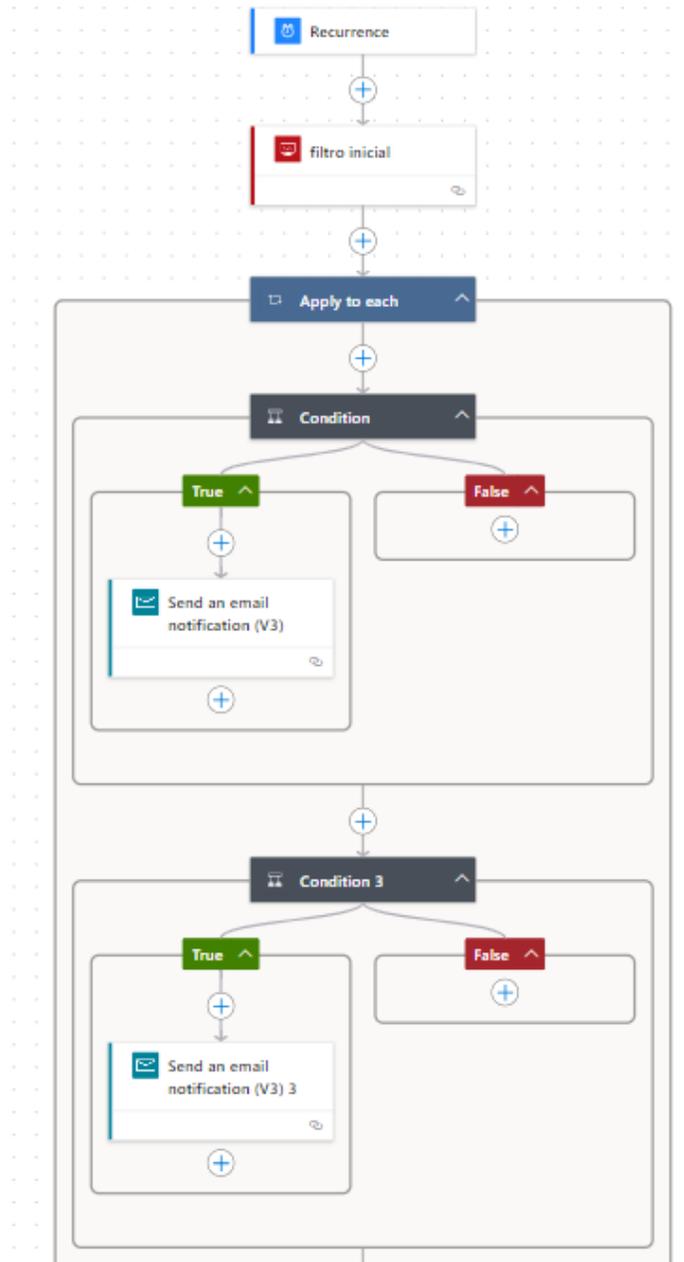


Figura 30. Flujo de datos y validaciones Power Automate. Fuente propia

eflujos de trabajo, enviar notificaciones a través de correo electrónico sobre el estado de los procesos y realizar ajustes según sea necesario para asegurar que las automatizaciones funcionen de manera eficiente para los actores involucrados en la gestión de activos, la Figura 31 ejemplifica un posible mensaje de alerta controlado.

Alerta Coresense medida Temperatura es superior



Microsoft Power Apps and Power Automate

Para: YOINER TABARES GALVIS



17/06/2023 4:01 PM

**¡Cuidado!** este correo proviene de un usuario externo, no abras archivos adjuntos ni hagas clic en enlaces sin validar que el remitente y el contenido sean seguros. **Nunca entregues tu usuario ni contraseñas a través de enlaces.**

Se ha producido una medida por fuera de lo establecido,

Fecha: 2023 -06-17T15:45:00Z

Activo: ██████████

Temperatura Aceite: 39.0769

Humedad: 6.720932

Hidrogeno: 0

Mensaje automatico, alerta Coresense

*Figura 31. Mensaje electrónico controlado para el piloto de alerta automática. Fuente propia.*

Facilitar la automatización de procesos, la supervisión del equipo Coresense y la integración de sistemas mediante una interfaz amigable y la conexión a la base de datos, permite a la organización mejorar la eficiencia operativa y reducir el tiempo dedicado a tareas manuales y repetitivas.

Durante el proceso de desarrollo del presente proyecto un transformador de potencia crítico y que posee instalado el dispositivo Coresense empieza a comunicar datos con elevados niveles de hidrógeno en su interior, lo cual puede ser indicativo de un problema serio como lo observamos en la Figura 32, los altos niveles de hidrógeno que tiene un crecimiento cercano a 100 ppm son una señal de alerta. Es importante actuar de manera proactiva, realizar análisis detallados y llevar a cabo el mantenimiento necesario para asegurar la seguridad y la eficiencia del equipo.

## Monitoreo en línea: Hidrogeno

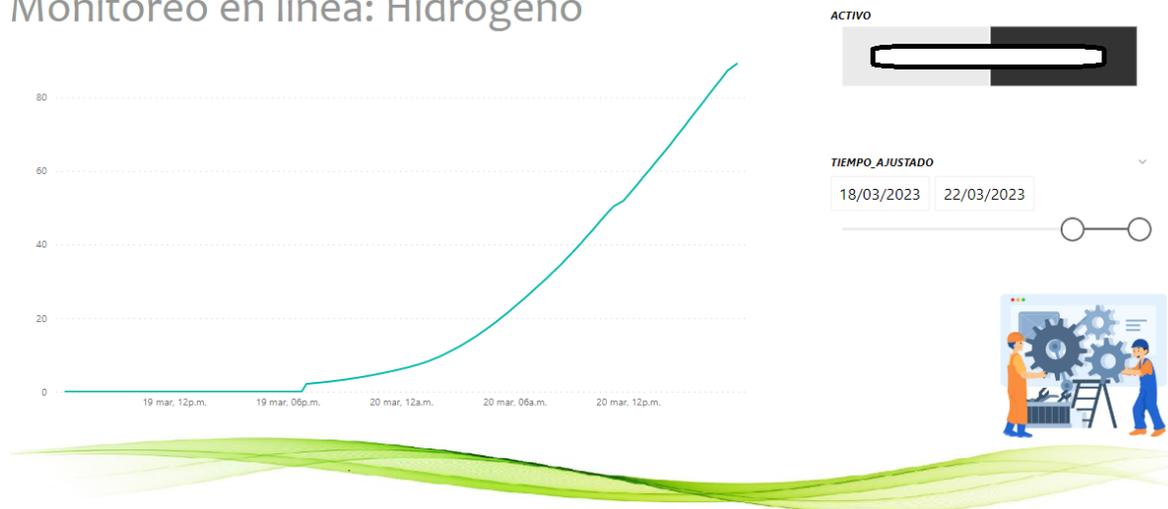


Figura 32. Altos niveles de Hidrogeno. Fuente propia

El evento presentado sobre el activo en estudio del proyecto piloto el día 19 de marzo del 2023, se recibe información por parte de la operación local de la activación de la protección del equipo. Observaciones iniciales detectan un incremento inusual en los niveles de hidrógeno durante la medición del dispositivo de monitoreo CoreSense; los niveles de hidrógeno superaron los umbrales aceptables, lo que llevó a una revisión inmediata del estado del transformador. IEEE C57.104 es una norma que establece directrices para la evaluación y el diagnóstico de transformadores de potencia mediante el análisis de aceite (Cerón et al., 2015). Esta norma en conjunto con el saber y la experiencia de los profesionales de mantenimiento proporciona métodos para determinar la condición del activo, incluyendo pruebas de laboratorio y análisis de gases disueltos, que ayudan a identificar problemas como la descomposición del aislamiento y el deterioro del equipo. Su objetivo es facilitar la toma de decisiones informadas sobre el mantenimiento y la gestión de transformadores, asegurando su operatividad y prolongando su vida útil.

Debido a los elevados niveles de hidrógeno y el riesgo asociado, se tomó la decisión de sacar el transformador de servicio para prevenir una posible falla catastrófica. La decisión fue respaldada por los resultados de los equipos de protección y el monitoreo local del activo, y la evaluación de riesgos realizada por el equipo de mantenimiento. La decisión de sacar el transformador de potencia de servicio fue fundamental para prevenir riesgos mayores y garantizar la seguridad operativa. Sin embargo, los costos asociados de alrededor 800 millones pesos (cifras estimadas en eventos menores) en este evento son significativos y reflejan la importancia del monitoreo proactivo y el mantenimiento preventivo en activos críticos.

El evento del 19 de marzo de 2023, relacionado con los elevados niveles de hidrógeno en el transformador de potencia, subrayó la importancia del monitoreo en tiempo real en la gestión de activos críticos. La decisión de desconectar el transformador fue fundamental para prevenir riesgos mayores y garantizar la seguridad operativa. Este incidente también puso de manifiesto la necesidad de implementar tecnologías de monitoreo basadas en IoE, que permiten la recopilación en tiempo real de datos sobre el estado del equipo, facilitando la detección temprana de anomalías y optimizando la respuesta ante posibles fallas. La integración de soluciones IoE no solo puede mejorar la eficiencia del mantenimiento, sino que también ayuda a reducir costos operativos y a prolongar la vida útil de los activos, asegurando así una operación más segura y eficiente en el futuro.

Implementar un programa de monitoreo y mantenimiento preventivo basado en IoE puede generar importantes beneficios económicos al prevenir fallos inesperados en transformadores de potencia. Estos beneficios incluyen la reducción de costos asociados con interrupciones no planificadas, que pueden ser entre 3 y 10 veces mayores que los costos de mantenimiento preventivo (Pérez Hernández, 2012).

Además, un mantenimiento adecuado prolonga la vida útil del transformador, evitando la necesidad de reemplazos prematuros que pueden costar entre \$500.000 y \$1.000.000 Dólares, dependiendo del tamaño y especificaciones del equipo. La prevención no solo mejora la eficiencia operativa y la seguridad, sino que también optimiza los costos a largo plazo, asegurando una operación más rentable y sostenible (Aponte et al., 2020; Pérez Hernández, 2012).

## 6. Conclusiones generales y Trabajos futuros

En esta tesis se propone un proyecto de loE en transformadores de potencia y aprovechar las tecnologías emergentes permita la monitorización en tiempo real de estos equipos críticos, recopilando datos sobre variables como temperatura del aceite, hidrogeno y humedad. Esta vigilancia continua para detectar problemas antes de que provoquen fallos graves, optimizar el mantenimiento mediante un enfoque predictivo, garantizar la seguridad operativa y mejorar la eficiencia del sistema eléctrico en general. Al integrar los proceso propuestos y desarrollados alrededor de las temáticas de loE y la gestión de información, se asegura una operación más segura, confiable y económica de los transformadores de potencia, minimizando interrupciones y costos asociados.

### **6.1. Objetivo Especifico 1:**

“Identificar una metodología que permita la integración de conceptos relacionados con la gestión de activos en los transformadores de potencia de las redes de distribución en Colombia”

Resultado: Se identificó una metodología híbrida que permite la integración de conceptos relacionados Internet de la Energía y la gestión de activos, para aportar en el ciclo de vida de los activos de los sistemas de distribución eléctrica. El aporte de este trabajo radica en combinar los conceptos de pensamiento de diseño en conjunto con la gestión de activos con el monitoreo continuo de los mismos; utilizando datos provenientes de fuentes como el dispositivo Coresense, obtenidos mediante dispositivos IoT. Utilizando el marco de CRISP-DM para guiar las fases del proyecto desde la comprensión del negocio hasta el despliegue de modelos y dashboards, y apoyándose en procesos ETL para extraer, transformar y cargar los datos, es posible gestionar y preparar datos para análisis de datos. Esta metodología aprovecha la capacidad de loE para generar datos en tiempo real y la

estructura de CRISP-DM para darles un uso práctico y relevante en la toma de decisiones.

La integración de tecnologías de IoE, gestión de datos y activos permite identificar patrones y tendencias en el comportamiento de los transformadores de potencia, anticipando posibles fallos y optimizando el mantenimiento preventivo. En el estudio de caso, se demostró cómo la implementación de estas tecnologías puede reducir costos y mejorar la eficiencia operativa. La combinación de datos en tiempo real con análisis datos proporciona una visión holística del estado de los activos, facilitando la toma de decisiones informadas y estratégicas para la gestión de los sistemas de distribución eléctrica.

En este enfoque, el proceso ETL desempeñó un papel crucial en la recolección y transformación de los datos provenientes de los dispositivos instalados en los transformadores de potencia y otros activos críticos de la red de distribución. Este proceso aseguró que los datos fueran de alta calidad y estuvieran listos para ser cargados en sistemas de análisis avanzados. Al aplicar la metodología CRISP-DM, se facilitó la ejecución de análisis de datos continuos, optimizando el mantenimiento basado en condiciones y automatizando procesos dentro de la infraestructura.

La integración de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) permitió monitorear en tiempo real el estado de los activos, mejorando la eficiencia y reduciendo costos operacionales. Este enfoque posibilitó el desarrollo de soluciones de inteligencia de negocio, maximizando las capacidades del proyecto IoE. En el estudio de caso, se evidenció cómo este modelo híbrido, que incluye pensamiento de diseño y CRISP-DM, generó valor tangible para la gestión de activos en la red de distribución eléctrica, propiciando un rendimiento óptimo de los transformadores de potencia y otros componentes.

### **6.3. Objetivo Especifico 2:**

“Diseñar un modelo investigativo que permita encontrar asociaciones a partir del flujo de información, herramientas de software y procesos análisis de datos en el caso de estudio del transformador de potencia”

Resultado: Se diseñó un modelo investigativo para encontrar asociaciones en la gestión de activos de los transformadores de potencia. Este modelo se compone de varias partes clave que trabajan de manera integrada para asegurar una gestión eficiente. Las partes incluyen la recopilación de datos mediante sensores IoT, el proceso ETL para transformar y asegurar la calidad de los datos, y el uso de análisis de datos bajo la metodología CRISP-DM. Estos componentes permiten identificar patrones y tendencias, anticipar fallos, y optimizar el mantenimiento preventivo, resultando en una operación más segura y rentable.

El modelo se basa en la recolección de datos, utilizando dispositivos de monitoreo avanzados instalados en los transformadores, los cuales miden variables operativas críticas como la temperatura del aceite, el hidrógeno y la humedad. Estos datos se recogen constantemente y se integran a través de procesos automatizados utilizando herramientas de software como SQL Server Integration Services (SSIS), que permiten la transformación y consolidación de esta información en un formato útil para el análisis.

Se propuso que los flujos de información encontrados en este modelo se caractericen por la constante actualización de los datos de los dispositivos de monitoreo en los transformadores. Las herramientas de software utilizadas en el modelo incluyen SSIS, que facilita la integración y transformación de los datos, y PowerBI, que permite la visualización y análisis interactivo de los datos. PowerBI transforma los datos en informes visuales y paneles dinámicos que ofrecen una visión clara de los patrones operativos y posibles fallas. Estas herramientas permiten procesar y analizar grandes volúmenes de datos, también facilitan la toma

de decisiones informadas al proporcionar análisis en tiempo real y la posibilidad de detectar anomalías antes de que se conviertan en problemas graves.

Los datos analizados provienen principalmente de los dispositivos de monitoreo instalados en los transformadores, que miden variables operativas críticas como la temperatura del aceite, los niveles de humedad y la presencia de hidrógeno. Estos parámetros afectan directamente el rendimiento y la longevidad de los equipos. Al analizar estos datos, el modelo puede identificar asociaciones y correlaciones entre diferentes variables. Por ejemplo, un aumento de 10°C en la temperatura del aceite puede reducir la vida útil del transformador en un 50%. La presencia de hidrógeno en niveles superiores a 150 ppm puede indicar una descomposición del aceite o del papel aislante, lo que ayuda a predecir posibles fallas y a optimizar los mantenimientos (Arias Velásquez et al., 2019; Mata et al., 2023).

### **6.3. Objetivo Especifico 3:**

“Proponer un componente para la visualización de información que permita presentar las asociaciones encontradas y comportamientos tempranos del transformador de potencia.”

Resultado: Se propuso un componente para la visualización de información que ha demostrado ser una herramienta eficaz para representar de manera clara y comprensible las asociaciones encontradas y los comportamientos tempranos de los equipos en un ecosistema loE. Este componente combina gráficos interactivos y paneles de control dinámicos, permitiendo a los usuarios explorar y visualizar patrones y relaciones entre las variables monitoreadas. La interoperabilidad de estos gráficos interactivos facilita la integración de datos de múltiples fuentes, proporcionando una visión integral y detallada del estado de los activos. Esta claridad en la visualización mejora la capacidad de los usuarios para tomar

decisiones informadas y estratégicas, optimizando así la gestión de los sistemas de distribución eléctrica.

La capacidad de representar asociaciones significativas, como las correlaciones entre temperatura, hidrógeno y humedad, facilita una comprensión de las condiciones que podrían indicar problemas inminentes. Esto mejora la capacidad de tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento y la gestión de los activos.

Además, la visualización de los comportamientos tempranos de los equipos, como las desviaciones en parámetros críticos, permite identificar señales de advertencia antes de que se conviertan en fallos graves. Esta representación gráfica ayuda a los operadores y gestores de mantenimiento a detectar anomalías y tendencias emergentes con mayor rapidez, optimizando así la planificación de intervenciones preventivas y reduciendo el riesgo de interrupciones inesperadas en el servicio eléctrico.

El componente permite observar en tiempo real la correlación entre niveles de hidrógeno, humedad y otros indicadores clave, revelando patrones y relaciones críticas que podrían anticipar problemas en el transformador. Un aumento en los niveles de hidrógeno suele ser motivo de alarma y requiere una inspección inmediata, ya que puede indicar problemas graves como arcos eléctricos o descargas parciales. Por otro lado, niveles elevados de humedad son una señal clara de problemas y pueden exigir medidas correctivas urgentes, como el secado del aceite o la revisión de los sistemas de ventilación y sellado del transformador.

En resumen, el componente de visualización mejora significativamente la capacidad de respuesta y la eficiencia operativa, al ofrecer una visión integral y accesible de la salud y el rendimiento de los activos.

#### **6.4. Conclusiones generales.**

El proyecto de IoE en los transformadores de potencia ha logrado avances significativos en la supervisión y gestión de datos para activos críticos. A partir de los objetivos específicos propuestos, se ha observado una mejora notable en el monitoreo de condiciones del transformador y la predicción de fallos.

Un evento o siniestro en un transformador de potencia en una zona urbana puede generar costos significativos para la empresa, abarcando desde la reparación o reemplazo del transformador, los cuales pueden variar entre 8% y el 25% del costo total del transformador de potencia; hasta daños a la infraestructura y pérdidas económicas por la interrupción del servicio, que pueden alcanzar hasta el 100% del costo del equipo. Además, se deben considerar los costos de emergencia y limpieza, el impacto en la salud y seguridad, los costos de seguro, la investigación y prevención, así como el impacto ambiental. En total, los costos de un siniestro de este tipo pueden oscilar entre 10% y 100% y asumir unos costos operaciones que estar cercanos al 50% del costo del activo, dependiendo de la magnitud del incidente y las medidas correctivas implementadas (Aponte et al., 2020; Pérez Hernández, 2012).

Las cifras estimadas reflejan la importancia de realizar un análisis de riesgos detallado y contar con un plan de contingencia adecuado para mitigar los posibles impactos financieros y operativos para la operación de los activos. Estos rangos son aproximados y pueden variar según la situación específica y la ubicación. Para obtener una estimación más precisa, es recomendable realizar un análisis de riesgos detallado y consultar con expertos en la materia. Realizar un mantenimiento regular y monitoreo continuo de los transformadores de potencia mejora la eficiencia y precisión de los datos procesados al detectar problemas tempranamente y optimizar el funcionamiento del equipo. Esto permite una toma de decisiones informada y proactiva ante eventos adversos, reduciendo el riesgo de fallos,

minimizando costos y asegurando una confiabilidad y seguridad en la operación del sistema eléctrico.

### **6.5. Trabajos futuros.**

Ampliar el alcance del modelo tecnológico: El modelo tecnológico desarrollado se enfocó en los transformadores. Se puede considerar la posibilidad de expandir el alcance del modelo para incluir otros niveles de voltaje o activos en la red eléctrica. Profundizar en los temas de comunicación, interoperabilidad y ciberseguridad de los datos en la gestión de activos críticos. Estos trabajos permiten desarrollar y evaluar tecnologías avanzadas de comunicación que aseguren una transmisión de datos eficiente y segura entre dispositivos IoT. Además, es crucial explorar soluciones de interoperabilidad que permitan la integración fluida de sistemas heterogéneos, garantizando que los datos recopilados de diversas fuentes puedan ser analizados de manera coherente y efectiva. Finalmente, la ciberseguridad debe ser una prioridad, implementando medidas robustas para proteger los datos sensibles contra amenazas y vulnerabilidades, asegurando así la integridad y confiabilidad de los sistemas de distribución eléctrica. Este enfoque garantiza una gestión segura y resiliente de los activos críticos.

Implementar técnicas de análisis predictivo avanzado e inteligencia artificial: Además de detectar posibles fallas tempranamente, se puede investigar la aplicación de técnicas de análisis predictivo y prescriptivo para anticipar y prevenir fallas en los transformadores de potencia. Esto podría incluir el uso de técnicas de aprendizaje automático y análisis de series temporales para identificar patrones y tendencias que indiquen posibles problemas futuros.

Explorar la integración con sistemas de gestión de activos: Para una gestión más completa y eficiente de los activos en los transformadores de potencia, se puede investigar la integración del modelo tecnológico desarrollado con el sistema de gestión de activos. Esto permitiría una mayor trazabilidad y seguimiento de las

acciones de mantenimiento, así como una optimización de los recursos y la programación de las actividades de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.

Evaluar el impacto de la automatización en la eficiencia y la confiabilidad: Es importante realizar un seguimiento y una evaluación del impacto de la automatización del monitoreo en línea de los transformadores de potencia su eficiencia y la confiabilidad de las operaciones eléctricas. Se pueden realizar estudios comparativos para analizar los beneficios obtenidos, como la reducción de tiempos de respuesta, la disminución de interrupciones o la mejora en la calidad del servicio eléctrico.

Estas recomendaciones e investigaciones futuras podrían ayudar a fortalecer y mejorar la implementación de la metodología, monitoreo en tiempo real y la gestión del desempeño de los activos en su ciclo de vida, así como a impulsar la eficiencia y la confiabilidad de las operaciones eléctricas.

# Referencias

- ABB. (2018). *Technical Especifications-CoreSense™ Hydrogen and Moisture Sensor*. 122.
- AENOR. (2015). *Asset management. Management systems. Requirements*. 29–49.
- Al-Turjman, F., & Abujubbeh, M. (2019). IoT-enabled smart grid via SM: An overview. *Future Generation Computer Systems*, 96, 579–590. <https://doi.org/10.1016/J.FUTURE.2019.02.012>
- Andersen, O., Thomsen, C., & Torp, K. (2018). SimpleETL: ETL processing by simple specifications. *CEUR Workshop Proceedings*, 2062.
- Aponte, G., Cadavid, H., Cerón, A. F., Zuñiga, A. F., Tariacuri, J. A., Restrepo, L. H., Calderón, L. C., Cortes, E., Gaona, M., Serna, A. C., & Mena, J. F. (2020). *Herramienta De Software Para Estimar El Índice De Salud En Transformadores De Potencia*. 18(10), 1–21.
- Arias Velásquez, R. M., Mejía Lara, J. V., & Melgar, A. (2019). Converting data into knowledge for preventing failures in power transformers. *Engineering Failure Analysis*, 101(March), 215–229. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.027>
- Baigent, Drew and Adamiak, Mark and Mackiewicz, Ralph and Sisco, G. (2004). IEC 61850 communication networks and systems in substations: An overview for users. *SISCO Systems*, 61850(2).
- Bandhu Nath, P., & Uddin, M. (2015). TCP-IP Model in Data Communication and Networking. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 4(10), 102–107. [www.ajer.org](http://www.ajer.org)
- Bartoletti, C., Desiderio, M., Di Carlo, D., Fazio, G., Muzi, F., Sacerdoti, G., & Salvatori, F. (2004). Vibro-Acoustic Techniques to Diagnose Power Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1), 221–229. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.820177>
- Bhat, O., Gokhale, P., & Bhat, S. (2018). Introduction to IOT. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology ISO*, 3297(1). <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2018.517>

- Blarke, M. B., & Jenkins, B. M. (2013). SuperGrid or SmartGrid: Competing strategies for large-scale integration of intermittent renewables? *Energy Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.039>
- Bordeleau, F., Mosconi, E., & Santa-eulalia, L. A. De. (2018). *Business Intelligence in Industry 4.0: State of the art and research opportunities*. 9, 3944–3953.
- Brown, M., Woodhouse, S., & Sioshansi, F. (2019). Digitalization of energy. *Consumer, Prosumer, Prosumer: How Service Innovations Will Disrupt the Utility Business Model*, 3–25.
- Capasso, C., Veneri, O., Motori, I., & Assante, D. (2018). A novel platform for the experimental training on Internet of Energy. *2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 1746–1752. <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2018.8363445>
- Carmelo, J., Carrión, R., David, E., & Villanueva, A. (2019). *Modelamiento de los arrollamientos para determinación de las tensiones transitorias transferidas en un transformador de potencia Modeling of the windings for determining the transient voltages transferred in a power transformer*. 29, 48–58.
- Carreño Perez, J. C., & Espinel Ortega, A. (2020). Identificación de activos y ciber activos críticos en sistemas de transmisión de energía eléctrica. *Tecnura*, 24(65), 27–38. <https://doi.org/10.14483/22487638.15388>
- Cerón, A. F., Orduña, I. F., Aponte, G., & Romero, A. A. (2015). Panorama de la Gestión de Activos para Transformadores de Potencia. *Información Tecnológica*, 26(3), 99–110. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000300014>
- Chec, S. E., & Del, D. (2022). *GUÍA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS DE CRITICIDAD EN ACTIVOS FÍSICOS PRODUCTIVOS*. 1, 1–20. [https://sgichec.almeraim.com/sgi/secciones/index.php?a=documentos&option=ver&actual&documentoid=91350&proceso\\_asociar\\_id=39875](https://sgichec.almeraim.com/sgi/secciones/index.php?a=documentos&option=ver&actual&documentoid=91350&proceso_asociar_id=39875)
- Chen, M., Mao, S., Zhang, Y., & Leung, V. C. M. (2014). Big data applications. In *SpringerBriefs in Computer Science* (Issue 9783319062440, pp. 59–79). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-06245-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06245-7_6)
- Clark, D. D. (1995). Design philosophy of the DARPA internet protocols. *Computer Communication Review*, 25(1), 102–111. <https://doi.org/10.1145/205447.205458>

Comisión de Regulación de Energía y Gas, C. (2018). Resolución CREG 015 de 2018. In *Resolución 015 de 2018* (p. 239). <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac?OpenDocument>

Córdoba Cely, C., Arteaga Romero, J., & Bonilla Mora, H. (2015). FUNDAMENTOS DEL PENSAMIENTO DE DISEÑO. *Cesmag*, VI(2), 38–50. <https://doi.org/10.15658/cesmag15.05060204>

Corotinschi, G., & Găitan, V. G. (2018). Enabling IoT connectivity for Modbus networks by using IoT edge gateways. *2018 14th International Conference on Development and Application Systems, DAS 2018 - Proceedings, October 2017*, 175–179. <https://doi.org/10.1109/DAAS.2018.8396092>

Corredor, P. H. (2010). *Visión de las Redes Inteligentes en Colombia*. [http://www.xm.com.co/boletinxm/publishingimages/boletin256/presentacionpa\\_blocorredorensmartgrids.pdf](http://www.xm.com.co/boletinxm/publishingimages/boletin256/presentacionpa_blocorredorensmartgrids.pdf)

Daki, H., El Hannani, A., Aqqal, A., Haidine, A., & Dahbi, A. (2017). Big Data management in smart grid: concepts, requirements and implementation. *Journal of Big Data*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-017-0070-y>

DAMA International. (2022). *DAMA-DMBOK*.

Darwish, I., & Saadawi, T. (2018). Attack detection and mitigation techniques in industrial control system-smart grid DNP3. *Proceedings - 2018 1st International Conference on Data Intelligence and Security, ICDIS 2018, June*, 131–134. <https://doi.org/10.1109/ICDIS.2018.00028>

Deloitte Insights. (2018). The Fourth Industrial Revolution is here—are you ready? In *Deloitte Insights*. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2015.10.029>

Díaz Andrade, C., Andrés, C., & Carlos, J. (2011). *Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica*. 9, 53–81. [www.icesi.edu.co/sistemas\\_telematica](http://www.icesi.edu.co/sistemas_telematica)

Dileep, G. (2020). A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, 146, 2589–2625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>

East, S., Butts, J., Papa, M., & Sheno, S. (2009). A taxonomy of attacks on the DNP3 protocol. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 311, 67–81. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-04798-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04798-5_5)

EIMAC. (2024). *Normas: Compendio enlaces de normativas internacionales de mantenimiento y gestión de activos*. <https://eimac.cyvingeneria.com/normas.php>

Ferrari, A., & Russo, M. (2016). *Introducing Microsoft Power BI*. Microsoft Press.

Foster, P., & Tom, F. (2013). *Data science and its relationship to big data and data-driven decision making*. <https://doi.org/10.1089/big.2013.1508>

Gartner Inc. (2017). *Gartner Says 8.4 Billion Connected “Things” Will Be in Use in 2017, Up 31 Percent From 2016*. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2017-02-07-gartner-says-8-billion-connected-things-will-be-in-use-in-2017-up-31-percent-from-2016>

Gartner Inc. (2018). *IoT Implementation and Management — From the Edge to the Cloud: A Gartner Trend Insight Report*. <https://www.gartner.com/doc/3873158?srclid=1-3132930191>

Giral-Ramírez, W. M., Celedón-Flórez, H. J., Galvis-Restrepo, E., & Zona-Ortiz, A. T. (2017). Smart grids in the colombian electric system: Current situation and potential opportunities. *Tecnura*, 21(53), 119–137.

Gómez, V. G. A., & Suárez, S. M. F. (2017). Improvement Strategies for Quality Service Indexes in ENEL Colombia-The planning. *Simposio Internacional Sobre La Calidad de La Energía Eléctrica-SICEL*, 9, 1–6.

Hasan, W. K. A., Alraddad, A., Ashour, A., Ran, Y., Alkelsh, M. A., & Ajele, R. A. M. (2019). Design and implementation smart transformer based on IoT. *Proceedings - 2019 International Conference on Computing, Electronics and Communications Engineering, ICCECE 2019, August*, 16–21. <https://doi.org/10.1109/iCCECE46942.2019.8941980>

Hidalgo, D. B., & Perez, Y. M. (2017). Eficiencia energética, competitividad empresarial y economía verde. *Revista Publicando*, 3(9), 447–466.

Hitachi ABB. (2019). *CoreSense Multi-gas monitoring system*.

Huang, C., Hu, K., & Huang, Y. (2018). An Intelligent Real-Time Renewables-Based Power Scheduling System for the Internet of Energy. *2018 IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)*, 860–864. <https://doi.org/10.1109/ICIVC.2018.8492903>

Iberdrola. (2024). *Internet de la energía*. <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/smart-grids/internet-energia>

IDEAM. (2024). *Informe sobre efectos del cambio climático y topología de los territorios*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/publicacion-vie-18102024-1200>

International Energy Agency. (2015). *Technology Roadmap: Smart Grids*.

International Energy Agency. (2017). *Market Report: Energy Efficiency 2017*. <https://doi.org/10.1787/9789264284234-en>

International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55001:2014. Asset management — Management systems — Requirements*. 2014. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f4b6bcb7-d1d7-4f43-b259->

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 55000:2014 Asset management — Overview, principles and terminology*. 2018, 60.

*IoT Analytics - ThingSpeak Internet of Things*. (2022). <https://thingspeak.com/>

Jaradat, M., Jarrah, M., Bouselham, A., Jararweh, Y., & Al-Ayyoub, M. (2015). The internet of energy: Smart sensor networks and big data management for smart grid. *Procedia Computer Science*. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.250>

Khan, F., Siddiqui, M. A. B., Rehman, A. U., Khan, J., Asad, M. T. S. A., & Asad, A. (2020). IoT Based Power Monitoring System for Smart Grid Applications. *2020 International Conference on Engineering and Emerging Technologies, ICEET 2020, February*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICEET48479.2020.9048229>

Kock, V., Kuge, S., Geissbauer, R., & Schrauf, S. (2014). Industry 4.0: Opportunities and Challenges of the Industrial Internet. *Pwc Strategy*. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.12.002>

Kuang, Y. (2014). Communication between PLC and arduino based on modbus protocol. *Proceedings - 2014 4th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, IMCCC 2014, September 2014*, 370–373. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2014.83>

Kumar, S., Dalal, S., & Dixit, V. (2014). The OSI Model: Overview the Seven Layers of Computer Networks. *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*, 2, 461–466.

Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431–440.

León Paime, F. (2019). Desafíos contemporáneos en el desarrollo del sector eléctrico colombiano. *En-Contexto Revista de Investigación En Administración, Contabilidad, Economía y Sociedad*, 7(11), 26. <http://www.unilibre.edu.co/bogota/pdfs/2017/5sim/27D.pdf>

Liu, L., & Chen, S. (2018). The Application of Artificial Intelligence Technology in Energy Internet. *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582096>

Loic Lefebvre. (2022). *PyModbusTCP*. <https://pypi.org/project/pyModbusTCP/>

Marksteiner, S., Jimenez, V. J. E., Valiant, H., & Zeiner, H. (2017). An overview of wireless IoT protocol security in the smart home domain. *Joint 13th CTTE and 10th CMI Conference on Internet of Things - Business Models, Users, and Networks, 2018-Janua*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/CTTE.2017.8260940>

Martinez-Plumed, F., Contreras-Ochando, L., Ferri, C., Hernandez-Orallo, J., Kull, M., Lachiche, N., Ramirez-Quintana, M. J., & Flach, P. (2021). CRISP-DM Twenty Years Later: From Data Mining Processes to Data Science Trajectories. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 33(8), 3048–3061. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2962680>

Mata, Ó. N., Gómez-Ramírez, G. A., & Acuña Rojas, F. (2023). *Metodología para Evaluar la Condición de Transformadores Eléctricos de Potencia Basada en un Índice de Salud*. <https://doi.org/10.15517/ri.v33i1.50613>

Microsoft. (2023). *Tutorial de Integration Services*. <https://learn.microsoft.com/es-es/sql/integration-services/integration-services-tutorials?view=sql-server-ver16>

Minenergía. (2024). RETIE - Resolución 40117 de 2024. In *Ministerio de Minas y Energía*. [https://www.minenergia.gov.co/documents/11563/Resolución\\_40117\\_de\\_2024.pdf%0Ahttps://normativame.minenergia.gov.co/normatividad/6901/norma/](https://www.minenergia.gov.co/documents/11563/Resolución_40117_de_2024.pdf%0Ahttps://normativame.minenergia.gov.co/normatividad/6901/norma/)

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia.

(2019). CONPES 3975 - Política Nacional Para La Transformación Digital e Inteligencia Artificial. *Consejo Nacional de Política Económica y Social - República de Colombia*, 115. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3975.pdf>

Modbus-IDA. (2006). *Modbus Messaging on Tcp / Ip Implementation Guide*. 1–46.

Pais, J. E. de A. e. (2019). *ISO 55001 - Diagnosis of the Organization's State*. May 2019. <http://hdl.handle.net/10400.26/36473>

Pawar, P., & Vittal K, P. (2019). Design and development of advanced smart energy management system integrated with IoT framework in smart grid environment. *Journal of Energy Storage*, 25(June), 100846. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100846>

Perera, C., Zaslavsky, A., Christen, P., & Georgakopoulos, D. (2014). Sensing as a service model for smart cities supported by internet of things. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 25(1), 81–93.

Pérez Hernández, R. (2012). Análisis de falla en un transformador de potencia. *Ingeniería Energética*, 33(1), 59–68.

Pincay-Ponce, J. I., Angulo-Murillo, N. G., Herrera-Tapia, J. S., & Delgado-Muentes, W. R. (2020). Técnicas de minería de datos como soporte para la gestión de un sistema de comercialización de energía eléctrica. *Mikarimin. Revista Científica Multidisciplinaria*. e-ISSN 2528-7842, 6(2), 19–34.

Power, B. I., Excel, U., Desktop, P. B., & Tiles, P. (2021). Microsoft power bi. Available Here: <https://Powerbi.Microsoft.Com/En-Us>, 130.

Prasojo, R. A., & Suwarno. (2018). Power transformer paper insulation assessment based on oil measurement data using SVM-classifier. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 10(4), 661–673. <https://doi.org/10.15676/ijeei.2018.10.4.4>

Priyo Das, B., & Carlos Leicht PGTR, J. (2019). *Digital Power Transformers-An Intelligent Approach to Smart Asset Management*. March, 1–8.

Provost, F., & Fawcett, T. (2013). c. *Big Data*, 1(1), 51–59.

PushingBox. (2022). *PushingBox - Notifications for your Internet of Things devices*.

<https://www.pushingbox.com>

Runtuwene, J. P. A., Tangkawarow, I. R. H. T., Manoppo, C. T. M., & Salaki, R. J. (2018). A Comparative Analysis of Extract, Transformation and Loading (ETL) Process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 306(1), 0–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/306/1/012066>

Salamanca Jaimes, J. E., Velazco Ochoa, J. A., & Acevedo Camacho, E. A. (2016). *ANÁLISIS DE CRITICIDAD Y ÁRBOLES DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA*.

Schmutzler, J., Andersen, C. A., & Wietfeld, C. (2013). Evaluation of OCPP and IEC 61850 for smart charging electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 6(4), 863–874. <https://doi.org/10.3390/wevj6040863>

Schröer, C., Kruse, F., Marx, J., Kruse, F., & Marx, J. (2021). A Systematic Literature Review on Applying Process Model on Applying CRISP-DM Process Model. *Procedia Computer Science*, 181(2019), 526–534. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.199>

Schuelke-Leech, B. A., Barry, B., Muratori, M., & Yurkovich, B. J. (2015). Big Data issues and opportunities for electric utilities. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.128>

Shadare, A. E., Musa, S. M., & Akujuobi, C. (2016). *Data visualization*. December.

Soni, D., & Makwana, A. (2017). A survey on mqtt: a protocol of internet of things(IoT). *International Conference on Telecommunication, Power Analysis and Computing Techniques (Ictpact - 2017)*, April, 0–5. [https://www.researchgate.net/publication/316018571\\_A\\_SURVEY\\_ON\\_MQTT\\_A\\_PROTOCOL\\_OF\\_INTERNET\\_OF\\_THINGS\\_IOT](https://www.researchgate.net/publication/316018571_A_SURVEY_ON_MQTT_A_PROTOCOL_OF_INTERNET_OF_THINGS_IOT)

UPME. (2016). *Parte I Antecedentes y Marco Conceptual del Análisis, Evaluación y Recomendaciones para la Implementación de Redes Inteligentes en Colombia*. [http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/Smart Grids Colombia Visión 2030/1\\_Parte1\\_Proyecto\\_BID\\_Smart\\_Grids.pdf](http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/Smart%20Grids%20Colombia%20Visión%202030/1_Parte1_Proyecto_BID_Smart_Grids.pdf)

Ustun, T. S. (2021). A critical review of iec 61850 testing tools. *Sustainability (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/su13116213>

Wang, Y., Chen, Q., Hong, T., & Kang, C. (2018). Review of Smart Meter Data Analytics: Applications, Methodologies, and Challenges. *IEEE Transactions on*

*Smart Grid*. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2818167>

- Wu, H., Zhou, Y., Yang, C., Zhu, H., Hao, D., & Ren, S. (2020). A Method of Prediction for Transformer Malfunction Based on Oil Chromatography. *Proceedings - 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering, CACRE 2020*, 1, 444–447. <https://doi.org/10.1109/CACRE50138.2020.9230296>
- Wu, Y., Wu, Y., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2021). Digitalization and decentralization driving transactive energy Internet: Key technologies and infrastructures. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 126, 106593.
- Yaman, O., & Bicen, Y. (2019). An Internet of Things (IoT) based Monitoring System for Oil-immersed Transformers. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(3), 226–234. <https://doi.org/10.17694/bajece.524921>
- Yosuf, B., Musa, M., Elgorashi, T., Lawey, A. Q., & Elmirghani, J. M. H. (2018). *Energy Efficient Service Distribution in Internet of Things*. <http://arxiv.org/abs/1808.06120>
- Yu, Z. J., Haghghat, F., & Fung, B. C. M. (2016). Advances and challenges in building engineering and data mining applications for energy-efficient communities. *Sustainable Cities and Society*, 25, 33–38.
- Zeynal, H., Eidiani, M., & Yazdanpanah Khorasan, D. (2014). *Intelligent Substation Automation Systems for Robust Operation of Smart Grids*. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2014.6873893>
- Zhou, K., Fu, C., & Yang, S. (2016). Big data driven smart energy management: From big data to big insights. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 56). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.050>
- Zhou, K., & Yang, S. (2015). A framework of service-oriented operation model of China's power system. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.041>
- ZIMMERMAN, H. (1980). Open Systems Interconnection. *IEEE Transactions on Communications*, 3(1), 15–26. <https://doi.org/10.1108/eb047578>

