Revista Tecnocientífica URU
Universidad Rafael Urdaneta
No. 27 Julio - Diciembre 2024
ISSN: 2343-6360
CC BY-SA 4.0

Implementación de sistema prototipo IIoT para la detección de fallas en líneas de transmisión de 138 kv

Implementation of IIoT prototype system for fault detection in 138 kv transmission lines

Rafael D. Rubio-Romero
Universidad Rafael Urdaneta. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Maracaibo, Venezuela.
https://orcid.org/0009-0003-8794-8899 | Correo electrónico: rafaeldariorr@gmail.com
Recibido:13-09-2024 Admitido:30-09-2024 Aprobado:25-10-2024

Resumen
La investigación propone un sistema basado en la tecnología emergente IIoT para la detección de fallas y monitoreo de líneas de transmisión de 138 kV, permitiendo una localización más exacta de las anormalidades que sucedan, mediante el método de la medición fasorial. Sustentada en planteamientos de Kong et al., Bricchi et al., Kadechkar et al., siguiendo de forma generalizada los lineamientos de la normativa IEEE std. C37.118.1-2011, se investigaron los distintos tipos de fallas que pueden presentarse en la línea de transmisión de 138 kV escogiendo los casos más frecuentes. Posteriormente se diseñó un modelo de red IIoT compuesto de unidades de medición fasorial dispuestas sobre las torres de la línea de transmisión, implementando un prototipo físico de uno de ellos a un generador de señales que permite evaluar las condiciones de falla extraídas de redes reales modeladas en una herramienta de simulación para sistemas de potencia. A través de un sistema centralizado de recolección de datos simulado en MATLAB, evaluando las respuestas del prototipo, se obtuvieron resultados favorables utilizando variaciones de los esquemas de protección 21 y 87L y la lógica difusa, así como la interacción satisfactoria entre Cliente-Servidor para la transmisión de datos ante una falla localizada
Palabras clave: Medición sincrofasorial, Conexión en "T", Torres de transmisión, Prototipo IIoT

Abstract
The research proposes a system based on the emerging IIoT technology for fault detection and monitoring of 138 kV transmission lines, allowing a more accurate location of the abnormalities that occur through the phasor measurement method. Supported by approaches of Kong et al., Bricchi et al., Kadechkar et al., following in a generalized way the guidelines of IEEE std. C37.118.1-2011, the different types of faults that can occur in the 138 kV transmission line were investigated by choosing the most frequent cases. Subsequently, a IIoT network model composed of phasor measurement units arranged on the transmission line towers is designed, implementing a physical prototype of one of them to a signal generator that allows evaluating fault conditions extracted from real networks modeled in a simulation tool for power systems. Through a centralized data collection system simulated in MATLAB, evaluating the responses of the prototype, favorable results were obtained using variations of protection schemes 21 and 87L and fuzzy logic, as well as the successful interaction between Client-Server for data transmission in the event of a localized fault.
Keywords: *Synchrophasor measurement, "T" connection, Transmission towers, IIoT prototype.*

Introducción

La energía eléctrica es el principal recurso para la industria, el desarrollo y la sociedad de todo país, la cual es obtenida convencionalmente por la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural, entre otros), fisión nuclear y el movimiento de masas de agua, y de forma alternativa, por la luz solar, el movimiento de viento u olas del mar, bio combustibles, entre otros recursos menos utilizados; transformando mediante procesos determinados la energía calórica, potencial o química, de estos recursos a energía eléctrica. En tal sentido, para el logro de esta transformación a gran escala se requiere generarla en lugares donde sea de fácil

acceso y más económica la obtención de la materia prima, que suelen estar ubicadas generalmente en lugares muy alejados de los sitios de consumo. Como consecuencia, surge el problema de transportar económicamente grandes cantidades de energía eléctrica a largas distancias [1].

Para la rentabilidad de la transmisión de energía eléctrica, es necesario utilizar alta tensión, lo cual implica mayores necesidades de aislamiento y, por lo cual, es ampliamente extendido el uso de la disposición aérea. Como lo menciona Barrero [2], para trasladar mayor potencia con menor nivel de corriente, se requiere mayor tensión, consiguiendo esto al emplear conductores desnudos aéreos separados entre sí y del suelo, mediante una distancia determinada por el nivel de tensión.

Con respecto al sistema de transmisión, Gönen [3], lo señala como un sistema en alto voltaje, el cual transporta una gran cantidad de potencia a un centro de carga o usuarios industriales con requerimientos más allá de los sistemas de distribución a media tensión; la mayoría de ellos son trifásicos en corriente alterna, así como existe el auge de implementar la nueva tecnología HVDC que emplea la corriente directa. Estos sistemas, están compuestos de todo terreno, estructura y equipo desde la fuente de alimentación, incluyendo líneas, transformadores de potencia, interruptores, dispositivos de control de potencia reactiva, subestaciones eléctricas entre la generación y la carga, como también cualquier equipo cuya función principal sea incrementar, integrar o unir juntos diferentes sistemas de suministro de potencia; siendo el más importante de estos la línea de transmisión, encargada de proporcionar el camino por el que fluye la corriente eléctrica.

Las líneas de transmisión tienen gran relevancia en el sistema eléctrico y son ampliamente estudiadas. Al respecto, Widi [4] menciona algunos puntos importantes en su diseño como son: el voltaje de operación, la distancia que va a recorrer la línea, la cantidad de energía activa a transmitir, calibre y disposición física de sus conductores, entre otros factores los cuales definirán sus características equivalentes resistivas, inductivas y capacitivas; afectando en consecuencia su funcionamiento. Están clasificadas comúnmente por la distancia que recorren en líneas cortas, medias y largas, variando su voltaje entre 115kV hasta más de 800kV. Además, son susceptibles a fenómenos perjudiciales como las sobretensiones atmosféricas, sobretensiones de maniobra, efecto corona en los aisladores, ondas viajeras, entre otras anormalidades, aunque sus efectos pueden aminorarse o preverse al realizar un buen diseño de la línea con los sistemas de seguridad, plan de mantenimiento preventivo y monitoreo convenientes

Grainger y Stevenson [5] explican eventualidades que perjudican el flujo de potencia al modificar las conexiones físicas de la línea, cambiando enormemente la magnitud como la fase del voltaje y corriente en ella, siendo estas principalmente las fallas monofásicas, línea-línea, línea a tierra, línea-línea a tierra, trifásicas y circuito abierto. Estas eventualidades ocurren cuando un conductor u objeto conecta entre sí, a tierra o rompe indebidamente uno o varios conductores de la línea, como por ejemplo: el fallo de un aislador, el contacto de un conductor con la rama de un árbol, o el impacto con un vehículo aéreo; originando un flujo de corriente indeseado que deriva en la actuación del sistema de protección para aislar la falla y la salida de servicio de la línea de transmisión, momentáneo, temporal, prolongado o de manera permanente que amerite la intervención de una cuadrilla para solventar la anormalidad

En la actualidad, los métodos más usados para la detección y localización de fallas en sistemas trifásicos, mencionados por Goh et al. [6] son el método de ondas viajeras, caracterizado por el estudio del tiempo relativo que toma a los equipos de medición observar la onda reflejada producida por la energización, el transitorio y la falla, en uno o dos extremos de la línea; y el método de impedancia base, caracterizado por la medición de los fasores de corriente y voltaje, estimando la localización de la falla mediante un simple cálculo conociendo la impedancia por unidad de distancia de la línea; sin embargo, aclara que este método presenta grandes errores en algunos tipos de fallas, cuando se tienen líneas recalentadas o usa compensación reactiva en serie, requiriéndose algoritmos computacionales y estadísticos avanzados para aminorar esta inexactitud.

Al respecto, Chen, Huang y He [7] aclaran que con mayor información recopilada en distintos puntos de la red los investigadores serían capaces de desarrollar métodos más inteligentes de diagnóstico de fallas en un sistema que en los últimos años se ha visto una tendencia en la investigación en redes de sensores autónomos que recopilan información de voltajes y corrientes, conteniendo estas mediciones todo lo necesario para caracterizar la falla, no obstante es extremadamente difícil delimitar una serie de criterios para extraer la información importante de la señal en función al tiempo, por ello se han desarrollado técnicas para procesar

dichas señales y extraer la información importante disminuyendo la variación de los métodos de localización en el estudio de distintos sistemas.

Particularmente, Jian, Peng, Xuang, Lai y Lai [8] señalan que, la tecnología tradicional para la detección de fallas, su localización y selección de la o las fases están bien desarrolladas y otorgan una buena aproximación; mientras que, las localizaciones exactas de las causas externas siguen sin tener una metodología detallada, ocasionando que los despachadores y personal de mantenimiento no logren una rápida actuación, requiriendo cuadrillas de inspección para patrullar en el sitio y localizar con exactitud de la falla, lo cual es una tarea ardua e intensiva que depende enormemente de la experiencia y juicio subjetivo del personal.

Otro aspecto a resaltar es lo planteado por Vadivel [9], quien señala que durante las fallas en líneas de transmisión, el principal objetivo es restablecer el servicio de la línea lo más rápido posible para suplir a los consumidores afectados, y en segundo plano tratar de aminorar el efecto económico de reconstruir y restaurar la línea, el cual depende enormemente del tiempo que pase la línea fuera de servicio o en situación de contingencia debido al prolongado periodo donde no se transmite potencia, para lo cual es crucial el tiempo de respuesta, ya que en pocas horas, con planes de respuesta de emergencia es posible restaurar el servicio de la línea con instalaciones provisionales, permitiendo una mejor planeación para la reconstrucción del tramo afectado sin acarrear enormes pérdidas monetarias.

Algunos autores [10, 11], proponen el uso de una red IoT para mejorar la detección de fallas, la cual consiste de una serie de dispositivos acoplados a diversos equipos que monitorean características en ellos, conectados entre sí mediante una red inalámbrica con acceso a internet, permitiendo la comunicación y el envío de información sin la necesidad de la intervención humana. Estos dispositivos se colocan en lugares estratégicos a lo largo de la línea, supervisando valores fasoriales de corriente y de voltaje que permiten determinar de forma más precisa la localización, tipo y posibles causas de la falla, proporcionando localización GPS, así como también datos importantes a los despachadores y cuadrillas que tratarán de restablecer el servicio lo antes posible.

Por lo anteriormente documentado, esta investigación tiene como objetivo desarrollar un sistema prototipo a baja escala de monitoreo para líneas de alta tensión, basado en tecnología IIoT, que permita la detección y localización de fallas en redes de transmisión de 138 kV, ahondando en la detección de los distintos tipos de falla de la línea de transmisión mediante la medición de los fasores de voltaje y corriente, así como el registro de las condiciones previas del sistema y causantes de la falla.

Metodología

La presente investigación según su alcance corresponde a una explicativa, ya que busca describir y explicar el funcionamiento del prototipo a partir de los casos de estudio realizados. Además, con base en su objetivo general, es del tipo proyectista, dando como producto un sistema prototipo IIoT de monitoreo y localización de fallas en líneas de transmisión.

Se define el diseño de la investigación como documental y experimental, considerándola documental debido al requerimiento de analizar diversos libros, artículos y normativas, con el fin de sentar las bases en el diseño del prototipo y, a su vez, la caracterización de las fallas en líneas de transmisión. Como también, siendo de diseño experimental por las distintas pruebas que se realizaron para validar su correcto funcionamiento o destacar áreas susceptibles a mejora, lo que implicó la manipulación de variables.

Se manejaron las siguientes unidades de análisis: información teórica-práctica del comportamiento de la falla, detección de fallas en líneas de transmisión, normativas, aspectos técnicos de la tecnología IIoT, datos técnicos de las líneas de transmisión de 138 kV y, por último, datos técnicos de componentes eléctricos y electrónicos. Se utilizaron las siguientes técnicas e instrumentos de recolección de datos: la observación documental y entrevistas estructuradas realizadas a expertos, para recabar información útil en distintas áreas con el objetivo de lograr un mejor diseño del prototipo. Además de la observación directa de los casos de estudio simulados para la obtención de fasores de fallas típicas, para la posterior aplicación en las pruebas de la programación del prototipo y la red IIoT.

La investigación se condujo en cuatro fases: en la Fase I "Caracterización de las fallas en líneas de transmisión" se recopiló y analizó a profundidad información sobre las fallas más frecuentes en los sistemas

de transmisión. En la fase II "Diseño del prototipo IIoT" se consideraron referentes bibliográficos, normativas, aspectos técnicos y antecedentes relacionados a la temática para la creación de la propuesta. La fase III "Implementación del prototipo IIoT en el generador de señales" consistió en diseñar un generador de señales con control de ángulo y magnitud para inyectarle al prototipo escenarios de falla que pueda monitorear, realizando múltiples pruebas funcionales. Finalmente, en la fase IV "Evaluación del prototipo" se simularon los casos de estudio seleccionados para recopilar fasores de tensión y corriente, los cuales se inyectaron al prototipo para evaluar su funcionamiento general en una posible implementación.

Resultados

Caracterización de las fallas en líneas de transmisión

La clasificación de las fallas en las líneas de transmisión se realizó según lo sugerido por Al Mtawa, Haque y Halabri [12], tal como se observa en la Figura 1, dividiendo las mismas en transitorias y no transitorias. El primer tipo corresponde a una anormalidad de corta duración provocada mayormente por el contacto de árboles o animales con los conductores, el impacto de un rayo o por maniobras en el sistema de transmisión, siendo difíciles de localizar y registrar en el sistema de potencia. En contraste al tipo anterior, el segundo corresponde a las fallas no transitorias siendo esta permanente hasta que una cuadrilla de ingenieros la solvente, dividiéndose en circuito abierto cuando uno o varios conductores se rompen sin hacer contacto con otro objeto o tierra, y cortocircuito cuando hay un contacto anormal o una baja impedancia entre dos elementos con una diferencia de potencial debido a eventos impredecibles.

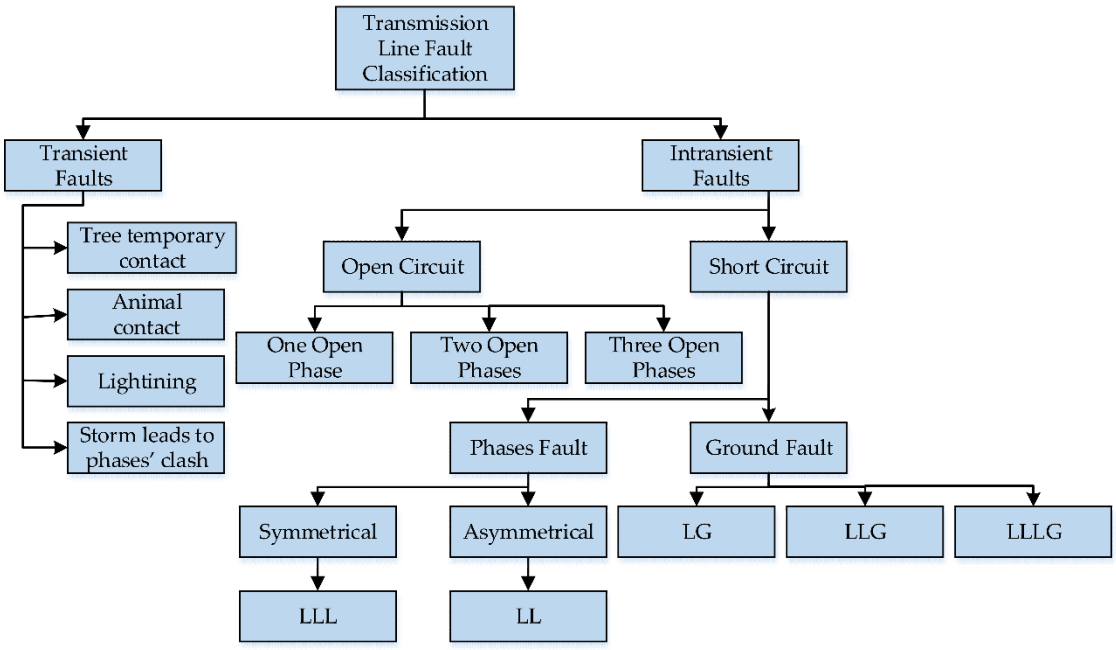

Figura 1. Clasificación de fallas en líneas de transmisión[12].

Debido al carácter prolongado de las fallas no transitorias y su posible impacto permanente en la operación de la red, la evaluación del prototipo IIoT se centró en detectar, clasificar y localizar estas eventualidades, en concreto las fallas de cortocircuito, ya que estas son las fallas más comunes, en especial la falla monofásica abarcando el 70% de la probabilidad de ocurrencia, seguido de las fallas bifásicas con 15%, según Gönen [13].

La tecnología IIoT y los métodos de diagnóstico de fallas

Con el fin de caracterizar las fallas en líneas de transmisión en la tecnología actual, primeramente, se debe seleccionar cuál de estas cumple los criterios de diseño para su aplicación en la tecnología IIoT. En este sentido Kong et al. [14] y Das y Vittal [15] concuerdan en que para conseguir la eficiencia en el análisis de la información en los dispositivos IIoT son necesarios métodos de caracterización y localización de fallas que

supongan una baja carga computacional, optando por una estrategia clásica aplicando la descomposición en componentes simétricos de mediciones fasoriales. Profundizando en lo expuesto por Ferreira et al. [16], el autor comenta sobre la necesidad de establecer sistemas de diagnóstico de fallas más sofisticados ocasionados por el aumento en la cantidad de información y complejidad de los sistemas de transmisión en años recientes. Con base en los aspectos anteriores, se planteó el sistema a partir de la normativa IEEE std. C37.118.1-2011 [17] estipulando estándares para la medición sincrofasorial en conjunto con variaciones de los esquemas de protección 21 y 87L.

Propuesta para el diseño del prototipo

A partir de las investigaciones de Kong et al., Bricchi et al., y Kadechkar et al. [14, 18, 19] y siguiendo los lineamientos de la IEC 30141-2018 [20] acerca de la arquitectura de sistemas IoT, se plantea el prototipo IIoT, como se muestra en la Figura 2,conformado de un grupo de unidades de medición fasorial (PMU) autónomos compuestos de microcontroladores, un transmisor y sensores de campo electromagnético capaces de inferir la tensión y corriente en la torre de la línea de transmisión donde estén dispuestos, cuya finalidad es detectar comportamientos anormales para informar a la unidad de concentración de fasores (PDC) mediante una señal inalámbrica.

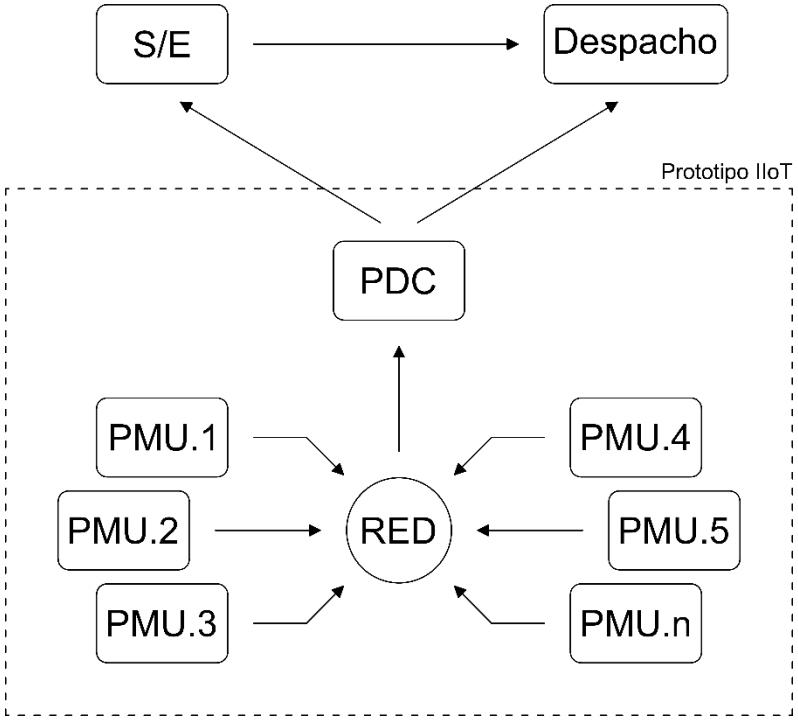

Figura 2. Esquema general del prototipo IIoT

Dicho PDC se encargará de controlar a los PMUs, recibir sus reportes, identificarlos, analizar la información recibida y en caso de ocurrir una eventualidad proporcionar a la subestación o al centro de despacho de carga datos relevantes acerca del tipo de falla y su localización para una actuación rápida. Este se encontrará en una de las subestaciones próximas a la línea o un lugar céntrico a esta.

El mayor beneficio de este planteamiento es la posibilidad de segmentar las líneas de transmisión en tramos más pequeños definidos por la ubicación de los PMU, permitiendo mediante variaciones de esquemas lógicos comúnmente vistos en la filosofía de los relés de protección para las funciones 67N, 87L y 21, determinar los tramos sanos de la línea y con las mediciones fasoriales más cercanos al tramo afectado aplicar algoritmos para la localización más precisa del suceso. Como también en líneas con conexiones en “T” despreciar el efecto infeed al disponer una serie de PMU en el punto de unión.

Diseño del PMU

El PMU es representado por un circuito de acondicionamiento de señal que lee la salida de sensores de campo electromagnético capaces de inferir el comportamiento de los fasores de tensión y corriente en el conductor donde esté dispuesto, estas señales son entregadas a los convertidores analógico digital del ADC para

su lectura y posterior procesamiento. El diseño del circuito se realizó con base en los ejemplos de aplicación de Green et al. [21]teniendo una vista general del mismo en la Figura 3.

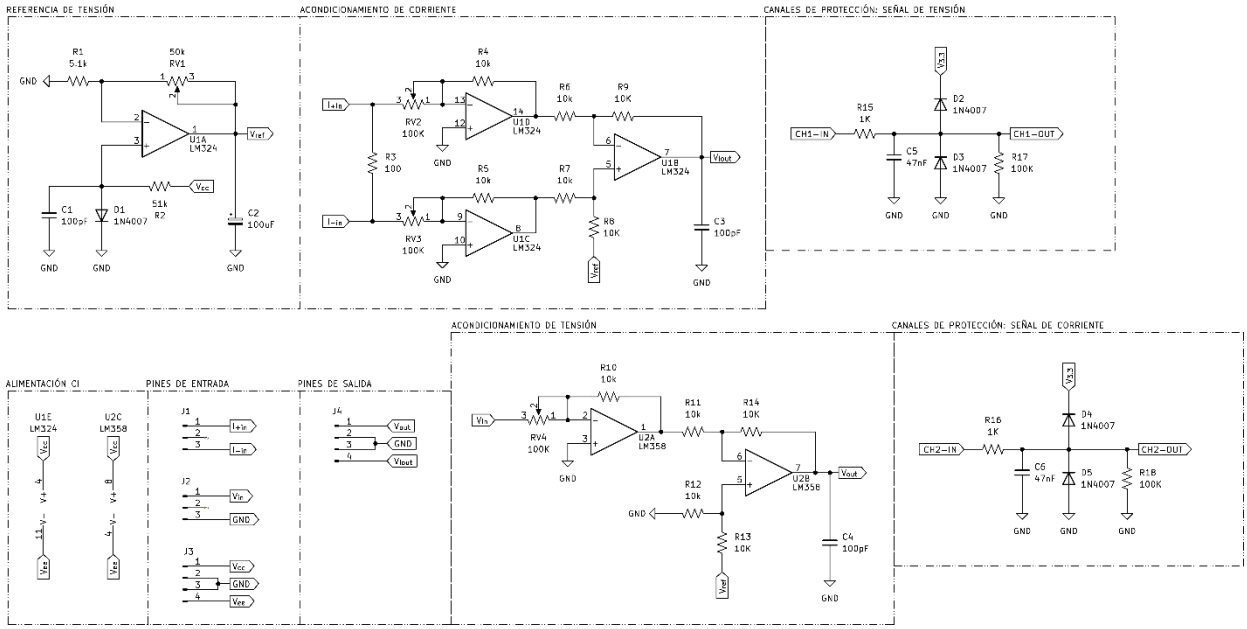

Figura 3. Circuito de acondicionamiento de señal

Posteriormente, se procedió con las pruebas locales, simulando el circuito en el software NI Multisim, dando los resultados esperados prosiguiendo con el montaje en un tablero de pruebas demostrando su funcionamiento en un entorno físico, como se muestra en a Figura 4; finalizando con la disposición del circuito en una placa fenólica perforada usando el software KiCad y soldando los componentes en físico para cada una de las fases, como se muestra una de ellas en la Figura 5.

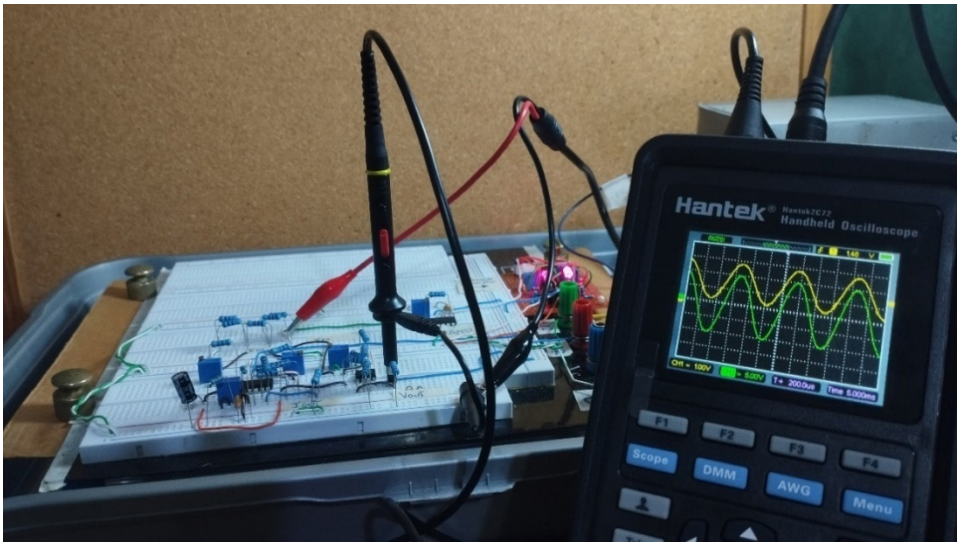

Figura 4. Circuito de acondicionamiento de señal: entrada vs salida

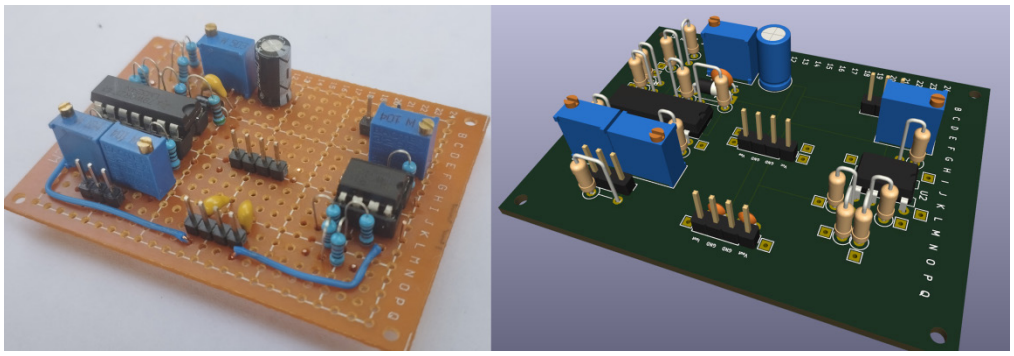

Figura 5. Circuito de acondicionamiento de señal: vista 3D y montaje físico.

Respecto al software, este se basó en lo estipulado por la IEEE std. C37.118.1-2011[17] sobre las mediciones sincrofasoriales, definiendo las características que tiene que registrar un PMU, siendo estas la magnitud, el ángulo, la variación de la frecuencia (COF) y la tasa de variación de la frecuencia (ROCOF), otorgando estos datos información importante acerca del estado de la red. Para el procesamiento de las señales, se usó el algoritmo recursivo de la transformada discreta de Fourier propuesto por Khanet al. [22], como se muestra en las ecuaciones 1, 2 y en la Figura 6.

$$X_{r(new)} = X_{r(previous)} - \frac{\sqrt{2}}{N}(x_{new} - x_{oldest}) * \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad \text{(Ec. 1)}$$

$$X_{i(new)} = X_{i(previous)} - \frac{\sqrt{2}}{N}(x_{new} - x_{oldest}) * \mathrm{sen}\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad \text{(Ec. 2)}$$

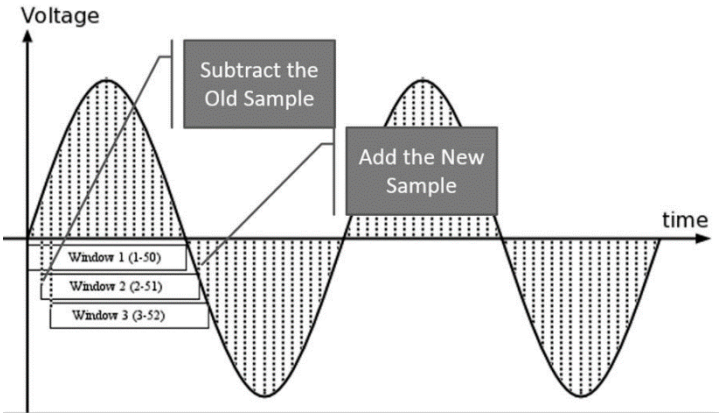

Figura 6. Circuito de acondicionamiento de señal: vista 3D y montaje físico[22].

El código fue realizado en el simulador web de microcontroladores Wokwi facilitando el desarrollo del algoritmo mostrado en la Figura 7, donde primero se leen las mediciones guardándolas en un buffer de datos para tener un registro del oscilograma de la eventualidad, luego se calcula el DFT de la nueva muestra, se escalan los fasores obtenidos a valores primarios y se crea un reporte a la espera de dos condiciones para su envío instantáneo, una sobrecorriente o una disminución en la tensión, si ninguna de estas condiciones se cumple el PMU envía el reporte al PDC dentro del intervalo especificado por la normativa.

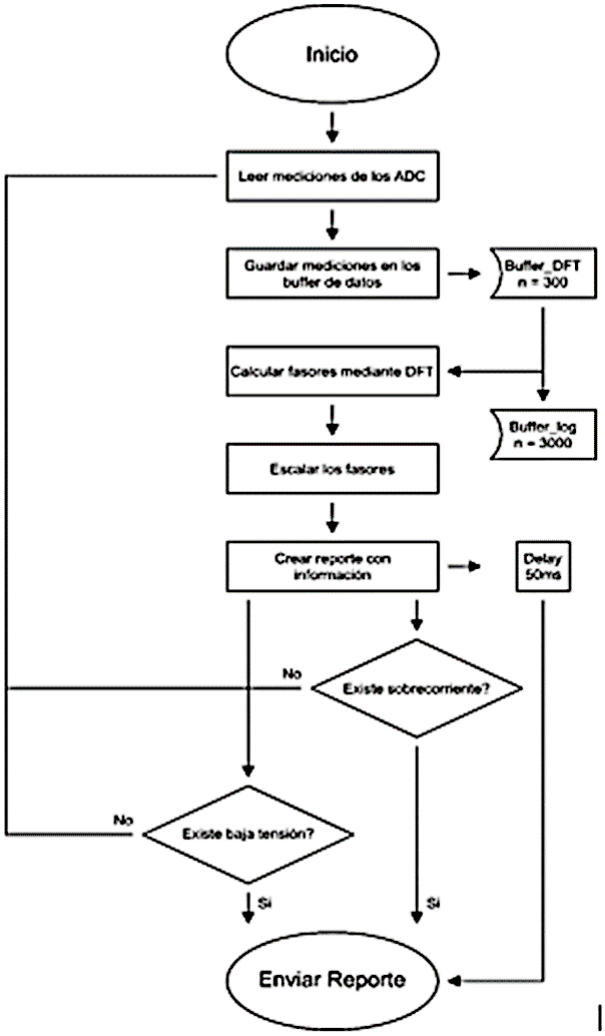

Figura 7. Algoritmo para el prototipo IIoT-PMU

Diseño del PDC

El centro de concentración de datos fasoriales será el que recopile la información de todos los PMU dispuestos en la red IIoT, organizando los reportes recibidos mediante los identificadores únicos de cada equipo, analizándolos para detectar una eventualidad y describirla. Ferreira et al. [16] mencionan que los sistemas de monitoreo de fallas abarcan la detección, clasificación y localización de anormalidades en líneas de transmisión, siendo estos tres módulos los principales considerados para el diagnóstico de la falla.

Dentro de la detección de fallas en la línea de transmisión, se usaron esquemas modificados de las protecciones de distancia 21 y la diferencial de línea 87L, usando como referencia lo expuesto por Calero y Altuve [23], que definen ecuaciones de los lazos de medición de impedancia, y Prado et al. [24] que realizaron una breve descripción de los fundamentos de la protección diferencial.

En cuanto a la clasificación del tipo de falla, se usó el modelo de sistema de lógica difusa propuesto por Das y Vittal [15] al ser un algoritmo simple y con mucha fiabilidad para una gran cantidad de escenarios; por último, en cuanto a la localización de fallas se siguió la propuesta de Kong et al. [14] la cual, mediante el modelado de la línea de transmisión en parámetros distribuidos, consigue hallar la localización de la falla entre dos PMU dispuestos en una red de distribución de poco error.

Implementación de la red IIoT

Para la evaluación del prototipo son necesarias seis señales senoidales controlables en magnitud y ángulo, estas se obtuvieron mediante 6 salidas PWM de otro ESP32, cuya función es generar una señal senoidal

modulada por amplitud de pulso a partir de un conjunto de muestras discretas, pasándolas por un filtro pasa bajas pasivo convirtiéndolas en una senoide. Después, dicha señal transcurre por un amplificador de ganancia ajustable, el ángulo se controla mediante el código del ESP32 y la magnitud mediante los potenciómetros de los amplificadores, una prueba de este generador de señal es mostrado en la Figura 8. Además, en el circuito final se implementó el sincrofasor mediante un pulso PWM de un pin digital en el generador de señales marcando una referencia de ángulo para las lecturas del prototipo.

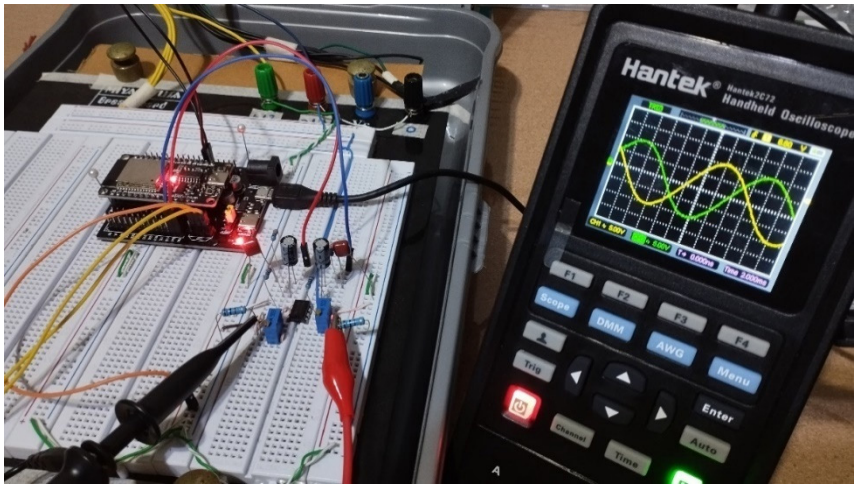

Figura 8. Prueba del generador de señales con dos ondas separadas 120.4°

Por último, considerado la red de comunicación entre el PMU y el PDC, esto se realizó utilizando las funciones del protocolo TCP/IP usando un router como enlace y evaluando los mensajes enviados mediante el software Wireshark enviando las mediciones como una cadena de caracteres. En las Figuras 9, 10 y 11, se muestra el prototipo completo.

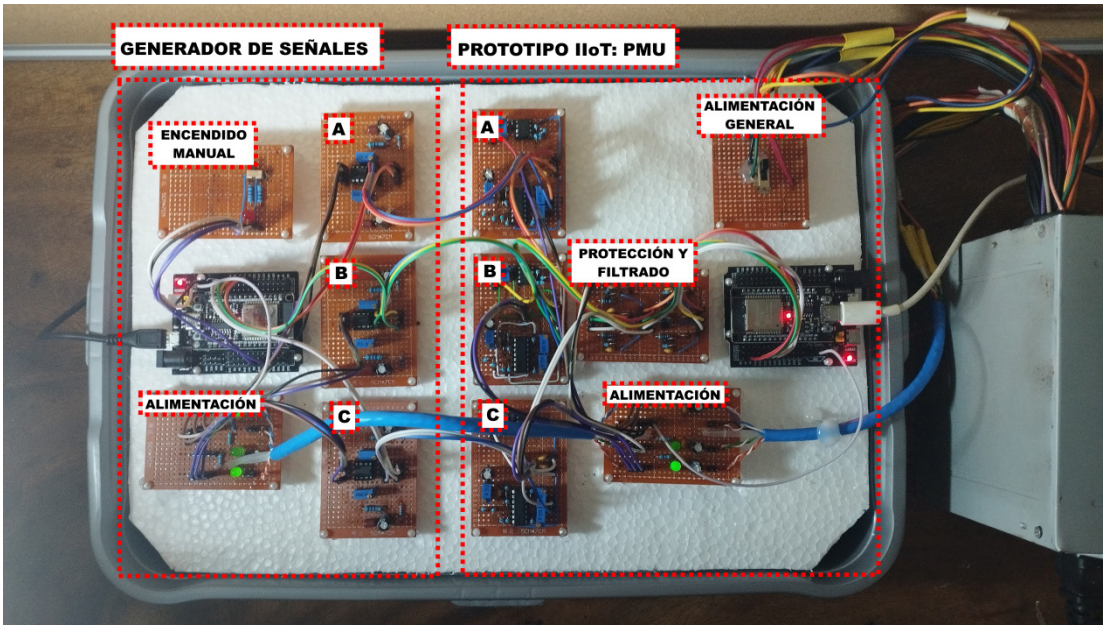

Figura 9. Montaje físico del prototipo IIoT detallado

Rafael D. Rubio-Romero. CC BY-SA 4.0

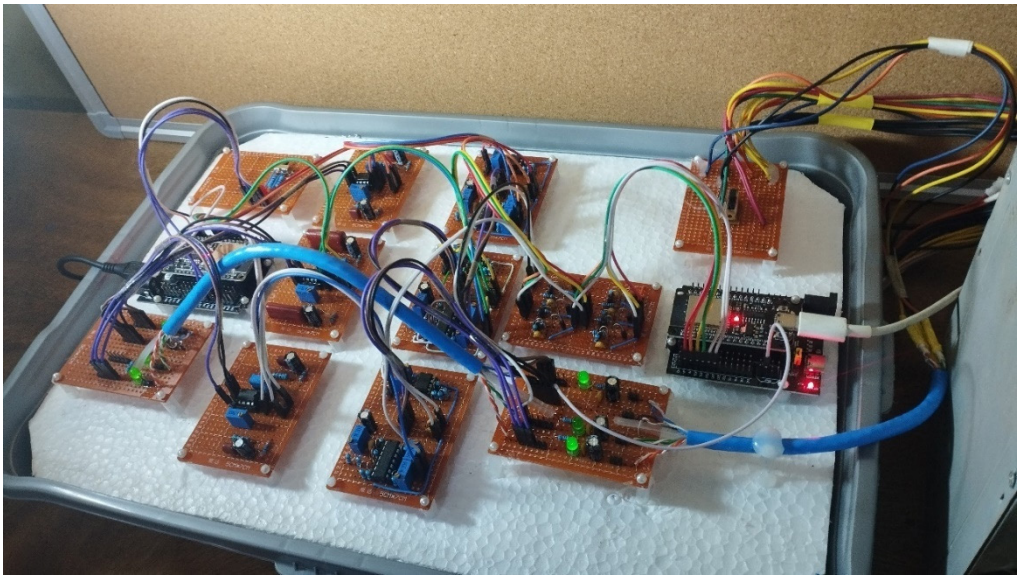

Figura 10. Acercamiento al montaje físico del prototipo IIoT

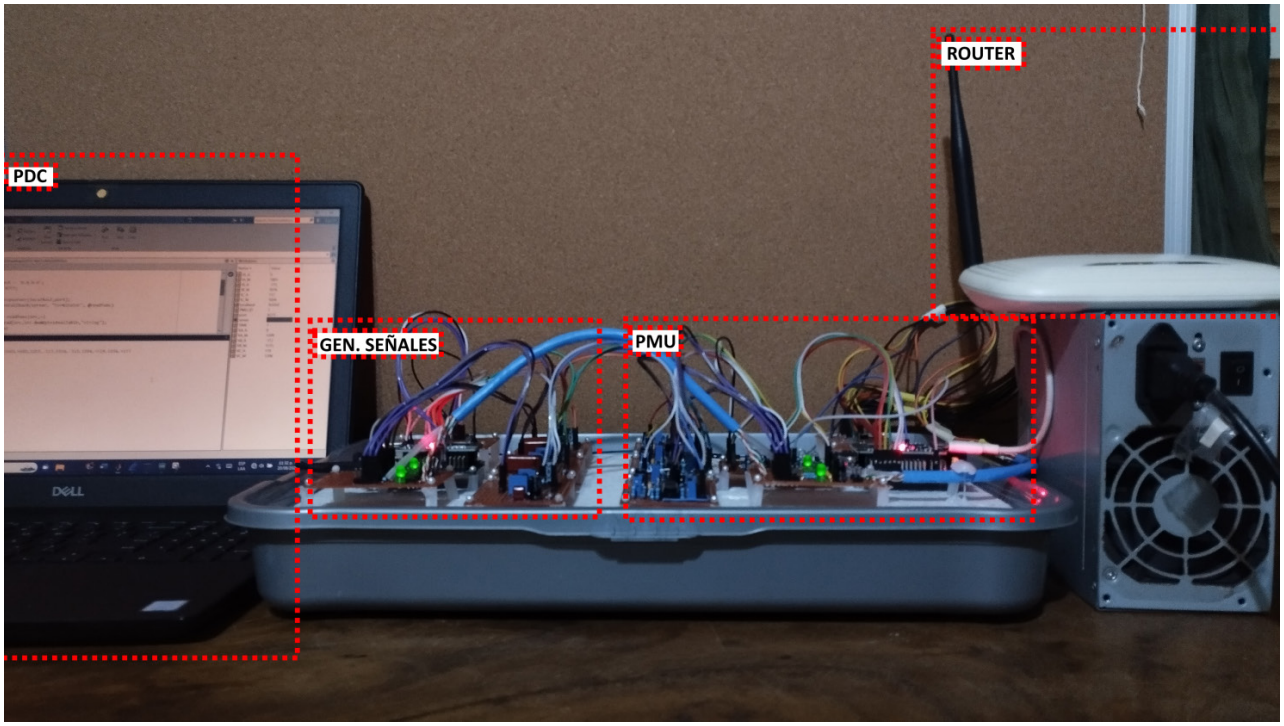

Figura 11. Montaje final del prototipo IIoT PMU - PDC

Casos de estudio

Los dos casos de estudio fueron proporcionados por la empresa BRIPCO E&S C.A. que contienen líneas de transmisión en 138 kV de importancia. El primero es el caso más característico para una posible implementación del prototipo representando una línea de transmisión en una región rural que alimenta centros urbanos de la localidad alejados de la central de generación como se muestra en la Figura 12, está compuesto de dos tramos de diferente conductor y disposición física, siendo su longitud de 154 y 24 km para un total de 178 km. El segundo caso, representa una línea de transmisión de 40 km entre dos subestaciones eléctricas que posee una interconexión en T de 20 km a la acometida en 138 kV de una empresa zuliana, mostrado en la Figura 13. Estos sistemas fueron modelados con una herramienta de simulación para sistemas de potencia.

Después de tabular los valores fasoriales de tensión y corriente en cada escenario, el prototipo y la red IIoT implementada, se probó mediante el Software MATLAB y SIMULINK, ante la inyección del generador de señales con los datos de entradas de los estudios de cortocircuito obtenidos en la fase anterior.

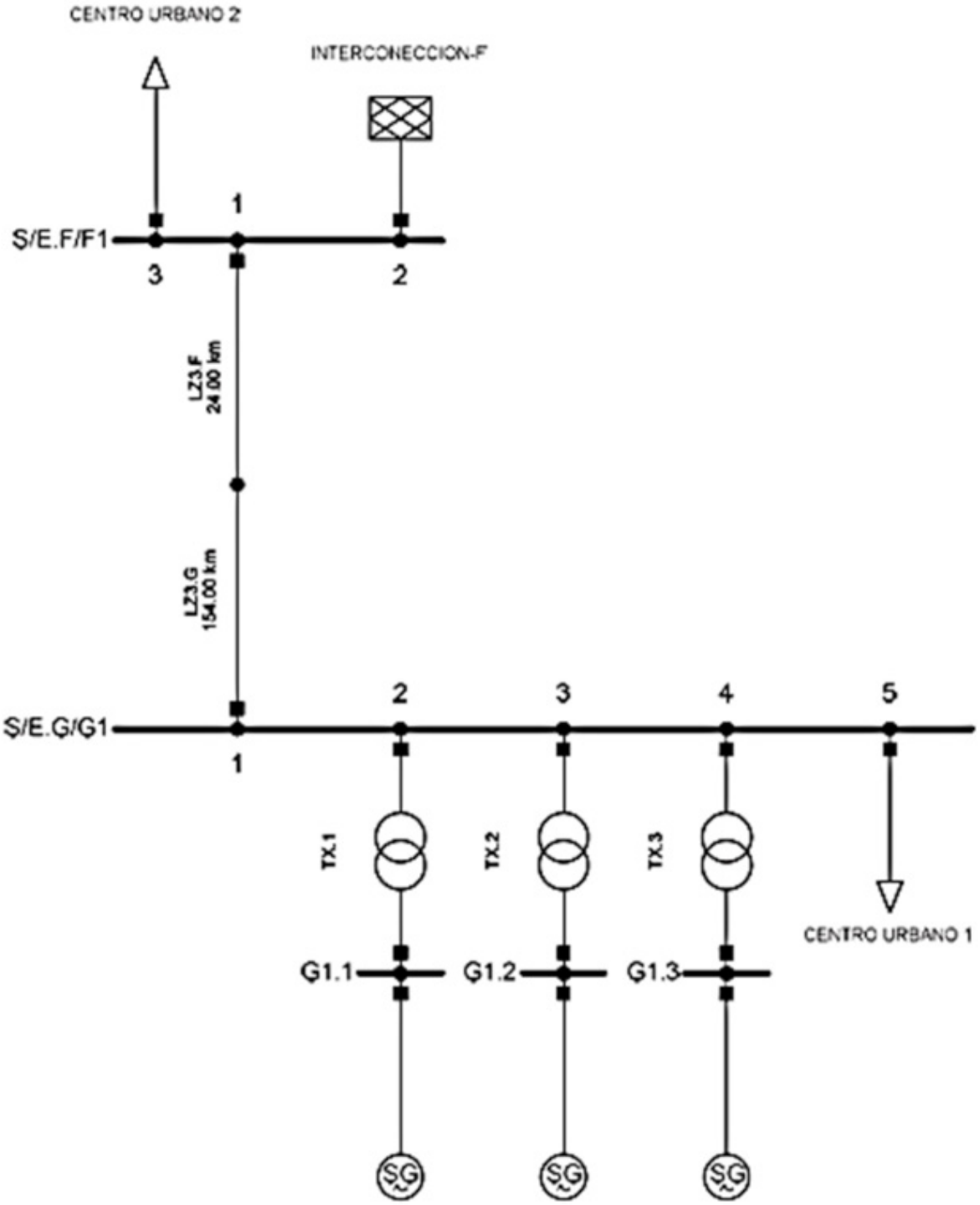

Figura 12. Diagrama unifilar del Caso de estudio 1

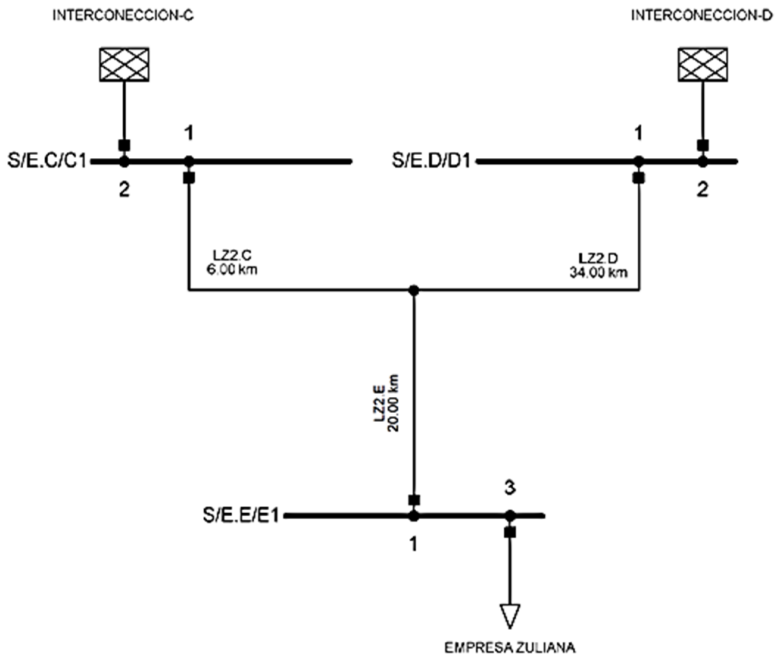

Figura 13. Diagrama unifilar del Caso de estudio 2

Caso de estudio 1. Línea de transmisión larga

Con el fin de corroborar la funcionalidad de la propuesta de prototipo de red IIoT en un caso real, se utilizará la disposición de PMUs sobre la línea de transmisión mostrada en la Figura 14 dividiendo los 178 km en secciones de 30,8 km para el tramo G y 24 km para el tramo F, siendo monitoreados mediante las mediciones registradas por los PMU. Es importante aclarar, que con el fin de simplificar la evaluación de la red IIoT solo se tomaron en cuenta los primeros cuatro PMU

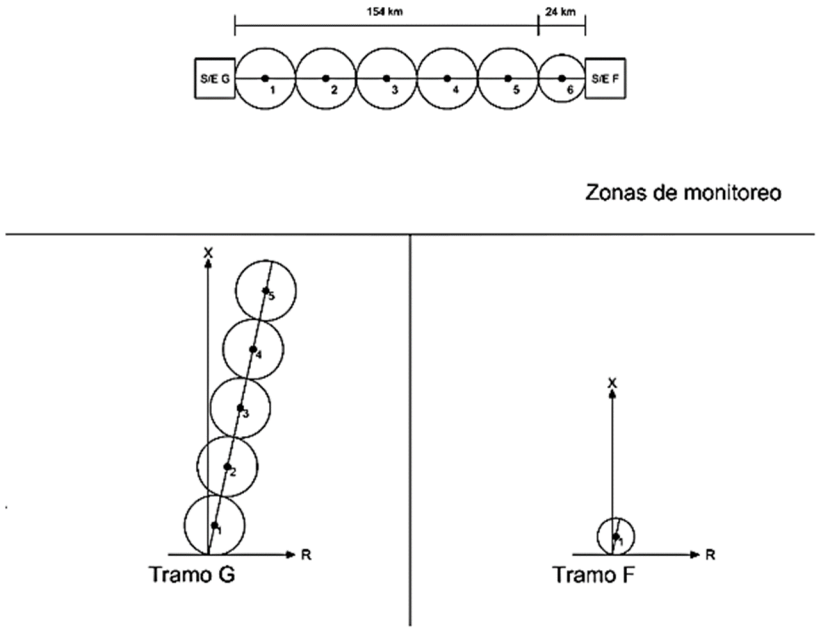

Figura 14. Disposición de PMUs propuesta para el caso 1

Se aplicó una falla monofásica en la fase A a 35,42 km respecto a la subestación G con una impedancia de falla de 4Ω totalmente resistivo, evaluándola mediante el método completo en la herramienta de simulación para sistemas de potencia, luego se encendió el generador de señales con el ajuste fasorial resultando en el

oscilograma registrado por el PMU físico visto en la Figura 15, notando que la medición de la corriente en la fase C presenta un error muy elevado debido a que el ADC integrado del ESP32 no cuenta con la suficiente resolución para conservar señales tan pequeñas, por lo que se realizó una corrección al fasor IC para evitar dañar el resto de la prueba.

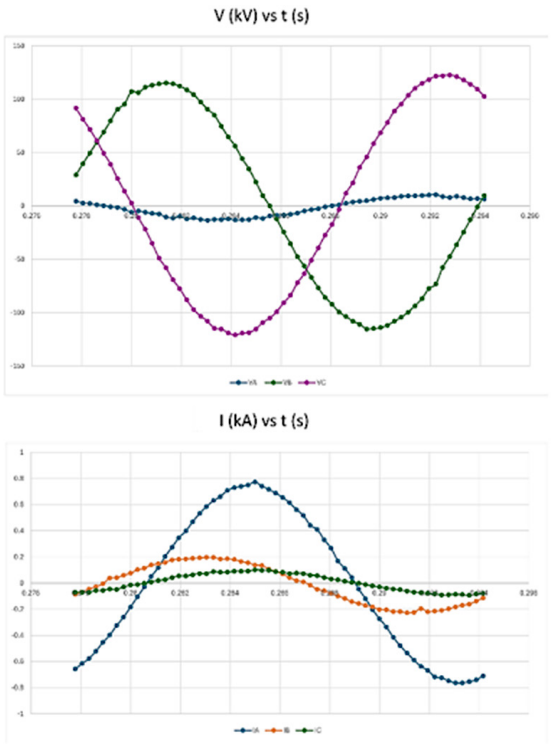

Figura 15. Oscilograma de tensión y corriente registrados por el PMU

Se aplicó el lazo de medición de impedancia AG, obteniendo los resultados vistos en la Tabla 1 que son positivos, ya que detectó la falla dentro de la zona del PMU 2, donde se había emulado la falla monofásica. Luego del evento, los datos fasoriales del PMU 2 son enviados al sistema difuso de clasificación de fallas programado en MATLAB para emular el controlador en la subestación, computando los datos de la Tabla 2 y los resultados de la Figura 16.

Tabla 1. Resultados de la detección de fallas por zonas de impedancia

PMU	Medición del lazo AG (Ω/prim)		Límite de la zona (Ω /prim)	¿Detecto la falla?
	$\lvert X \rvert$	$\angle$		
1	11,11	58,57	7,61	No
2	4,314	30,32	7,61	Si
3	11,86	-153,1	7,61	No
4	17,77	-134,3	7,61	No

Tabla 2. Datos de entrada del sistema de lógica difusa

ang_A	ang_B	ang_C	R_{of}	$R2f$
7,768	127,768	112,2320	1,1949	0,8892

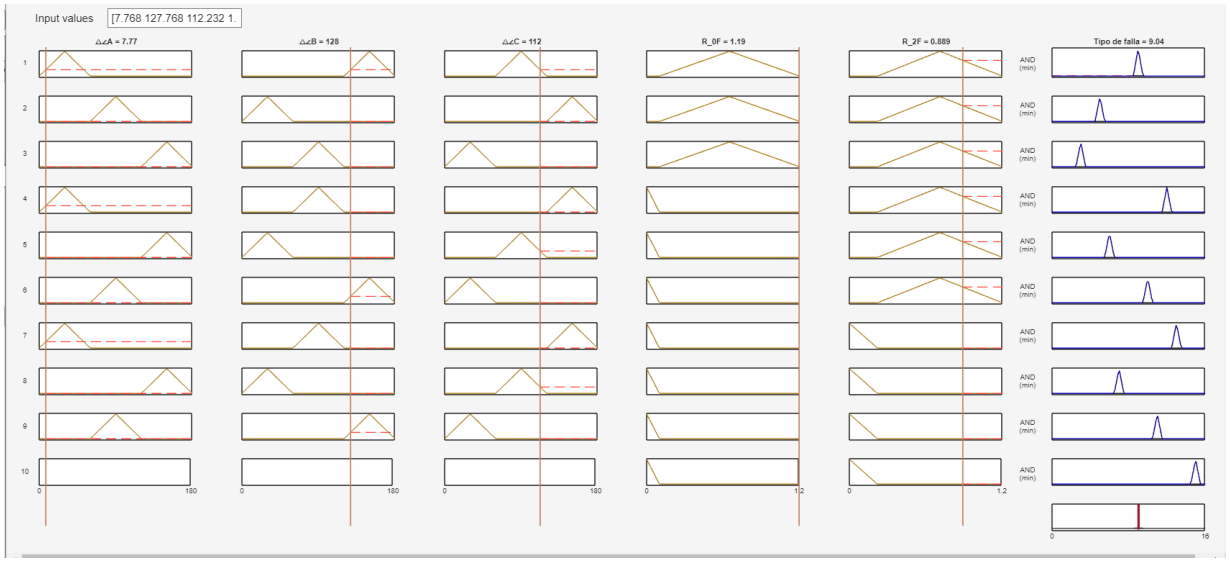

Figura 16. Resultados de la clasificación de fallas mediante el sistema de lógica difusa

Como se observa en la imagen, el modelo del sistema de lógica difusa fue capaz de determinar con un valor de 9.04 que la falla era monofásica en la fase A, ya que se encuentra dentro de su función de pertenencia, cercano al valor óptimo que sería 9 como se reseña en Das y Vittal [14]. Finalmente, se calculó la distancia de la falla utilizando las mediciones fasoriales de los PMU 2 y 3, dando los resultados vistos en la Tabla 3, siendo 4,1203 km relativo a la posición del PMU 2, realizando el ajuste correspondiente y calculando el error relativo se obtiene un resultado favorable de 1,4107%.

Tabla 3. Resultados de la localización de la falla mediante el modelo de parámetros distribuidos

$X_{real} = 30,8 + 4,1203 = 34,9203Km$
$X_{r(\%)} = \frac{\lvert 34,9203 - 35,42 \rvert}{35,42} * 100 = 1,4107\%$

Caso de estudio 2. Línea de transmisión con conexión en T

En el caso 2 se plantea una disposición de los PMU mostrados en la Figura 17, dividiendo la línea D, E y C en tramos de 8,5 km, 10 km y 6 km respectivamente; el escenario presenta una de las ventajas de la propuesta IIoT al disponer un PMU en la conexión en Tque registra los fasores de tensión y corriente que fluye por cada uno de los tramos permitiendo distinguir cuál de ellos es el afectado al ocurrir una anormalidad, dejando de ser necesarias las correcciones para los cálculos en una línea en T; como ya se corroboró el principio de operación entre dos PMU se hará énfasis en los PMU 1, 2, 4 y T. Se aplica mediante la simulación de un cortocircuito una falla bifásica entre las fases A y B a una distancia de 18 km respecto a la subestación E con una impedancia de falla de 4Ω totalmente resistivo.

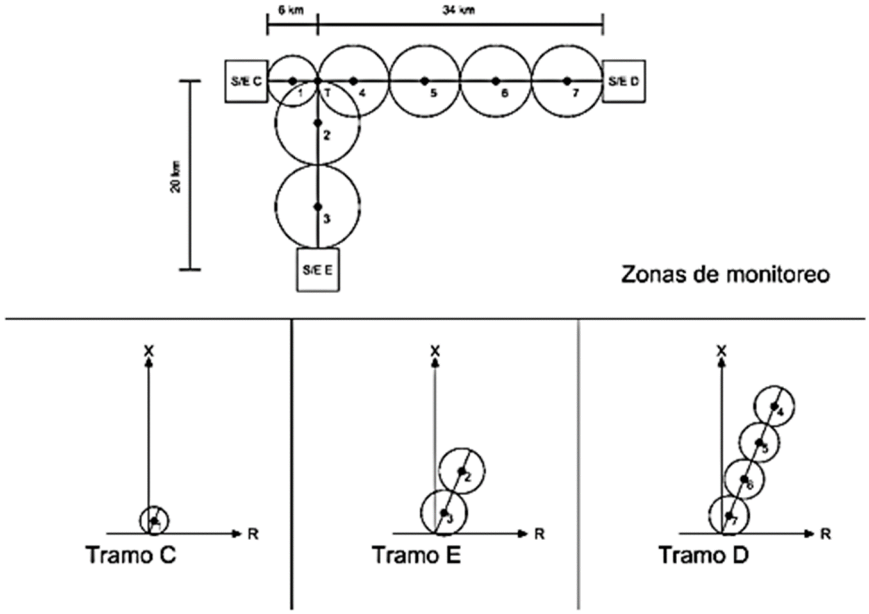

Figura 17. Disposición de PMUs propuesta para el caso 2

Para la detección de la falla se aplicó el esquema diferencial, mostrando sus resultados en la Tabla 4, concluyendo que el esquema diferencial logró identificar el tramo con la eventualidad siendo el PMU 2 – T, así como también determinar cuáles fases están involucradas en ésta. Resultando de gran beneficio el esquema diferencial en esta situación donde existe una o más interconexiones en T.

Tabla 4. Detección de la falla por unidad diferencial

Tramo	Fases	I_{op}	$SLP * I_{res} + k_O$	¿Detectó la falla?
PMU 1-T	A	0,0005323	5,47	No
	B	0,0005009	5,20	No
	C	0,0007184	1,1940	No
PMU 2-T	A	4,2553	4,0220	Si
	B	4,2551	3,9577	Si
	C	0,0013	0,9735	No
PMU 3-T	A	0,0043	2,6460	No
	B	0,0036	2,8552	No
	C	0,0071	1,1212	No

Conclusiones

Se estudiaron las fallas más perjudiciales para el traslado de potencia en la línea de transmisión, siendo éstas las no transitorias, donde en base a la bibliografía consultada y la entrevista realizada a un experto en el área, concuerdan que las fallas monofásicas son las más comunes consistiendo en el 70% de las fallas de cortocircuito seguida por la falla bifásica con un 15%.

Al ser la tecnología IoT en desarrollo dentro del sector industrial, esta presenta un marco normativo escaso, obteniendo varios de los criterios de seguridad a partir de otras normas no relacionadas a la temática, consistiendo la mayoría de la bibliografía existente en artículos realizados por investigadores. Sin embargo, por parte de instituciones como la IEC, se han comenzado a desarrollar estándares que facilitan la implementación de esta tecnología como la IEC 30141:2018, Internet of Things (IoT) – Reference architecture.

El mayor beneficio de este planteamiento es la posibilidad de segmentar las líneas de transmisión en tramos más pequeños definidos por la ubicación de los PMU, permitiendo el desarrollo de variaciones o nuevas filosofías de protección de la línea de transmisión. Representando el prototipo IIoT desarrollado un recurso de alto valor técnico y académico, dado que ejemplifica la forma cómo las nuevas tecnologías pueden mejorar sistemas dentro de las normativas vigentes, como la medición fasorial descritos en la IEEE std. C37.118.1-2011. Asimismo, complementa a otras tecnologías IIoT en desarrollo como es el caso de dispositivos patentados para la detección de fallas estructurales en torres de transmisión, encaminando con este prototipo el estudio de nuevas tecnologías para la modernización a nivel de protecciones ante fallas eléctricas propias de las redes de transmisión.

Mediante las pruebas realizadas en el Caso de estudio 1, donde se evaluó una falla monofásica de baja impedancia, se logró verificar las ventajas de la red IIoT al permitir la detección de anormalidades y el monitoreo del estado en diferentes puntos de una línea larga, representando el caso de zonas rurales con valles y montañas que dificultan el acceso a la línea, siendo primordial la localización de la anormalidad para solventarla. En profundidad logró detectar la falla utilizando el esquema general de la función de distancia (21), logrando identificar su tipo con un índice de 9,04 dentro de su función de pertenencia AG y localizando el lugar exacto de la anormalidad con un error del 1,4109%.Además, otra de las grandes utilidades de esta tecnología sobre los relés convencionales, fue corroborada en el Caso de estudio 2, donde se logró detectar los tramos perjudicados en una línea de transmisión con una conexión en Tdespreciando el efecto infeed característico de este tipo de arreglo y mediante esquemas de protección diferencial, representando un caso típico de una acometida industrial en alta tensión.

Ante las dos evaluaciones, se concluye que el prototipo físico y la configuración de la red IIoT en MATLAB, permiten emular la transmisión de detección y localización de falla en las líneas de 138kV.

Referenciasbibliográficas

[1] D. Kothari, y I. Nagrath, *Modern Power System Analysis*.3a ed. McGraw Hill, 2003.

[2] F. Barrero, *Sistemas de energía eléctrica.* Editorial Paraninfo, 2004.

[3] T. Gönen. *Electric power transmission system engineering.* John Wiley&Sons, 1988.

[4] T. Wildi, *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia.* 6a ed. Pearson Educación, 2007.

[5] J. Grainger, y W. Stevenson, *Análisis de sistemas de potencia.* McGraw Hill, 1996.

[6] H. Goh, et al., "Transmission Line Fault Detection: A Review". I*ndonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 8, no. 1, pp.199-205, 2017. [En Línea]. Disponible en: https://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJEECS/article/view/9757/7734

[7] K. Chen, C. Huang, y J. He, "Fault detection, classification and location for transmission lines and distribution systems: a review on the methods". *High Voltage,* vol. 1, no. 1, pp.25-33, 2016. [En Línea]. Disponible en: https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1049/hve.2016.0005

[8] S. Jian, X. Peng, H. Yuan, C. Lai, y L. Lai, "Transmission line fault-cause identification based on hierarchical multiview feature selection". *Applied Sciences*, vol. 11, no. 17, 7804, 2021. [En Línea]. Disponible en: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/17/7804

[9] K. Vavidel, "Emergency restoration of high voltage transmission lines". *The Open Civil Engineering Journal,* vol. 11, no. 2, pp.778-785, 2017. [En Línea]. Disponible en: https://opencivilengineeringjournal.com/contents/volumes/V11/TOCIEJ-11-778/TOCIEJ-11-778.pdf

[10] K. Navaneetha, L. Niranjan, N. Shyamsundar, y C. Venkatesan, "IoT based transmission line fault monitoring system". *International Journal of Research and Analytical Reviews,* vol. 7, no. 3, pp.465-468, 2020. [En Línea]. Disponible en: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20627.91685

[11] M. Apotikar, V. Chandak, S. Deberao, y S. Shah, "IoT based transmission line monitoring system". *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology,* vol.2, no.2, pp.550-553, 2022. [En Línea]. Disponible en: https://doi.org/10.48175/IJARSCT-3349.

[12] Y. Al Mtawa, A. Haque, y T. Halabi, "A Review and Taxonomy on Fault Analysis in Transmission Power Systems". *Computation.* vol. 10, 144, 2022. [En Línea]. Disponible en: https://doi.org/10.3390/computation10090144

[13] T. Gönen, *Modern power system analysis*. 2 ed. Taylor & Francis Group, 2013.

[14] X. Kong, et al., "Fault location technology for power system based on information about the power internet of things". *IEEE Transactions on industrial informatics,* vol. 16, no. 10, pp.6682-6692. 2019. [En Línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1109/TII.2019.2960440

[15] B. Das, y J. Vittal, "Fuzzy-logic-based faul classification scheme for digital distance protection". *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 20, no.2, pp.609-616, 2005.[En Línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.834294

[16] V. Ferreira, et al., "A survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines". *Electric Power Systems Research,* vol. 136, pp.135-153, 2016. [En Línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.02.002

[17] Standard for Synchrophasor Measurements for Power System, Norm IEEE C37.118.1-2011, New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.

[18] A. Bricchi, D. Moore, y J. Rostron, "Fault Location Detection on Tapped Transmission Lines". CIGRÉ Canada. *Conference on Power Systems Vancouver,* October 17- 19, 2010.

[19] A. Kadechkar, J. Riba, M. Moreno, y J. Perez, "SmartConnector: A Self-Powered IoT Solution to Ease Predictive Maintenance in Substations". *IEEE Sensors Journal,* vol. 20, no. 19, pp.11632-11641, 2020. [En Línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2998157

[20] Internet of Things (IoT) – Reference architecture, Norm IEC 30141:2018, Londres, ReinoUnido: International Electrotechnical Commission, 2018.

[21] T. Green, P. Semig, y C. Wells, *Analog Engineer's Circuit Cookbook: Amplifiers.* 2a ed. Texas Instruments, 2019.

[22] S. Khan, S. Imtiaz, H. Mustafa, A. Aijaz, y M. Ali, "Design and Development of a Synchrophasor Measurements Unit as per IEEE Standard C37.118.1-201", *Engineering and Technology History Wiki,* 2014. [En Línea]. Disponible en: https://ethw.org/w/images/5/5b/Design-and-Development-of-a-Synchrophasor-Measurement-Unit-as-per-IEEE-Standard-C37.118.1-2011-Saeed-Hassan-Khan-20151112-1.pdf

[23] F. Calero, y H. Altuve, "Identifying the proper impedance plane and fault trajectories in distance protection analysis", en *66th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*, Atlanta Georgia, 2012.

[24] I. Prado, R. Medeiros, F. Costa, y K. Silva, "A Performance Analysis of Transmission Line Differential Protection", *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, vol. 1, no 1, 2020.