



Universidad Internacional de La Rioja
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología - ESIT

Máster Universitario en Internet De Las Cosas / INTERNET OF
THINGS (IoT)

**Desarrollo de un sistema de cobertura amplia
para el monitoreo del consumo eléctrico con
tecnologías de IoT open source.**

Trabajo fin de estudio presentado por:	Caleño Velásquez, Cristian Alejandro
Tipo de trabajo:	Proyecto
Director/a:	Gutierrez Ríos, Ronald Saul
Fecha:	5/abr/2023

Resumen

La eficiencia energética es una de las áreas de aplicación más extendidas para las tecnologías de internet de las cosas. Estas tecnologías aportan gran versatilidad a los sistemas de monitoreo y gestión de energía eléctrica. Sin embargo, se han detectado ciertas necesidades en los sistemas actuales de gestión de energía eléctrica, tales como, la rigidez, la falta de escalabilidad y el alto costo. Este trabajo se enfoca en el desarrollo de un sistema de cobertura amplia para el monitoreo del consumo eléctrico con tecnologías de IoT open source que permita suplir estas necesidades. Se hace uso de tecnologías de estándares abiertos como LoRaWan para la creación de redes WSN(Wireless Sensor Networks), se construyen prototipos de Nodos de medición eléctrica y se usa software de código abierto como Grafana, Node-Red y InfluxDB para implementar una arquitectura flexible, escalable y de bajo costo para recolectar y analizar los datos de consumo eléctrico en complejos de edificios e industrias de área extensa.

Palabras clave: (LoRaWan, LoRa, Node-Red, InfluxDB, Grafana , IoT)

Abstract

Energy efficiency is one of the most widespread areas of application for Internet of Things technologies. These technologies bring great versatility to electric energy monitoring and management systems. However, certain needs have been identified in current electric energy management systems, such as rigidity, lack of scalability, and high cost. This work focuses on the development of a wide coverage system for electric consumption monitoring using open source IoT technologies that can address these needs. The use of open standard technologies such as LoRaWan for creating Wireless Sensor Networks (WSN) and open-source software such as Grafana, Node-Red, and InfluxDB allows for the implementation of a flexible, scalable, and low-cost architecture for collecting and analyzing electric consumption data in building complexes and area extensive industries.

Keywords: (LoRaWan, LoRa, Node-Red, InfluxDB, Grafana , IoT)

Índice de contenidos

1. Introducción	9
1.1. Motivación	10
1.2. Planteamiento del trabajo	11
1.3. Estructura de capítulos	12
2. Contexto y estado del arte	14
2.1. Descripción general del contexto del proyecto	14
2.1.1. Soluciones centralizadas.....	14
2.1.2. Soluciones basadas en sistemas No Inalámbricos.....	17
2.1.3. Soluciones propietarias	18
2.1.4. Soluciones con protocolos de comunicación propietarios	19
2.2. Proyectos relacionados con el tema del TFE	20
2.3. Tecnologías relacionadas con el tema del TFE	22
2.3.1. Protocolos de Comunicación Inalámbricos	22
2.3.2. Middleware.....	25
2.3.3. Bases de datos de Series Temporales (TSDB).....	27
2.3.4. Dashboard	27
2.4. Conclusiones sobre el estado del arte	28
3. descripción general de la contribución del TFE	30
3.1. Objetivos	30
3.2. Metodología del trabajo	30
3.2.1. Análisis.....	31
3.2.2. Diseño	31
3.2.3. Implementación.....	31

3.2.4.	Evaluación.....	32
3.3.	Descripción general de las partes o componentes de la propuesta	33
3.3.1.	Alcance y limitaciones	33
3.3.2.	Tecnologías implicadas.....	34
3.3.3.	Arquitectura, componentes e integración de tecnologías.....	35
3.3.4.	Resultados esperados.....	36
3.3.5.	Presupuesto y retorno esperado de la inversión	36
4.	desarrollo específico de la contribución	42
4.1.1.	Construcción del Nodo de medición	42
4.1.2.	Integración en la plataforma LoRaWan.....	48
4.1.3.	Desarrollo del código y pruebas de integración.....	53
4.1.4.	Desarrollo de los dashboard de visualización	57
5.	conclusiones y trabajos futuros de la contribución	64
5.1.1.	Líneas de trabajo futuras.....	67
6.	Referencias Bibliográficas	69
6.1.	Bibliografía	69
6.2.	Citas De Imágenes.....	72
7.	Anexos.....	74
7.1.	Fotografías De Montaje	74
7.2.	Diagrama De Flujo Completo Node-Red.....	76
7.3.	Flujo De Node-Red Github	76
7.4.	Codigo Nodo Function	76
7.5.	Dashboard Elaborados.....	79

Índice de figuras

Figura 1 <i>Datalogger DL171 Fabricante SENDNET</i>	15
Figura 2 <i>Ejemplo de conexión de 3 puntos</i>	15
Figura 3 <i>Interface Web Datalogger Sendnet</i>	16
Figura 4 <i>Topología para Gateway PLX82-MNET-61850</i>	17
Figura 5 <i>Precio de un sensor de temperatura Inalámbrico para tableros eléctricos</i>	18
Figura 6 <i>Arquitectura simple Smart Breaker</i>	19
Figura 7 <i>Arquitectura de red típica de LoRaWan</i>	24
Figura 8 <i>Flujo de Node-Red Resumido</i>	26
Figura 9 <i>Demo Dashboard construido con Grafana OSS</i>	28
Figura 10 <i>Arquitectura de la solución</i>	35
Figura 11 <i>Cronograma de tiempos</i>	41
Figura 12 <i>Diagrama Nodo de medición</i>	42
Figura 13 <i>Diagrama sensor transformador de corriente</i>	43
Figura 14 <i>Vistas medidor de energía trifásico SDM630MCT</i>	43
Figura 15 <i>Equipo conversor de medios Modbus/RS-485 a LoRa</i>	45
Figura 16 <i>Pantallazo configuración del equipo LoRa Controller UC1152</i>	46
Figura 17 <i>Nodo de medición completo</i>	47
Figura 18 <i>Gateway Indoor LoRaWan de 8 Canales UG65</i>	48
Figura 19 <i>Configuración básica del Gateway</i>	49
Figura 20 <i>Distancia entre nodo emisor y Gateway receptor.</i>	50
Figura 21 <i>Captura registro de Gateway en TTN</i>	51
Figura 22 <i>Captura integración de dispositivo final en TTN</i>	52
Figura 23 <i>Estructura de ejemplo Formato JSON</i>	52

Figura 24 <i>Flujo Node-Red de conexión resumido</i>	53
Figura 25 <i>Captura Configuraciones adicionales de los nodos</i>	55
Figura 26 <i>Captura de pantalla InfluxDB 2.0</i>	56
Figura 27 <i>Diagrama de conexión Grafana a InfluxDB</i>	57
Figura 28 <i>Panel configuración Grafana</i>	58
Figura 29 <i>Captura de una consulta visualizada en Grafana</i>	60
Figura 30 <i>Panel Grafana diseño Final</i>	61
Figura 31 <i>Panel de visualización de consumo diario</i>	61
Figura 32 <i>Documento tarifas precio kW/hora</i>	62

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Presupuesto de componentes por nodo</i>	37
Tabla 2 <i>Costo del Gateway</i>	38
Tabla 3 <i>Costos por adecuación de espacios para instalación de equipos</i>	39
Tabla 4 <i>Especificaciones técnicas Medidor SDM630MCT</i>	44
Tabla 5 <i>Especificaciones técnicas conversor LoRa controller UC1152</i>	45

1. Introducción

La eficiencia energética es una de las prioridades del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 7 de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. Este objetivo busca garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos (United Nations, 2020), al mismo tiempo que se promueve la eficiencia energética y se aumenta la proporción de energía renovable en la matriz energética global.

En este sentido, muchas empresas líderes en distintos sectores han asumido compromisos con el objetivo de lograr eficiencia energética y buscar llevar a cabo la transición hacia energías limpias; Sin embargo, a menudo se olvida que antes de hacer una transición hacia fuentes de energía más sostenibles, es fundamental garantizar la eficiencia en el uso de la energía, pues el hecho de explorar energías de tipo renovable no significa que el desperdicio de energía es insignificante. Por el contrario, los sistemas de gestión energética al interior de las empresas, apuntan hacia procesos de mejora continua que reduzcan los gastos innecesarios en cada ciclo del proceso, independientemente de las fuentes de generación de energía que estas usen.

Es por eso que el monitoreo energético es esencial ya que se requiere información detallada del comportamiento del sistema para lograr controlarlo. Los sistemas de gestión de energía eléctrica son una parte fundamental de los sistemas de gestión energética. Por lo tanto, es necesario implementar sistemas de monitoreo y gestión de la energía eléctrica que permitan identificar las áreas donde se están utilizando más recursos energéticos y, por ende, donde se pueda mejorar la eficiencia energética.

Existen soluciones integrales para la gestión energética incluyendo sistemas de automatización, transmisión, distribución de energía eléctrica y soluciones de energía renovable. Estos sistemas permiten a las industrias monitorear y controlar su consumo de energía eléctrica, optimizar sus procesos y reducir su huella de carbono.

A pesar de la importancia de estos procesos para las empresas y para el mundo, la implementación es menos común de lo esperada debido a causas que de una u otra manera están asociadas con los costos de implementación, versus el retorno de inversión o el ahorro.

Según estudios realizados por (Luyando Cuevas et al., 2021) “dentro de los principales problemas que enfrentan las empresas para implementar acciones de Eficiencia Energética,

Estas declararon que los altos costos de las tecnologías necesarias, son uno de los problemas principales”.

En este trabajo se plantean algunos factores que inciden en el aumento de los costos de implementación, tales como, falta de flexibilidad, escalabilidad y el uso de software y protocolos propietarios, planteando una solución a través del uso de tecnologías de Internet de las cosas, que pueda ayudar a mejorar el despliegue de este tipo de proyectos al interior de complejos de edificios, empresas o industrias interesadas.

1.1. Motivación

Es un problema la falta de aprovechamiento de las ventajas que ofrecen las tecnologías de IoT. A pesar de la consolidación de las tecnologías actuales, mayor diversidad de protocolos de comunicación y proyectos de código abierto, muchas empresas y hogares aún no han adoptado soluciones basadas en IoT, bien sea debido a la falta de oferta de productos electrónicos relacionados con la gestión de energía eléctrica en segmentos masivos de mercado, o a la falta de estandarización de soluciones y sistemas para el monitoreo del consumo eléctrico. Esto genera en las empresas, industrias y hogares dificultades para encontrar un incentivo en la implementación de estos proyectos relacionados con la eficiencia energética. Esto es un problema, ya que la tendencia de los hogares, empresas y ciudades inteligentes está en auge, y si no se atiende con premura, se corre el riesgo de quedarse rezagado en un mundo cada vez más conectado, donde la transformación digital es una obligación para las empresas altamente competitivas.

En el ámbito empresarial e industrial, el consumo eléctrico puede ser muy significativo, pues un consumo exagerado va en detrimento de la producción y las utilidades económicas. Por esta razón, el desarrollo del presente trabajo busca demostrar que es posible desarrollar un sistema escalable y de bajo costo, utilizando tecnologías consolidadas y proyectos de código abierto, que pueden ser implementados desde los entornos domésticos, empresas e industrias hasta las ciudades inteligentes.

La importancia de abordar este problema es que las tecnologías de IoT tienen el potencial de mejorar significativamente la eficiencia energética, el bienestar de las personas en su vida

diaria, reducir el impacto ambiental y aumentar la productividad y las utilidades en el ámbito empresarial, lo que es beneficioso para el desarrollo de las regiones. Por lo tanto, es fundamental que la comunidad científica y educativa relacionada con IoT promueva el desarrollo y la adopción de estas soluciones, para poder aprovechar al máximo los beneficios que esta tecnología puede ofrecer.

1.2. Planteamiento del trabajo

El sector de la gestión de energía eléctrica alcanza un importante desarrollo en los últimos años, acelerado por el crecimiento de la demanda por eficiencia energética y sostenibilidad. La eficiencia energética requiere de varias acciones como el suministro, la distribución, el control de cargas entre otras variables. Para lograr una gestión eficiente se requiere una visión completa y precisa de los datos eléctricos, esto destaca la importancia de los sistemas de monitoreo eléctrico.

Los sistemas de monitoreo eléctrico proporcionan información precisa de los datos del sistema eléctrico. Esto permite a los interesados detectar patrones de consumo y anomalías de la red, así como la posibilidad de tomar decisiones con argumentos sólidos con base a el estado de los sistemas.

A pesar de las ventajas de los sistemas de monitoreo eléctrico en tiempo real, al momento de implementar estas soluciones, se evidencian problemáticas relacionadas con la rigidez típica de las redes cableadas, dado que, en este tipo de redes enfocadas en la comunicación industrial, existe preferencia por los sistemas alámbricos. Otro obstáculo viene dado por el uso de software y protocolos propietarios, aumentando los costos de implementación y generando sistemas poco flexibles, menos escalables y más costosos.

Para hacer frente a estas problemáticas se propone en el presente trabajo el uso de tecnologías de IoT open source junto con redes WSN (Wireless Sensors Networks), pues como sostiene (de Araújo et al., 2018, p. 33) “Las redes de sensores inalámbricos WSN son una solución excelente para tareas de supervisión de redes de área amplia”.

Para lograr estos objetivos, se construye un nodo de medición eléctrica basado en el protocolo de comunicación LoRaWan y se hace uso de middleware y bases de datos para series

temporales, así como plataformas de visualización y análisis de datos en búsqueda de una arquitectura flexible, escalable, de bajo costo y basada en estándares abiertos, que facilite el uso en complejos de edificios e industrias de área extensa, reduciendo los costos de implementación y aumentando las opciones de análisis y gestión de la energía eléctrica.

1.3. Estructura de capítulos

En el **capítulo 2**, se abordan temáticas relacionadas con la gestión de la energía eléctrica y algunas soluciones tecnológicas disponibles en este ámbito. Se destaca el desarrollo de medidores inteligentes evaluando cada solución y su adaptabilidad a las necesidades de los usuarios.

Se describen distintos tipos de soluciones intentando mantener un orden cronológico acorde a la evolución de las tecnologías de monitoreo en los últimos años. Se habla de soluciones basadas en sistemas alámbricos y no inalámbricos y sobre el uso de protocolos de comunicación para cada tecnología.

Se presentan algunos proyectos y tecnologías relacionadas con el proyecto actual, destacando los proyectos enfocados en el diseño de medidores inteligentes, el uso de tecnologías de área amplia como LoRa y el desarrollo de sistemas IoT de bajo costo.

Las secciones finales describen las tecnologías implicadas en el desarrollo del proyecto actual como las tecnologías de comunicación inalámbrica LPWAN, las tecnologías para almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de datos generados por dispositivos IoT, el software para el desarrollo de paneles de visualización y el uso de un middleware para la integración rápida de aplicaciones en este tipo de proyectos.

En el **capítulo 3**, Se describen los objetivos generales y específicos del proyecto, la metodología de desarrollo que se lleva a cabo para lograr estos objetivos describiendo cada etapa y los productos y resultados esperados en cada etapa relacionada con el progreso del proyecto.

Se establece con claridad el alcance esperado para la ejecución del proyecto actual, junto con las limitaciones y riesgos en el proceso de ejecución.

En este capítulo se define la arquitectura de la solución, las tecnologías seleccionadas y la manera como interactúan los componentes de dicha arquitectura.

Finalmente se desglosan los rubros presupuestales del proyecto, el costo total y la manera como se espera obtener el retorno de la inversión, así como el tiempo estimado para lograr el ROI (Return on investment) del proyecto.

En el **capítulo 4** se realiza una descripción detallada de la ejecución técnica del proyecto. Se abordan los componentes necesarios para construir el prototipo de un nodo de medición eléctrica que utiliza tecnologías inalámbricas de largo alcance. Se resaltan algunas especificaciones técnicas de cada componente y se explica la forma en que se conectan entre sí. Además, se profundiza en la arquitectura LoRaWan y su aplicación en el contexto del proyecto actual, así como la plataforma que se utilizará para implementar esta novedosa arquitectura.

En este capítulo también se detallan las principales configuraciones de los equipos involucrados en la solución, junto con las piezas de código necesarias para el funcionamiento del sistema. Se destacan capturas de pantalla durante el desarrollo, mostrando las configuraciones y parámetros clave a tener en cuenta en la configuración del software utilizado en la solución. También se demuestra la utilidad de los paneles de visualización desarrollados mediante un análisis más profundo de los datos, resaltando su valor en la toma de decisiones empresariales. Finalmente, se revisan en detalle algunos gráficos de los paneles de visualización para respaldar los rubros propuestos como retorno de inversión del proyecto.

En el **capítulo 5**, se presentan las conclusiones alcanzadas con el desarrollo del proyecto y se destacan las posibles líneas futuras, en las que este proyecto pueda aportar para el desarrollo de nuevas e innovadoras soluciones relacionadas con el monitoreo eléctrico, e incluso con cualquier solución de monitoreo que haga uso de este tipo de tecnologías IoT.

2. Contexto y estado del arte

2.1. Descripción general del contexto del proyecto

En las últimas décadas se ha producido un notable desarrollo en el área de gestión de la energía eléctrica. Las técnicas más comunes para medir y realizar un seguimiento del consumo de energía en el pasado, eran los medidores analógicos, pero a medida que la tecnología se ha desarrollado, se ha observado un cambio hacia los medidores inteligentes, que incluso actualmente se vinculan a la nube para brindar nuevas funcionalidades.

La capacidad de los contadores inteligentes para beneficiarse del análisis de datos es una de sus principales características. Al recopilar datos completos sobre el uso de electricidad, se pueden usar algoritmos y técnicas de análisis de datos para detectar patrones, o simplemente una medición precisa del consumo con valiosa información para el usuario final.

Actualmente existen empresas líderes en el mercado de la gestión de energía, como Siemens o Schneider Electric entre otros, con un amplio catálogo de soluciones para el monitoreo de energía eléctrica, al tiempo que crece la disponibilidad de productos relacionados en los mercados locales. Con este crecimiento también crece la dificultad de los usuarios finales para seleccionar productos adecuados. Adicionalmente las demandas de este mercado son tan diversas que vale la pena precisar si cada solución es suficientemente flexible y adaptable a la necesidad de cada cliente. Una mirada crítica sobre las características de las distintas soluciones permite entender la actualidad de estas tecnologías y sus limitaciones, con el fin de plantear soluciones que superen el máximo número de limitantes como sea posible y aportar al desarrollo del área del monitoreo eléctrico y los sistemas inteligentes altamente eficientes, junto a todos los campos de aplicación asociados.

2.1.1. Soluciones centralizadas

Algunas soluciones se basan en sistemas de gestión de energía centralizados en dataloggers lo que impide desagregar la red, pues este tipo de soluciones se basa en un monitoreo de la red general y no permite una comparativa sobre puntos específicos.

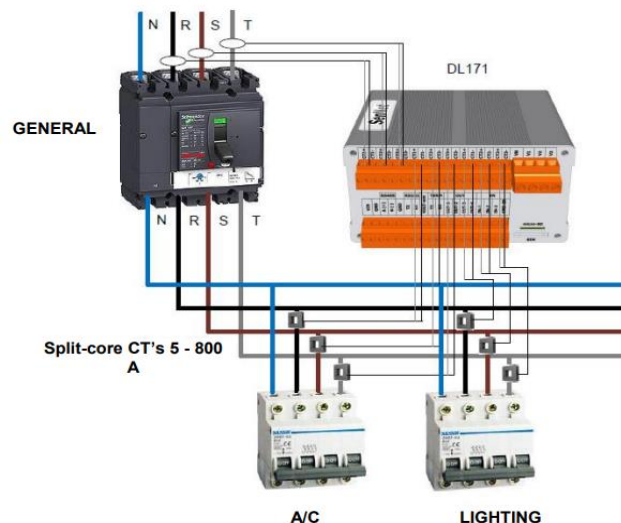
Figura 1 Datalogger DL171 Fabricante SENDNET



Fuente: (satel-iberia, 2023a)

Una de las soluciones para el monitoreo eléctrico se basa en la instalación de unidades de adquisición de datos como la de la figura 1, estas unidades tienen la opción de conectar de manera directa los sensores de corriente desde las fases de alimentación. Esta unidad en particular permite la conexión de hasta 3 sistemas trifásicos.

Figura 2 Ejemplo de conexión de 3 puntos



Fuente: (satel-iberia, 2023b)

En la figura 2 se observa la conexión de 3 puntos de un sistema trifásico. Aunque es un sistema económico y de fácil implementación, sus limitaciones vienen dadas por que el datalogger

debe estar cerca de los sensores de corriente, pues es complejo extender la línea cableada del sensor sin inducir alteraciones en la medida o sin requerir construcción de infraestructura de red especial para el tendido de la línea, lo que incrementa los costos.

Otra limitación viene dada por las posibilidades del firmware, pues si los fabricantes no han desarrollado facilidades para obtención de las lecturas solicitadas o para la integración de los datos de distintos datalogger distribuidos en un área geográfica, la comparativa en integración de la información en un servidor se vuelve un proceso complejo.

Figura 3 Interface Web Datalogger Sendnet

INTERNAL_FH	Time Stamp	ENBact (kWh)	ENBha (kvarh)	ENBpa (kvarh)	POWact (W)	POWha (var)	POWpa (var)	ENBact1 (kWh)	ENBact2 (kWh)	ENBact3 (kWh)	ENBha1 (kvarh)	ENBha2 (kvarh)	ENBha3 (kvarh)	ENBpa1 (kvarh)	ENBpa2 (kvarh)	ENBpa3 (kvarh)	Freq (Hz)	PAI (W)	PAI2 (W)	PAI3 (W)	PR1 (kWh)
1 meter_1	22/03/16 17:00	11127.1	-2406.4	12555.5	2217	-454	2417	198.0	0.4	10928.6	4.4	0.0	-2410.9	284.6	0.4	12270.4	50.00	92	0	2125	-42
2 meter_2	22/03/16 17:00	9408.7	-1889.6	10498.4	2207	-472	2419	141.3	0.2	9267.1	-3.9	0.0	-1885.6	242.6	0.2	10255.5	50.00	82	0	2124	-52
3 meter_3	22/03/16 17:00	9342.5	-1963.5	10503.9	2195	-480	2416	141.2	0.2	9201.0	-3.9	0.0	-1959.5	242.6	0.2	10260.9	50.00	82	0	2112	-52
14 test-gateway_v09	22/03/16 17:00	44435	1808	4652	233.4	236.3	234.8	15.6	0.0	0.4	3000	0	0	3000	0	0.999					
15	22/03/16 17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
16 test_tecnicos	22/03/16 17:00	25.0	40	181	3.5	204	0	1													
17 test_almacen	22/03/16 17:00	23.5	40	25	3.4	183	0	1													
18 test_s_reuniones	22/03/16 17:00	21.0	44	125	3.4	189	0	0													
20 test-410-v06-RFv01	22/03/16 17:00	1	1	0	0																
21 test_EMN	22/03/16 17:00	796.0	47.5	37424.9	38268.5	2146899.8	2147468.0	2145093.5	2144494.0	1453.8	108.6	39715.0	41277.5	3.744	0.084	0.4	0.0	19.2	231.7	233.6	230.

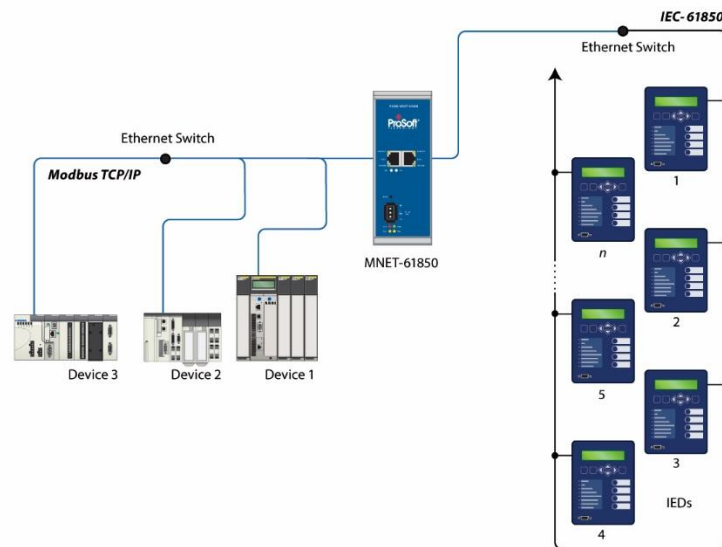
Fuente: (satel-iberia, 2023a)

En la figura anterior se observa la interfaz de administración del datalogger DL171, allí se puede observar que la única opción para obtención de los datos es descargando un archivo “.csv”. Si en el proyecto existe la intención de comparar las lecturas de distintos datalogger, se hace necesario asegurar la conexión ininterrumpida de todos los dispositivos a la red y asegurar la pieza de software necesaria para autenticación en cada datalogger de manera individual y la obtención de los archivos de lectura para la posterior manipulación de los datos. Este proceso se simplifica en gran manera cuando la solución tiene API de integración, pero no son tan comunes en este tipo de soluciones.

2.1.2. Soluciones basadas en sistemas No Inalámbricos

Actualmente existen protocolos de comunicación especializados en la interconexión de equipos industriales, según sostiene (de Araújo et al., 2018) “los fabricantes están lanzando equipos para la red inteligente dotados de protocolos de comunicación como DNP3, IEC 61850 y MODBUS” (p.1). Históricamente, la mayoría de los sistemas de comunicación industrial se han implementado con conexiones alámbricas, como RS-232, RS-485, Profibus, Modbus., debido a su fiabilidad y velocidad de transmisión de datos. Gran parte de las máquinas y dispositivos han optado por usar estos protocolos con ethernet TCP/IP para lograr mayor interoperabilidad.

Figura 4 Topología para Gateway PLX82-MNET-61850



Fuente: (prosoft technology, 2023)

La solución de usar protocolos comúnmente cableados como ethernet trae consigo algunas limitaciones. Ethernet sobre redes cableadas requiere la instalación de infraestructura adicional, cableado estructurado, obras civiles etc. Ethernet tiene una limitación de 100 metros de distancia en redes cableadas, lo que obliga a la instalación de switch's ethernet distribuidos a lo largo de la zona de cobertura incrementando la latencia de la comunicación, la inestabilidad de la red y los costos de implementación de la solución.

La utilización de redes de fibra óptica permite aumentar el área de cobertura, pero, aunque reduce la cantidad de switchs ethernet en la topología, mantiene los costos asociados al despliegue de infraestructura y obras civiles.

Las limitaciones antes mencionadas se pueden afrontar con el uso de redes WSN (Wireless Sensor Network). El uso de redes inalámbricas en arquitecturas de nodos dota a la red de gran flexibilidad y aumenta la distancia de cobertura, aunque esto depende del protocolo utilizado entre otros factores.

Figura 5 Precio de un sensor de temperatura Inalámbrico para tableros eléctricos



Fuente: (Schneider Electric, 2023)

En la figura 5 se tiene un ejemplo de un sensor inalámbrico y su costo actual. Se trata de un sensor para detección de temperatura y humedad que se debe adosar a la estructura a monitorear, por ejemplo, un tablero eléctrico o equipo cualquiera. Aunque es cierto que el costo está asociado a la calidad del diseño y la garantía de la marca, es fácil suponer que una implementación completa de este tipo de sistemas esta fuera del alcance de pequeñas y medianas empresas. El costo de implementación es quizá la característica primordial a la hora de evaluar el desarrollo de un proyecto de este tipo.

2.1.3. Soluciones propietarias

Existen muchos dispositivos para el monitoreo eléctrico, pero muchos de ellos poseen un firmware embebido que los limita a la utilización de una única plataforma de IoT. Aunque de esta forma el fabricante abstrae al cliente de muchos procesos de configuración, también limita las posibilidades de manejar sus datos en condiciones de análisis específicos que se requieran.

Figura 6 *Arquitectura simple Smart Breaker*



Fuente: Elaboración propia

En este tipo de arquitectura el dispositivo se empareja con un servidor en la nube y permite la visualización y analítica de los datos desde dispositivos móviles o vía web.

Una limitación dada por este modelo de negocio, es que el dispositivo solo es funcional con una única plataforma o con una única aplicación móvil, obligando al usuario a la adquisición de equipos de marca única. Estos proveedores de servicios en la nube pueden ofrecer muchas soluciones, pero pueden no estar adaptados a las necesidades específicas de todos los clientes. En este punto, se debe resaltar que proveedores de servicios IoT cloud como azure o AWS entre otros, están más orientados a soluciones masivas y que en determinados casos el cliente desea manejar sus datos localmente.

2.1.4. Soluciones con protocolos de comunicación propietarios

Los protocolos de comunicación propietarios son aquellos que han sido desarrollados y son propiedad de una empresa o fabricante específico. A diferencia de los protocolos estándar, como Modbus o CANbus que son de uso libre y están disponibles para cualquiera que los quiera implementar, los protocolos propietarios están diseñados específicamente para funcionar con los productos de una empresa en particular.

Por lo general, los protocolos de comunicación propietarios son utilizados por empresas que desean proporcionar una integración perfecta y un control completo sobre sus productos.

Una desventaja de los protocolos propietarios es que pueden limitar la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes, lo que puede hacer que sea más difícil para los usuarios integrar y administrar sistemas de diferentes proveedores. Además, los protocolos propietarios pueden ser menos transparentes que los protocolos estándar, lo que dificulta la comprensión y el diagnóstico de problemas de comunicación.

2.2. Proyectos relacionados con el tema del TFE

Para el desarrollo del presente proyecto, se han tenido en cuenta diversos recursos bibliográficos, como artículos, tesis, conferencias y trabajos de grado. Los más relevantes se citarán a continuación.

El trabajo de (Guevara et al., 2022) titulado "Desarrollo de un sistema IoT de bajo coste basado en LoRaWan para la monitorización de variables relacionadas con el consumo de energía eléctrica en redes de baja tensión", describe el desarrollo de un sistema IoT basado en LoRaWan que monitorea un circuito eléctrico industrial. El sistema utiliza un medidor de energía integrado a una red LoRaWan, un servidor web local y una aplicación web para analizar y visualizar los datos. Los aportes a este proyecto están relacionados con el desarrollo del prototipo electrónico y la fase comparativa de precisión del sistema.

Otro proyecto similar es el desarrollado por (Sánchez-Sutil et al., 2021), titulado "Design and Implementation of a Smart Energy Meter Using a LoRa Network in Real Time". Se implementa un contador de energía inteligente utilizando conectividad LoRa en tiempo real para controlar y optimizar el consumo de energía en hogares y negocios. El artículo describe el funcionamiento de la red LoRa y la aplicación de este sistema, así como las ventajas que ofrece en comparación con los contadores de energía tradicionales. También se discute la posibilidad de adaptar este diseño a diferentes tipos de instalaciones eléctricas. El trabajo permite visualizar detalladamente la construcción de un nodo de medición de energía eléctrica con transmisión inalámbrica LoRaWan, lo cual es relevante para compararlo con el nodo de medición propuesto en el presente proyecto. El artículo también permite verificar la fiabilidad

de las medidas, como voltajes RMS y corrientes RMS, y comparar ventajas relacionadas con el uso del medidor de energía trifásico propuesto en la fase de diseño del presente trabajo. También se aborda la comparación con la arquitectura utilizada, específicamente el uso del aplicativo Firebase en complemento con hojas de cálculo de Google Sheets. En la fase de diseño del presente proyecto, se propone una arquitectura más robusta para el almacenamiento y visualización de los datos.

El trabajo de (de Araújo et al., 2018) titulado "Infrastructure for Integration of Legacy Electrical Equipment into a Smart-Grid Using Wireless Sensor Networks", sirve como sustento para las ideas propuestas en este proyecto. En el artículo se sustentan las ventajas de la arquitectura denominada WSN, para la integración de equipos heredados con nuevos equipos a través del uso de protocolos de comunicación estándar como MODBUS. Se propone una infraestructura en la que cada dispositivo eléctrico heredado está conectado a un nodo sensor, y el nodo receptor ejecuta un middleware que permite la integración de este dispositivo en una red inteligente, basándose en protocolos de comunicación adecuados para comunicaciones industriales. El middleware realiza tareas como la traducción de mensajes entre el centro de control de la subestación y los equipos eléctricos de la red inteligente. Este proyecto, sustenta que esta arquitectura permite reducir los costos de implementación de sistemas de monitoreo eléctrico, coincidiendo con uno de los objetivos del presente trabajo.

Las conferencias de (Khalek et al., 2020), titulada "Smart Grid WSN Research Testbed", y (Cowlyn et al., 2016), titulada "Wireless Sensor Networks for In Situ Energy Efficiency Monitoring", argumentan la flexibilidad inherente de las redes basadas en nodos de sensores inalámbricos y su correlación con la reducción de costos, en comparación con las redes cableadas con dispositivos centralizados.

El artículo de (Rizwan et al., 2021), titulado "Implementation of ANN-based embedded hybrid power filter using HIL-topology with real-time data visualization through Node-Red", evidencia el alto potencial del uso del middleware Node-Red en proyectos de este tipo. En este proyecto, incluso se utilizan nodos de interfaz gráfica integrados en el middleware. Sin embargo, en el proyecto presentado en este TFM, se propone el uso de software especializado para la visualización de series de datos temporales.

Finalmente, se destaca el trabajo de (Nasar et al., 2019), titulado "Suitability Of InfluxDB Database For IoT Applications". Este permite sustentar la elección de la base de datos TSDB InfluxDB como tecnología de almacenamiento del presente proyecto.

El artículo trata sobre la idoneidad de la base de datos InfluxDB para aplicaciones de IoT. Se menciona que la tecnología ya está siendo utilizada en múltiples soluciones IoT en varias industrias, como ciudades inteligentes, transporte, salud inteligente, vida asistida, gobierno electrónico, educación electrónica, logística, comercio minorista, agricultura, producción industrial y automatización. Además, profundiza sobre las ventajas de las bases de datos NoSQL como alternativa sólida para el diseño escalable de instalaciones y manejo de grandes volúmenes de datos, características muy adecuadas para los sistemas IoT.

En resumen, los recursos bibliográficos referenciados brindan un sólido soporte para el desarrollo de este proyecto, cubriendo aspectos de monitoreo de variables de consumo eléctrico, uso de redes LoRaWan, integración de dispositivos heredados, redes inalámbricas basadas en sensores, uso de middleware y aprovechamiento de bases de datos TSDB como InfluxDB. Estos trabajos permiten enriquecer el conocimiento y crear fundamentos sólidos para la implementación del proyecto.

2.3. Tecnologías relacionadas con el tema del TFE

2.3.1. Protocolos de Comunicación Inalámbricos

Aunque en comunicaciones industriales existe preferencia por la comunicación cableada, la comunicación inalámbrica en las últimas décadas ha evolucionado hasta alcanzar niveles de fiabilidad óptimos incluso para redes industriales. Solo basta dar una mirada a las redes de 5th Generación que son redes de ultra baja latencia, gran ancho de banda, cobertura amplia y capaces de funcionar con protocolos de comunicación fiables, para concluir que las redes inalámbricas pueden suplir las necesidades de la mayoría de las soluciones.

De igual manera las WSN (Wireless sensor Network) han alcanzado gran fiabilidad. "La incorporación de nodos de sensores permite lograr redes flexibles y de menor costo". (Niels & Jan, 2006)

Los protocolos de comunicación inalámbricos evolucionan con estas tecnologías y uno de ellos alcanzan más popularidad que otros, como es el caso de LoRa y LoRaWan.

2.3.1.1. LoRa y LoRaWan

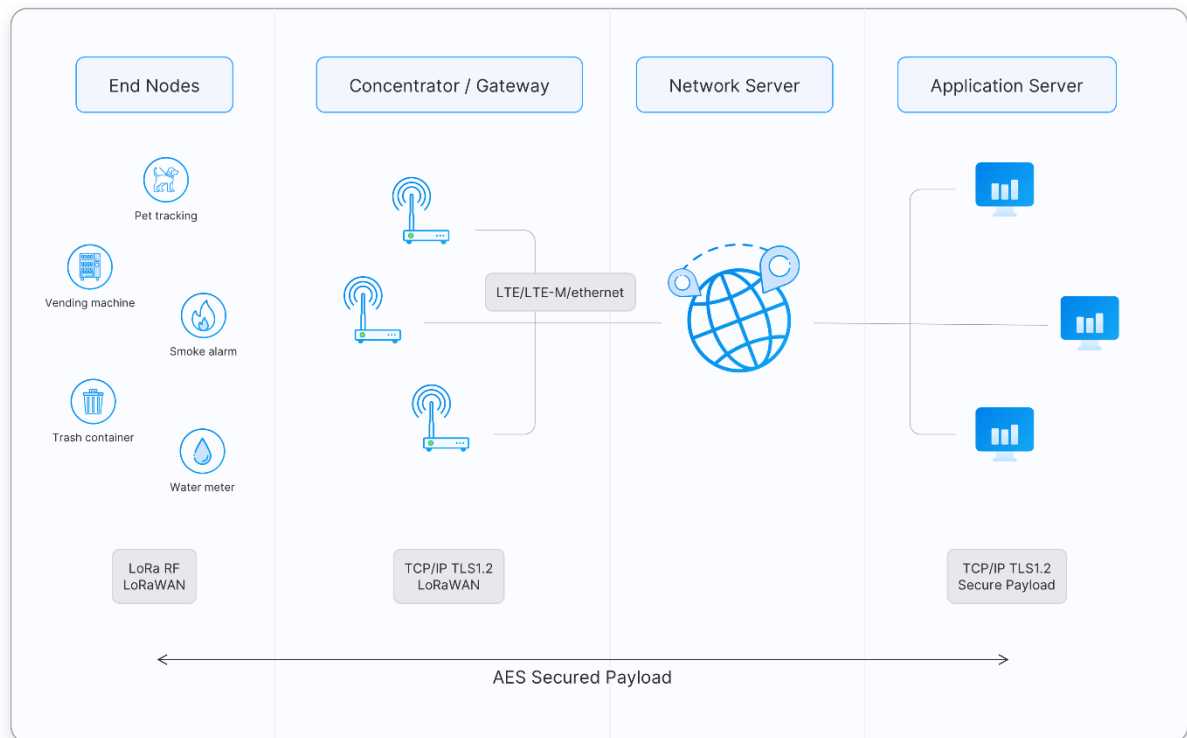
Según (LoRa Alliance, 2015) el protocolo LoRa se basa en la modulación de espectro ensanchado “chirp”, esta modulación usa baja potencia, similar a la conocida modulación FSK, pero aumenta significativamente el alcance de la comunicación. Chirp se ha utilizado en comunicaciones militares y espaciales durante décadas debido a las largas distancias de comunicación que se pueden lograr y su buena respuesta ante interferencias, pero LoRa es la primera implementación de bajo costo para uso comercial.

La ventaja de LoRa es la capacidad de largo alcance de la tecnología, lo que aumenta ostensiblemente la cobertura, una única pasarela o Gateway puede cubrir ciudades enteras o cientos de kilómetros cuadrados.”

Es común citar el termino LoRa y LoRaWan sin que importe la diferencia, pero LoRa define la modulación, mientras LoRaWan define la arquitectura y la manera como los dispositivos se integran a la red WAN.

Para utilizar la arquitectura LoRaWan existen distintas plataformas actualmente, en este proyecto se usará la plataforma The Things Networks (TTN), una red global colaborativa y abierta para el desarrollo de soluciones usando esta tecnología. El trabajo colaborativo ha permitido al proyecto TTN implementar infraestructura distribuida en distintas partes del mundo, servidores y puertas de enlace distribuidas formando una infraestructura descentralizada y sólida para dar cobertura en distintos países.

Figura 7 Arquitectura de red típica de LoRaWan



Nota: Una arquitectura de red LoRa tiene mínimo estas cuatro etapas. Tomado de (The Things Network, s.f.)

Una arquitectura típica de LoRaWan tiene los siguientes componentes principales: Nodos o dispositivos finales, una o más puertas de enlace, un servidor de aplicaciones, y una o más aplicaciones. (Della Mea et al., 2020)

En (The Things Network, s.f.) Sitio Oficial, se definen los anteriores conceptos como:

End devices (Dispositivos finales): Es cualquier sensor o actuador que envía mensajes a los Gateways.

Gateways (Puertas de enlace): Es el equipo central, encargado de recibir los mensajes desde los dispositivos finales y enviarlos a la plataforma.

Network Server (Servidor de red): Es un microservicio que se encarga de la gestión de toda la red.

Application Server (Servidores de aplicaciones): Es un microservicio responsable de procesar de forma segura los datos de la aplicación.

Join Server (Servidor de unión): Es un microservicio que procesa los mensajes de unión enviados por los dispositivos finales.

En el contexto de la implementación del presente trabajo se usa LoRa y LoRaWan para obtener una cobertura amplia mucho mayor que la de redes cableadas y para aprovechar su arquitectura de nodos para lograr una red flexible.

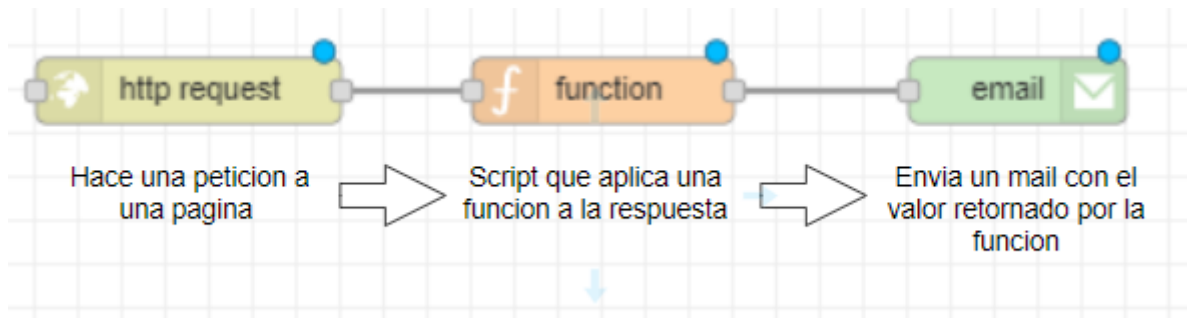
2.3.2. Middleware

Un middleware es un software que se encuentra entre un sistema operativo y las aplicaciones que se ejecutan en él. En este caso se usará la conocida herramienta de programación visual llamada Node-Red.

Node-Red es un proyecto de código abierto desarrollado por IBM en 2013 y liberado en 2016, funciona en Windows, Macintosh y Linux. Se trata de un entorno de desarrollo de programación por nodos, que permite que personas con menos habilidades en programación puedan realizar desarrollos rápidos. "Fue desarrollado para consumir pocos recursos de cómputo, nos permite crear un servidor de red para gestionar la conexión con dispositivos IIoT con arquitecturas ARM (Advanced RISC Machine) y plataformas RISC." (Torres Ventura et al., 2023, p. 92)

Node-Red es conocido por su rapidez y escalabilidad, Según (Heredia & Sailema, 2018), "es una plataforma que permite crear aplicaciones en red rápidas, ligeras y eficientes, perfecta para aplicaciones que requieren grandes cantidades de datos y que se ejecutan en dispositivos distribuidos.

Figura 8 Flujo de Node-Red Resumido



Fuente: Elaboración propia.

Node-Red utiliza el concepto de "nodos" interconectados, cada nodo representa una función, librería o incluso un servicio. Los nodos se arrastran y sueltan, y las conexiones entre ellos definen la secuencia o flujo del programa.

La plataforma tiene muchos nodos prediseñados para tareas típicas de los entornos de programación, como bases de datos, aplicaciones web etc. Los nodos pueden tener funciones avanzadas, por ejemplo, un único nodo podría desplegar un servicio de reconocimiento facial. Se habla de este ejemplo solo para resaltar lo potente que puede llegar a ser este middleware. Además, se pueden instalar nodos adicionales creados por terceros a través del administrador de paquetes, lo que permite ampliar aún más sus capacidades.

En la figura 8 se plantea una secuencia totalmente posible en Node-Red, allí se programa un flujo capaz de hacer una petición GET a un sitio web usando el protocolo http. La respuesta es procesada a través de un script típicamente de JavaScript ya que Node-Red corre sobre NodeJS. Finalmente, se envía la respuesta a un correo electrónico. Este flujo explica de manera didáctica la manera como en Node-Red se remplazan las líneas de código por widgets de arrastrar y soltar.

En el contexto de este proyecto se usa Node-Red para interactuar entre el bróker MQTT de la plataforma The Things Networks y el dashboard para visualización de los datos.

2.3.3. Bases de datos de Series Temporales (TSDB)

IoT se caracteriza por el aumento exponencial de dispositivos conectados a la red a lo largo del tiempo. Con este aumento también surge la necesidad de persistir o almacenar los datos generados por los dispositivos para su posterior análisis y extracción de valor.

En su artículo “Suitability Of InfluxDB Database For IoT Applications” (Nasar et al., 2019), argumentan en primera instancia el uso de bases de datos NoSQL en arquitecturas IoT definiéndolas como más escalables. Dado que en IoT los datos están estrechamente ligados a la línea de tiempo en que se produjeron, en el mismo artículo se analiza la idoneidad de las bases de datos de series Temporales (TSDB) destacando la base de datos InfluxDB como la de mejor rendimiento. Concluye el autor, *“InfluxDB es la base de datos de series temporales de código abierto de InfluxData diseñada para gestionar cargas intensas de escritura y consulta típicas en IoT”*. El proyecto actual usará esta base de datos por ser una de las más extendidas en entornos IoT.

2.3.4. Dashboard

Un dashboard es una interfaz gráfica que muestra de manera resumida y visual información relevante y actualizada de un sistema. Es una representación visual que permite monitorear y analizar datos de forma rápida y sencilla. Generalmente se compone de diversos elementos como gráficos, tablas, indicadores, gauges, mapas etc. Estos gráficos se actualizan en tiempo real o a intervalos para visualizar el desempeño de un proceso o sistema a monitorear.

En este proyecto se utiliza el software Grafana. El sitio web del proyecto define a Grafana como “El software de código abierto que permite consultar, visualizar, alertar y explorar métricas, registros y seguimientos almacenados. Grafana proporciona herramientas para convertir los datos de series temporales (TSDB) en gráficos y visualizaciones interesantes”. (Grafana Labs, s.f.)

Figura 9 Demo Dashboard construido con Grafana OSS



Fuente: (Grafana Labs, 2023)

Como se aprecia en la figura 9, Grafana tiene múltiples opciones de visualización de datos, gráficos de líneas, barras, tablas, incluso permite crear paneles interactivos y personalizables.

Grafana cuenta con la conexión a múltiples fuentes de datos como InfluxDB, MongoDB y servicios en la nube como AWS entre otros. Su funcionamiento se basa en consultas tipo SQL para extraer y transformar datos de las fuentes seleccionadas. Tiene una interfaz intuitiva para construir consultas personalizadas, aplicar filtros y agregar funciones matemáticas o estadísticas, también permite configurar alertas basadas en condiciones personalizadas.

Al ser un proyecto de código abierto, cuenta con una comunidad activa y gran cantidad de plugins y extensiones que aumentan su utilidad.

Grafana es muy utilizado en entornos empresariales y de código abierto para supervisar y analizar las métricas de rendimiento e indicadores, registros de aplicaciones, datos de sensores, monitoreo de infraestructura entre otros usos.

2.4. Conclusiones sobre el estado del arte

Con todo lo planteado en el estado del arte, se puede concluir que los sistemas de monitoreo de energía eléctrica basados en dataloggers se convierten en sistemas con redes rígidas y poco

escalables. De igual manera los sistemas basados en redes cableadas se hacen poco flexibles pues suponen construcción de infraestructura de red para cada ampliación.

Por otra parte, los protocolos propietarios y las nubes privadas limitan al usuario para la adquisición de equipos y dispositivos y dificultan la integración con equipos heredados.

Dadas estas limitaciones se usarán los aportes dados en los proyectos relacionados, tales como la implementación de un (1) nodo de medición inteligente con tecnologías LoRaWan como los propuestos por (Sánchez-Sutil et al., 2021) y aprovechando la flexibilidad de las arquitecturas WSN como propone (Guevara et al., 2022). Así mismo, se aprovechará el trabajo adelantado por (de Araújo et al., 2018), se utilizará un transceptor o conversor del protocolo MODBUS sobre RS-485 a LoRaWan para facilitar la integración de equipos industriales y equipos heredados a la arquitectura propuesta. Finalmente, se utilizarán las herramientas para persistencia y visualización de datos InfluxDB y Grafana respectivamente, aprovechando la investigación adelantada por (Nasar et al., 2019).

El aporte significativo del presente trabajo, está dado por la combinación de todas las herramientas utilizadas para construir un sistema completo, que se ocupe de todas las limitaciones encontradas en un entorno con múltiples soluciones en el mercado. Se han tenido en cuenta el uso de protocolos de comunicación abiertos. Al evitar la homologación de hardware el usuario tiene la posibilidad de adquirir mayor diversidad de equipos o dispositivos en el mercado. También se ha optado por el uso exclusivo de software open source, reduciendo costos de licencias y permitiendo al usuario la posibilidad de implementar soluciones locales o en la nube. Finalmente, se usará la plataforma de colaboración abierta The Things Networks como pasarela LoRaWan en combinación con el middleware Node-Red, permitiendo al usuario el uso de sus datos de manera local o si lo desea, en una nube privada con alto nivel de personalización.

3. Descripción general de la contribución del TFE

3.1. Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un sistema, flexible, escalable y de cobertura amplia para el monitoreo del consumo eléctrico utilizando tecnologías de IoT open source.

Objetivos específicos

- Construir un nodo de medición eléctrica inteligente con conectividad LoRaWan, asegurando una arquitectura flexible y de amplia cobertura.
- Desarrollar el código necesario para la integración fluida de la plataforma LoRaWan, la base de datos y las interfaces de usuario, asegurando la escalabilidad del sistema.
- Asegurar la persistencia de los datos en una base de datos de series temporales, asegurando la disponibilidad y seguridad de los datos.
- Desarrollar interfaces de visualización para el usuario asegurando la presentación clara y comprensible de los datos.

3.2. Metodología del trabajo

Existen diversas metodologías para el desarrollo y gestión de proyectos, para el caso del proyecto actual se ha seleccionado una metodología con enfoque incremental o metodología de modelo incremental. En primera instancia, porque se tiene una visión global de cada etapa del proyecto y se evidencia una interdependencia entre ellas. Por ejemplo, el proyecto requiere la elaboración y prueba de un prototipo antes de las pruebas de integración, y las TSDB requieren que el prototipo genere datos correctamente antes de proceder al almacenamiento. Por lo tanto, una metodología secuencial funcionaría adecuadamente, mientras otras metodologías ágiles como SCRUM estarían más orientadas a la ejecución paralela y al trabajo en equipos, pero el presente trabajo cuenta con un único desarrollador. Por otra parte, las piezas de software a desarrollar tienen funciones específicas y relativamente pequeñas, por lo que una metodología incremental permitiría priorizar las etapas de desarrollo de acuerdo con las dependencias, realizar pruebas y ajustes en cada

incremento antes de avanzar al siguiente, con lo que se obtiene una retroalimentación inmediata de avances y logros en cada fase del proyecto.

El proyecto se divide cuatro fases que se describen a continuación:

3.2.1. Análisis

En esta fase se plantean los requisitos iniciales del proyecto, la manera como se alcanzará el objetivo general para el desarrollo del sistema de monitoreo eléctrico y los resultados esperados y se identifican las tecnologías o habilitadores tecnológicos a usar. En este caso se espera un sistema que tenga las funcionalidades típicas de un sistema de medición eléctrica, mostrando el consumo instantáneo y acumulado, pero que aproveche el uso de bases de datos TSDB para obtener un registro histórico del comportamiento del sistema.

Se espera tener un sistema muy flexible y escalable con el uso de tecnologías inalámbricas de largo alcance y la visualización de los datos almacenados en el dashboard elaborado, que permitan leer fácilmente datos del sistema monitoreado, así como sus registros históricos y comparativas de consumo.

3.2.2. Diseño

En esta fase se definirá la arquitectura general del sistema, se define un mapa general de componentes a usar y la manera como dichos componentes interactúan para el correcto funcionamiento del sistema, también se definen los módulos, las interfaces y protocolos de comunicación a usar en el proyecto.

3.2.3. Implementación

En esta fase se ejecuta una parte fundamental del proyecto, se desarrollan físicamente las ideas planificadas en las fases anteriores. Para este caso, en el modelo incremental se definen los siguientes incrementos:

3.2.3.1. Incremento1

Primero se seleccionan y configuran los medidores trifásicos con sensores CT y el conversor de protocolos RS485 a LoRa.

Se desarrolla un prototipo funcional de los nodos de medición que sean capaces de recopilar datos de consumo eléctrico y enviarlos al Gateway a través de la red LoRa. Se comprueban las

lecturas del medidor trifásico y se comparan con las lecturas obtenidas de los sistemas actualmente instalados.

3.2.3.2. Incremento2

En el segundo incremento se realiza la configuración del Gateway LoRa, verificando la integración de los dispositivos en la red LoRaWan y el comportamiento de la plataforma para integración de los datos. En este incremento se verifica la autenticación de dispositivos en la red, los criterios de identificación de los dispositivos y seguridad de la información. En esta fase se profundiza en el uso de tecnologías inalámbricas específicamente en lo referente a potencia, canales y frecuencia de transmisión y especialmente al alcance de la transmisión para asegurar la cobertura amplia del sistema.

3.2.3.3. Incremento3

En el tercer incremento se realizan los flujos de programación, en esta fase se debe asegurar que el middleware funcionará adecuadamente para conectarse a los servidores o la plataforma LoRaWan. En este punto es preciso aclarar, que la plataforma escogida dispone de un Bróker MQTT, por lo que el middleware deberá desarrollarse para comunicarse con el bróker de la plataforma y con la base de datos simultáneamente. En cuanto a la base de datos, en este incremento se debe asegurar que el middleware inserte los datos en el formato correcto y esta almacene los datos de manera fiable, generando los informes correctamente durante los periodos especificados.

3.2.3.4. Incremento4

En este incremento se desarrolla la configuración del dashboard o panel de visualización, se debe asegurar que la selección de gráficas sea adecuada para representar la información y se identifique el comportamiento del sistema de manera simple. Se debe asegurar que la escala de visualización temporal presente información relevante para la determinación del comportamiento del sistema.

3.2.4. Evaluación

En esta fase se verifican los informes de periodos de tiempo más largos, comprobando que el comportamiento del sistema sea lo suficientemente estable como un sistema de medición de consumo tradicional; que no existan periodos faltantes, que los componentes del sistema

funcionen correctamente, que las medidas se puedan comparar con los sistemas tradicionales y que se cumplan los resultados esperados en cuanto a fiabilidad del sistema.

3.3. Descripción general de las partes o componentes de la propuesta

En este proyecto se utilizan medidores trifásicos con sensores de corriente de núcleo dividido (CT). Estos sensores CT (transformadores de corriente) permiten medir la corriente en cada fase del sistema trifásico y combinarlos con los medidores permitiendo obtener datos precisos sobre el consumo de energía eléctrica en tiempo real.

Luego, se utiliza un conversor de RS485 a LoRaWan. Al convertir la señal de RS485 a LoRaWan, es posible transmitir los datos de los medidores de manera inalámbrica a un Gateway central.

El Gateway es el dispositivo encargado de recibir los datos de los nodos y enviarlos a una red de área amplia. En este proyecto se usará la plataforma abierta The Things Network. Esta red permite la comunicación del dispositivo.

Una vez el Gateway reenvía los paquetes a la pasarela LoRaWan, se utiliza el bróker MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) de la pasarela para conectarla con Node-Red. En este caso, el bróker MQTT permite la suscripción a un tema específico conocido como “topic”, en el cual los datos se publican y se envían a Node-Red para su procesamiento.

En Node-Red, se crea un flujo configurado para suscribirse al tema del bróker MQTT y guardar los datos en una base de datos de series de tiempo (TSDB) como InfluxDB.

Finalmente, los datos se visualizan en un panel de Grafana, aplicativo que se conecta a la base de datos, permitiendo presentar paneles interactivos y personalizados con gráficos, tablas y otros elementos visuales.

3.3.1. Alcance y limitaciones

En este proyecto, se pretende monitorear el consumo de energía activa. Aunque el equipo seleccionado en la fase de análisis, describe en sus especificaciones técnicas la capacidad de leer valores de energía reactiva, en términos de consumo real, se considera que para el propósito de este proyecto las variables de energía y potencia activas son suficientes. Sin embargo, es importante mencionar que el sistema tiene la capacidad de monitorear estas

variables y se consideran muy interesantes para evaluar este tipo de sistemas, en contextos relacionados con la calidad de la energía eléctrica.

Durante el proyecto, se evaluará el sistema con un único nodo de medición inteligente. Cabe destacar que, al ser una arquitectura WSN, permite escalar la red a una gran cantidad de nodos fácilmente.

Finalmente, es importante señalar que no se disponen de equipos descentralizados de monitoreo eléctrico para realizar una comparativa con el sistema actual en la ejecución del presente trabajo. Sin embargo, durante el desarrollo se proporcionará evidencia del funcionamiento y fiabilidad del sistema implementado. El enfoque principal del proyecto actual, se centra en probar la integración de todos los componentes de software y hardware necesarios para alcanzar el objetivo general: la implementación de un sistema de monitoreo de consumo eléctrico de amplia cobertura y bajo costo, utilizando tecnologías IoT de código abierto.

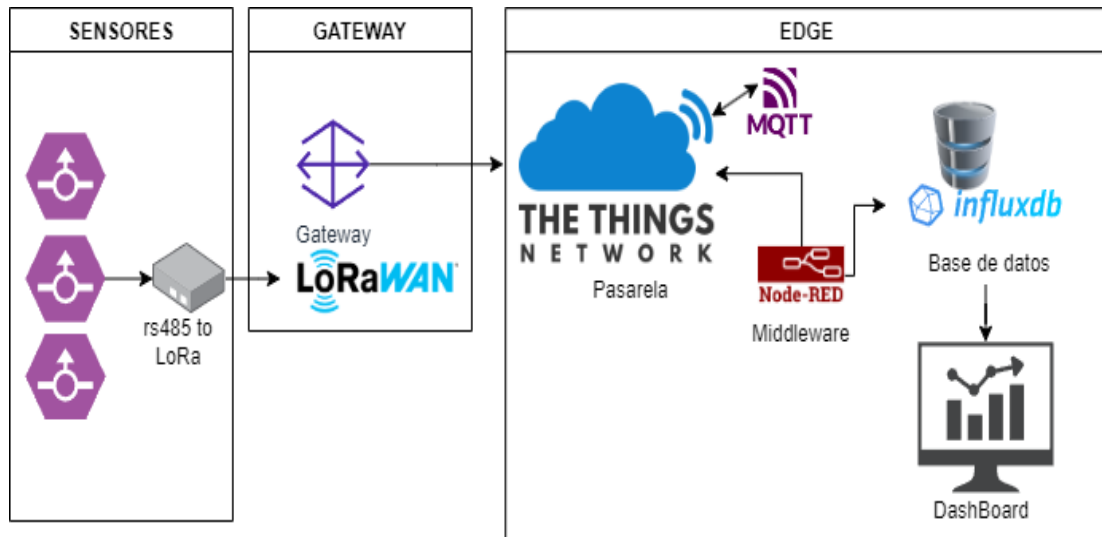
3.3.2. Tecnologías implicadas

El proyecto aplica varias tecnologías relacionadas con internet de las cosas IoT, se han seleccionado por ser de código abierto, por contar con renombre, amplia comunidad colaborativa y amplia documentación disponible en internet.

Como se aprecia en la arquitectura de la figura 10 el proyecto es una mezcla de varios componentes, protocolos y servicios que conforman una arquitectura muy flexible.

3.3.3. Arquitectura, componentes e integración de tecnologías

Figura 10 Arquitectura de la solución



Fuente: Elaboración propia

La arquitectura de este proyecto se define como un patrón de arquitectura de administración y conectividad de borde mediada por puerta de enlace.

Este patrón de arquitectura permite localización de operaciones y controles (análisis e informática perimetrales). Su principal beneficio es reducir la complejidad de los sistemas IIoT, de modo que puedan escalar tanto en número de activos y en redes. La puerta de enlace es un punto de agregación donde es posible implementar localmente parte del procesamiento de datos, el análisis y la lógica de control (Lin et.al.,2017, p.47)

En la figura 10 se observa una red tipo estrella con Gateway central, el Gateway gestiona la conectividad entre los dispositivos y la pasarela y el middleware es encargado de enrutar los datos entre la pasarela y la base de datos.

Como se mencionó en la sección 2.3 referente a Tecnologías relacionadas con el proyecto, en esta arquitectura se utiliza la plataforma o pasarela llamada The Things Network. En esta arquitectura, dicha plataforma integra dispositivos finales y crea un tópico específico en un bróker incorporado en la plataforma. Cada dispositivo tiene la capacidad de publicar y obtener datos en dicho tópico, y las aplicaciones interactúan con la plataforma.

Es importante destacar que la pasarela no almacena los datos, sino que los retransmite inmediatamente después de recibirlos, y el bróker es el encargado de publicar en las aplicaciones utilizando el protocolo MQTT.

Para llevar a cabo los procesos de transformación de los datos, es necesario implementar un middleware. En este caso, se utiliza Node-Red con este propósito. Node-Red se encarga de interactuar entre todos los componentes de la capa de aplicación, como las bases de datos, los paneles de visualización y el bróker de la pasarela.

En este proyecto, el servidor se encuentra ubicado en la red local, lo que permite manejar los datos en el borde; el middleware, la base de datos, los paneles de visualización e incluso la pasarela LoRaWan TTN pueden implementarse localmente. Esto es una posibilidad atractiva para empresas que desean mantener la máxima privacidad de los datos o evitar costos de computación en la nube. Sin embargo, es posible configurar el middleware para enviar los datos a una nube como Google Cloud o Azure y así aprovechar todas las capacidades de los servicios en la nube, tales como, analítica, bussines intelligent, machine learning, Inteligencia artificial entre otros.

3.3.4. Resultados esperados









Se espera como resultado del proyecto un sistema fiable de adquisición de datos de consumo eléctrico, con tableros de visualización que muestren de manera simple y comprensible el comportamiento del sistema en diferentes líneas de tiempo, que permita agregar fácilmente nuevos puntos de medición en toda la infraestructura a monitorear.


3.3.5. Presupuesto y retorno esperado de la inversión

3.3.5.1. Costo total por Nodo Individual

En la tabla 1 se desglosan los componentes y su costo asociado para construir un nodo de medición inteligente con conectividad LoRaWan. La arquitectura se basa en una topología de estrella de nodos distribuidos en los distintos puntos a monitorear, es decir que el costo total depende del número de puntos a monitorear.

Tabla 1 Presupuesto de componentes por nodo

ID		ELEMENTO	UND	CANT	PRECIO DOLLARS	TOTAL
1		Transformador de corriente de núcleo dividido CT	und	3	\$ 3.00	\$ 9.00
2		Medidor trifásico rs485 sdm63oct - riel tipo din	und	1	\$ 43.00	\$ 43.00
3		Riel metálico perforado	mts	1	\$ 1.00	\$ 1.00
4		Interruptor termomagnético unipolar x30a para riel tipo din	und	1	\$ 3.00	\$ 3.00
5		Transceptor Rs485- LoRa	und	1	\$ 125.00	\$ 125.00
6		Toma corriente de sobreponer 3hilos	und	1	\$ 1.00	\$ 1.00
7		Caja de paso termoplástica IP68 30x30 cm	und	1	\$ 20.00	\$ 20.00
8		Bornera de 12 posiciones de tornillo	und	1	\$ 1.00	\$ 1.00


9		Cable AWG calibre 12	mts	3	\$ 1.00	\$ 3.00
TOTAL						\$ 206.00

Fuente: Elaboración propia

3.3.5.2. Costo del equipo de acceso o Gateway

En este punto, se desglosa el costo del Gateway de manera independiente, se debe tener en cuenta que gracias a la amplia distancia de cobertura típica de la tecnología LoRa, con un solo Gateway se pueden cubrir suficientes nodos de monitoreo para esta solución.

Tabla 2 Costo del Gateway




ID	IMAGEN	ELEMENTO	UND	CANT	PRECIO DOLLARS	TOTAL
1		Gateway LoRa UG65 Indoor	und	1	\$ 460	\$ 460
TOTAL						\$ 460

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5.3. Costos Opcionales

Se denominan costos opcionales, debido a que la flexibilidad del sistema permite desplegar los servicios en la nube, o porque son elementos usuales para el funcionamiento de las industrias. Es decir, que en algunas implementaciones pueden variar los costos si cuentan con servidor o si deciden desplegar los servicios en la nube.

Tabla 3 Costos por adecuación de espacios para instalación de equipos

ID	IMAGEN	ELEMENTO	UND	CANT	PRECIO DOLLARS	TOTAL
1		Rack gabinete de 9RU + PDU	und	1	\$ 61	\$ 61
2		Servidor Dell Poweredge T40 Intel Xeon 3.5ghz 8gb 1tb	und	1	\$ 1100	\$ 1100
3		UPS 1500VA- 900W entrada y salida de 100V - 110V - 120V	und	1	\$ 116	\$ 116
TOTAL						\$ 1277

Fuente: Elaboración propia

Los costos descritos se resumen en \$ 206 dólares para la implementación de cada nodo. Cada nodo está diseñado en su caja permitiendo la instalación en cualquier área o tablero eléctrico de la red. La escalabilidad de la red es muy alta, simplemente se deben construir la cantidad de nodos por cada punto a monitorear que se necesite.

El Gateway seleccionado para esta solución tiene un costo de \$ 460 dólares y una capacidad para administrar hasta 2000 nodos, una cantidad suficiente para la mayoría de aplicaciones industriales. Normalmente, los Gateway de LoRa tienen la capacidad de gestionar miles de equipos.

Los costos denominados opcionales suman \$ 1277 dólares ya que se propone la adquisición de un servidor. Sin embargo, dicha decisión depende del tipo de solución a implementar, puesto que podría aplicarse este proyecto en una placa raspberry pi ahorrando aún más

gastos. Todo depende de la manera como se despliegan los servicios. En secciones posteriores se profundizará sobre estas actividades.

3.3.5.4. Retorno de la inversión

El retorno de la inversión (ROI) de este proyecto, está dado por la toma de decisiones basada en datos en tiempo real. El monitoreo de distintos puntos de la red de manera flexible en entornos industriales de área amplia, permite realizar una comparativa de consumo de energía y proyectar planes de eficiencia energética dentro de las políticas de calidad y gestión de la energía de las empresas o industrias que implementen el proyecto. El ROI, se logra al establecer metas de ahorro energético para reducir porcentualmente el consumo, dependiendo de los datos monitoreados con este sistema. En secciones posteriores se abordarán de manera más precisa los cálculos correspondientes al retorno de inversión esperado.

Para establecer una meta de eficiencia energética relacionada con el consumo de ahorro de energía eléctrica, se consultaron algunos recursos bibliográficos como el de (Salazar et al., 2018) titulado "Análisis de Medidas de Ahorro de Energía en una empresa de producción". En este trabajo, los autores analizan posibles medidas de ahorro de energía en una empresa manufacturera con el objetivo de brindar recomendaciones para la implementación de programas de ahorro de energía, especialmente en relación con el consumo de electricidad. Este trabajo identificó recomendaciones y planes a seguir, sugiriendo ahorros energéticos en torno al 25% respecto al consumo energético medio actual de las empresas estudiadas. En este trabajo se concluye que la implementación de estrategias como cambiar las tecnologías de iluminación, modernización de motores y el cambio de hábitos de apagado de dispositivos son suficientes para alcanzar los porcentajes recomendados.

Por otro lado (Gómez, 2017, p. 51) en el informe titulado "Propuesta metodológica para el desarrollo de planes nacionales de eficiencia energética para los países del sistema de la integración centroamericana (SICA)", define dentro de los objetivos denominados objetivos conservadores, la posibilidad de "una reducción del 10% en el consumo eléctrico en el sector industrial mediante la introducción de motores de alta eficiencia". De este objetivo, se puede deducir que la industria puede superar los porcentajes recomendados, utilizando esta recomendación en complemento con otras estrategias internas.

Finalmente, en el artículo (Pavas Martínez et al., 2017) artículo titulado “Cuantificación del ahorro de energía eléctrica en clientes residenciales a través de acciones de gestión de la demanda”, se calculó el ahorro potencial de electricidad para clientes residenciales en el área de Bogotá-Colombia y concluyó que el consumo de electricidad podría reducirse entre un 6 % y un 26 % reemplazando equipos de uso diario, entre un 7 % y un 19 % cambiando los patrones de consumo y entre 17% y 45% como ahorro total posible.

Analizando los recursos de la literatura anterior para calcular el retorno de la inversión, en este trabajo se determinó que, aplicando diferentes estrategias de ahorro de energía, con el apoyo del sistema de monitoreo en tiempo real desarrollado en este proyecto, se puede establecer un objetivo de ahorro de energía eléctrica del 10% como una meta coherente y alcanzable.

Una vez argumentado este 10% basado en los trabajos presentados, se usará dicho porcentaje para calcular en retorno de la inversión del proyecto en secciones posteriores.

Planificación general

Figura 11 Cronograma de tiempos



Fuente: Elaboración propia.

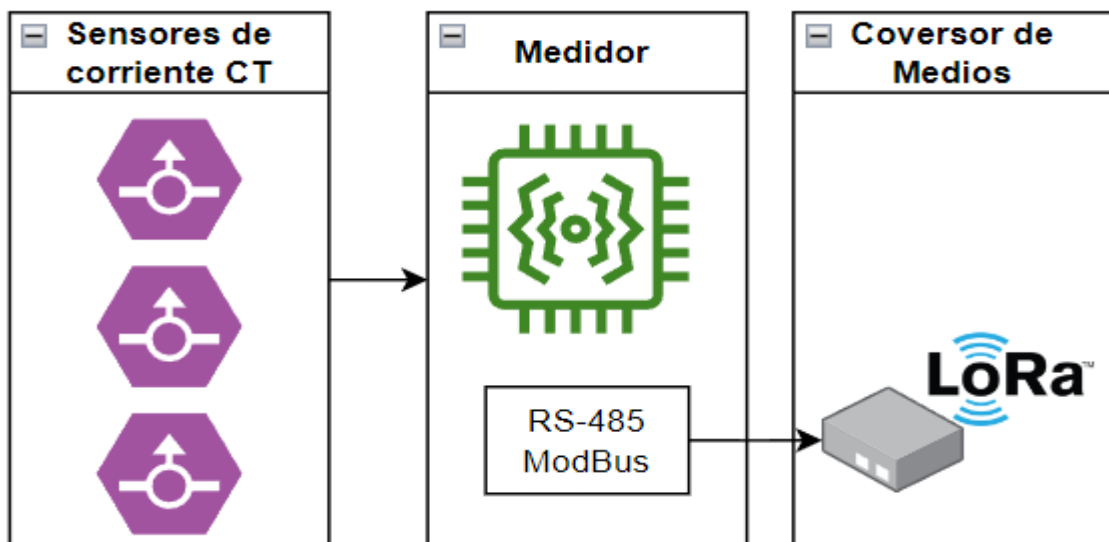
La planificación del proyecto tiene en cuenta el desarrollo incremental junto con las fases propuestas en la metodología. Las fases de análisis y diseño corresponden a un 25% aproximado del tiempo total, pues en ella se debe decidir si las tecnologías seleccionadas son suficientes para lograr los resultados esperados. Mas de la mitad del tiempo total del proyecto

corresponde a la fase de implementación. Cada fase debe alcanzarse en tiempos cercanos a 2 semanas de trabajo en donde la implementación del nodo y la integración en la plataforma suponen retos interesantes por la aplicación de nuevas tecnologías y el uso de plataformas y servicios novedosos. Finalmente, el desarrollo del código permitirá la finalización del proyecto dejando entre el 15 o 20% del tiempo total del proyecto para la verificación y ajustes del sistema.

4. Desarrollo específico de la contribución

4.1.1. Construcción del Nodo de medición

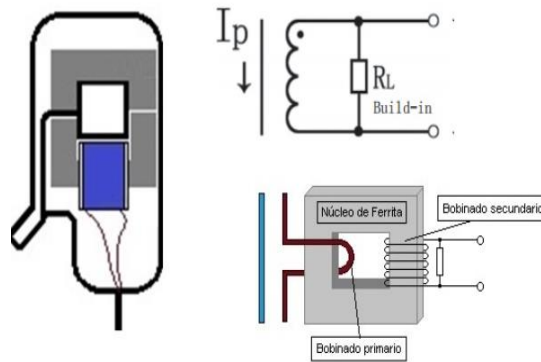
Figura 12 Diagrama Nodo de medición



Fuente: Elaboración propia.

El nodo de medición consta de 3 partes principales, los sensores de Medición, una unidad de procesamiento que recoge y procesa las mediciones de los sensores y un conversor de medios que envía los datos de medición al Gateway LoRa.

Figura 13 Diagrama sensor transformador de corriente



Nota: Sensor de núcleo dividido comparado con un transformador de corriente convencional. (naylampmechatronics, 2023)

Los sensores de medición de corriente funcionan como un transformador convencional, se les conoce como transformadores de núcleo dividido. El campo magnético generado por la corriente que fluye por el conductor se compara con el bobinado primario de un transformador convencional. El bobinado secundario amplifica o disminuye proporcional al número de vueltas del bobinado primario generando una tensión proporcional a la tensión de entrada. A este tipo de sensores también se les conoce como sensores no invasivos, su núcleo dividido permite que puedan acoplarse al cable a medir sin necesidad de cortar la continuidad del conductor. Para este proyecto se usa un sensor “EASTRON ESCT-T 1/5A”, este sensor tiene una relación 1:5 reduciendo a niveles seguros la corriente medida en el bobinado primario.

Figura 14 Vistas medidor de energía trifásico SDM630MCT



Fuente: (Eastron Electronic Co, 2023)

Los sensores de corriente entregan una medida de voltaje proporcional a la entrada, pero el medidor requiere una unidad de procesamiento lógico (CPU) como un microcontrolador o

similar. La unidad de procesamiento es la encargada de ejecutar los algoritmos necesarios para entregar una medida fiable de los valores de tensión, corrientes y demás variables medidas. Existen numerosos proyectos con librerías de código abierto para implementar este tipo de medidores usando microcontroladores, pero en este proyecto se utiliza el medidor SDM630MCT de la marca EASTRON (figura 14) por que garantiza, calibración, precisión, protección de tipo industrial y soporte para distintos protocolos de comunicación etc. Adicionalmente el costo no es significativo comparado con la construcción de un prototipo casero fiable.

Tabla 4 Especificaciones técnicas Medidor SDM630MCT

Brand Name:	Eastron
Model Number:	SDM630MCT V2
Phase:	Three Phase
Output Voltage:	100~280(480)V
Rated current:	1A or 5A/CT Input 330mv
Communication:	RS485 Port MODBUS-RTU Protocol
Dimensions:	72mm*94.5mm*65mm
Installation:	35mm Din Rail multifunction meter
International Standard:	EN62053-21, MID approved
Certificate:	IEC 62053-21 GB/T 17215.321

Nota: El medidor SDM630MCT V2 tiene un rango de sensibilidad de corriente amplio. la tabla es elaborada con las especificaciones técnicas del fabricante. (Eastron Electronic Co, 2023)

En la tabla 4 de especificaciones se destacan 2 aspectos importantes, la sensibilidad mínima de 333mV de corriente y los protocolos de comunicación. En este caso se utiliza el protocolo de comunicación Modbus/RS-485 para comunicarnos con el equipo conversor de medios.

Figura 15 Equipo conversor de medios Modbus/RS-485 a LoRa



Fuente: Elaboración propia

Una vez recibidos los datos desde el medidor trifásico, se entregan al conversor de medios usando el protocolo de comunicación modbus sobre rs485, tanto el conversor como el medidor trifásico cuentan con puerto de conexión para tal fin. El conversor de medios se encarga de recibir y retransmitir los datos recibidos desde el medidor hacia el Gateway. El conversor posee un transceptor y antena diseñados para la transmisión de señales usando la tecnología de radio LoRa.

Tabla 5 Especificaciones técnicas conversor LoRa controller UC1152

Specifications	
Wireless Transmission	
Technology:	LoRaWan
Antenna Connector:	1 × 50 Ω SMA Connectors (Center PIN: SMA Female)
Frequency:	CN470/IN865/EU868/RU864/US915/AU915/KR920/AS923
Tx Power:	16dBm(868)/20dBm(915)/19dBm(470)
Sensitivity:	-147dBm @300bps
Mode:	OTAA/ABP Class C
Data Interfaces	
Ports:	RS232/RS485
UC11 Series Datasheet	
Baud Rate:	4800~115200bps(RS232)/1200~115200 bps(RS485)
Protocol:	Transparent (RS232), Modbus RTU (RS485)
Analog Input	
Input Range:	4~20mA
Resolution:	12 bit
Others	
Configuration:	Port 1 × Micro USB
Power Connector:	3.5mm Terminal Block
Power Supply:	5-24 VDC
Dimensions:	79 × 60 × 24 mm

Fuente: (Ursalink, 2023)

En la tabla 5 de especificaciones se muestra que el convertor para tecnología LoRaWan, soporta distintas bandas de frecuencia entre ellas 915Mhz. En cuanto al nivel de sensibilidad del receptor, el equipo cuenta con una sensibilidad de -147dBm, una sensibilidad bastante alta comparada con transceptores de otras tecnologías.

Según el reporte Nacional De Atribución De Bandas de Frecuencia CNABF (Agencia Nacional del Espectro, 2022, pág. 52) la banda de 908Mhz – 915Mhz es atribuida a la banda de radioaficionados. En el mismo informe (pág. 103) se designa el espectro comprendido entre 902Mhz y 928Mhz dentro de la banda para aplicaciones industriales, científicas y médicas por sus siglas ICM . Por lo tanto, este dispositivo puede configurarse para funcionar libremente en la banda AU915.

Figura 16 Pantallazo configuración del equipo LoRa Controller UC1152

Device EUI	<input type="text" value="24E124"/>
App EUI	<input type="text" value="24E12"/>
Application Port	<input type="text" value="85"/>
RS232 Port	<input type="text" value="86"/>
Working Mode:	<input type="text" value="Class C"/>
Join Type	<input type="text" value="OTAA"/>
LoRaWAN Version	<input type="text" value="V1.1.0"/>
Application Key	<input type="text" value="*****"/>
Spread Factor	<input type="text" value="SF8-DR2"/>

Fuente: Elaboración propia

Para la configuración de este equipo se deben configurar los parámetros DevEUI y OTAA, se trata de un identificador único similar a la MAC de los dispositivos y de un procedimiento de unión OTAA respectivamente. En la sección siguiente se describirán estos términos con más profundidad.

El ultimo parámetro denominado Spread Factor o factor de propagación, está relacionado con la técnica de modulación que controla el ancho de banda y la velocidad de transmisión que tendrán los datos. En este caso el equipo nos recomienda automáticamente el SF8.

Una vez configurado el equipo este reenviará los mensajes recibidos desde el medidor trifásico hacia el Gateway.

Figura 17 *Nodo de medición completo*



Nota: Nodo de medición finalizado ensamblado en caja termoplástica para la fácil ubicación, cercana a cualquier tablero de distribución.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 17 se observa el nodo finalmente construido, consta de los tres elementos principales antes descritos: los sensores de corriente de núcleo dividido, el dispositivo contador de energía trifásico instalado en un riel metálico tipo DIN, y el equipo conversor de medios. Los demás componentes corresponden a una toma eléctrica para la conexión del cargador del equipo conversor y un interruptor termomagnético para proteger la instalación y facilitar las manipulaciones futuras. El conjunto de elementos se instaló dentro de una caja de paso termoplástica con protección IP68. Todos los equipos usados tienen calidad industrial para asegurar la calidad y durabilidad de la instalación.

4.1.2. Integración en la plataforma LoRaWan

4.1.2.1. Configuración del Gateway

Figura 18 Gateway Indoor LoRaWan de 8 Canales UG65



Fuente: (Milesight, 2023)

El Gateway es el dispositivo central encargado de gestionar los datos recibidos desde los dispositivos finales. LoRaWan implementa una topología de estrella, siendo el Gateway el equipo central de la topología quien retransmite los datos desde los dispositivos hacia las aplicaciones. En este proyecto se utiliza el Gateway de la marca Milesight Modelo UG65 (Figura 18).

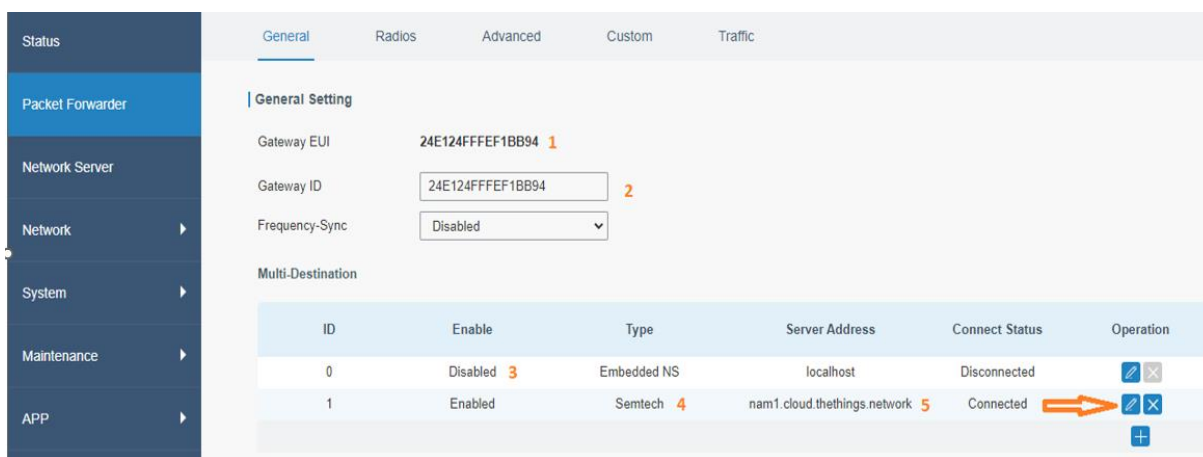
Según el fabricante, el Gateway UG65 es un Gateway LoRaWan Semi-industrial, diseñado específicamente para interiores y cuenta con 8 canales de recepción. Esta puerta de enlace utiliza el chip SX1302 LoRa y una CPU de cuatro núcleos de alto rendimiento, lo que le permite conectarse con más de 2000 nodos. UG65 tiene alcance de hasta 15 km en línea de visión y puede cubrir aproximadamente 2 km en entornos urbanos, ideal para aplicaciones en oficinas inteligentes, edificios inteligentes y otros entornos interiores.

Dentro de los procesos de configuración de dispositivos en las plataformas que usan la arquitectura LoRaWan, se deben tener claro algunos conceptos:

Siempre se usa el EUI, “Un identificador global único extendido comparable con la dirección MAC de los dispositivos, que se construye con base a la identificación de los fabricantes” (IEEE, 2017). Los procesos de autenticación usan OTAA (Over-The-Air Activation) “OTAA es un

método de intercambio de mensajes entre un servidor de la plataforma y los dispositivos finales, se usa en el proceso de unión al momento de integrar los dispositivos” (Na et al., 2017). Las plataformas complementan estos procesos de unión con la creación de llaves denominadas APIKEY para identificar y autenticar los dispositivos y aplicaciones en la plataforma.

Figura 19 Configuración básica del Gateway



Fuente: Elaboración propia

En la figura 19 se observa la configuración básica del Gateway, se puede observar la identificación EUI como el identificador único del fabricante para este equipo Gateway, y en la parte inferior de la imagen, se observa el campo Server Address con la habilitación de un dominio correspondiente a “The Things Networks”. Esta configuración indica que el Gateway será usado como un reenviador de paquetes, que enviará los datos recibidos desde los dispositivos finales y sensores hacia la plataforma TTN.

Este Gateway no requiere mayores configuraciones en el modo “Packet forwarder”, esto significa que el equipo es similar a un repetidor.

Por otra parte, este equipo tiene 8 canales preconfigurados en distintas frecuencias para recibir múltiples dispositivos finales, por lo que puede recibir varios dispositivos simultáneamente.

El parámetro spread factor, está configurado de manera automática. En la figura 20 se puede observar la distancia del radioenlace, en este caso el área de cobertura está muy por debajo

de la distancia de cobertura máxima de los dispositivos emisor (Transceptor) y el receptor (Gateway), por lo que la calidad del enlace es muy alta y no presenta problemas de transmisión.

Figura 20 Distancia entre nodo emisor y Gateway receptor.



Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2. Integración con la plataforma The Things Networks

El equipo Gateway reenvía todos los paquetes que recibe sin discriminar de que dispositivo proviene, incluso la plataforma TTN al ser una red colaborativa, integra las puertas de enlace de los usuarios como parte de su infraestructura, puede considerarse esto como una retribución de los usuarios por usar la plataforma. De esta manera el proyecto cuenta con puntos de acceso en distintas partes del mundo y amplía su cobertura cada día.

Figura 21 Captura registro de Gateway en TTN

Register gateway

Register your gateway to enable data traffic between nearby end devices and the network.

Learn more in our guide on [Adding Gateways](#).

Gateway EUI [?](#)

No gateway EUI

Reset

Gateway ID [?](#) *

my-new-gateway

Gateway name [?](#)

My new gateway

Frequency plan [?](#) *

Australia 915-928 MHz, FSB 2 (used by TTN)



Require authenticated connection [?](#)

Choose this option eg. if your gateway is powered by [LoRa Basic Station](#)

Share gateway information

Fuente: Elaboración propia

La plataforma TTN requiere registrar el Gateway y los dispositivos, para el caso del Gateway solo se requiere ingresar el identificador EUI y seleccionar el plan de frecuencia para la zona específica, para sur América la banda 915-928Mhz es la adecuada.

Figura 22 Captura integración de dispositivo final en TTN

The screenshot shows the 'Provisioning information' section of the TTN console. It contains four main fields:

- JoinEUI:** A field with eight empty hex slots and a 'Reset' button.
- DevEUI:** A field with eight hex slots containing the value '70 B3 D5 7E D0 05 E6 B6', a 'Generate' button, and a '3/50 used' indicator.
- AppKey:** A field with sixteen hex slots containing the value 'F1 BF AB 51 1E E4 47 7D C8 F5 48 DE 37 D0 D3 C9' and a 'Generate' button.
- End device ID:** A text input field containing the value 'eui-70b3d57ed005e6b6'.

Below the End device ID field, there is a note: 'This value is automatically prefilled using the DevEUI'.

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, los dispositivos finales se registran utilizando el parámetro de identificación única DevEUI y AppEUI. El APIKEY es generado por la plataforma para lograr autenticación de los dispositivos de manera segura (figura 22).

Una vez los dispositivos están registrados, la plataforma empieza a recibir la información enviada por los dispositivos a través del Gateway, la plataforma abstrae el usuario de casi toda la configuración de parámetros de la arquitectura LoRaWan, e intercambia parámetros con los dispositivos finales a través de distintos formatos. El formato JSON es uno de los más usados. La figura 23, muestra un ejemplo muy resumido de cómo se recibe la información de los dispositivos, normalmente en el campo payload se encuentra la información de los sensores.

Figura 23 Estructura de ejemplo Formato JSON

```
{
  "device_id": "Monitor_corriente",
  "dev_eui": "24E1241xxxx",
  "uplink_message": {
    "frm_payload": "AQAACQEA/w4ZJgNDEKj/DhomA80YJf80GyYEQ/Cv/V",
    "decoded_payload": {
      "Temperature": 28.0,
      "Humidity": 75.0,
      "bytes": [
        1,
        0,
        255,
        14,
      ]
    }
  }
}
```

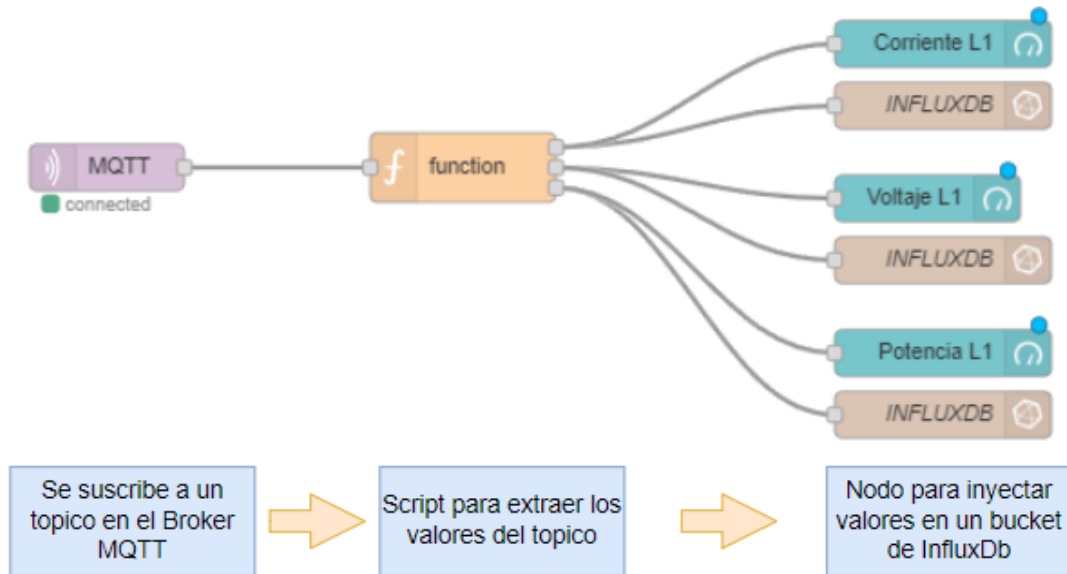
Fuente: Elaboración propia

Otra característica a destacar de la plataforma TTN, es que cuenta con un bróker MQTT disponible para configurar el intercambio de mensajes con información de los dispositivos.

Todos los dispositivos generan un endpoint conocido como “topic” para el intercambio de información entre los dispositivos y las aplicaciones.

4.1.3. Desarrollo del código y pruebas de integración

Figura 24 Flujo Node-Red de conexión resumido



Fuente: Elaboración propia

El flujo necesario para desarrollar el código para conectar las aplicaciones con los dispositivos finales se resume en la figura 24. El flujo completo para configurar todo el sistema se puede encontrar en los anexos. Se puede dividir el código en tres etapas funcionales: en la etapa 1 un nodo MQTT Input, recibe los mensajes MQTT, este el nodo se conecta al bróker MQTT de TTN y recibe los mensajes publicados en ese tópico.

En la etapa 2, el nodo función ejecuta el código personalizado para manipular los mensajes y retornar los valores deseados, en la imagen se puede observar que se asignan 3 salidas a este nodo, en donde se retornarán los valores de Corriente, voltaje y potencia obtenidos de la publicación anterior.

En la etapa 3, el nodo de salida InfluxDB, es un nodo preconfigurado para guardar los mensajes recibidos desde el nodo function, a un espacio de InfluxDB denominado bucket. El bucket es como un contenedor o espacio de almacenamiento para guardar los datos.

4.1.3.1. Nodo function

El nodo function es el nodo principal, en él se desarrolla el código necesario para procesar y extraer los datos relevantes del proceso.

En la línea de código siguiente, se observa que los datos pueden venir cifrados o codificados. Frecuentemente es necesario decodificar los datos antes de procesarlos, en este caso, los datos se obtienen en un formato denominado binario con punto flotante, ya que los datos del medidor son números decimales y la transmisión se ejecuta en bytes. A continuación, se observa un fragmento de la línea recibida con el arreglo de bytes.

```
"bytes": [1,0,0,9,1,0,255,14,25,38....  
          ] // payload recibido desde el equipo conversor de medios.
```

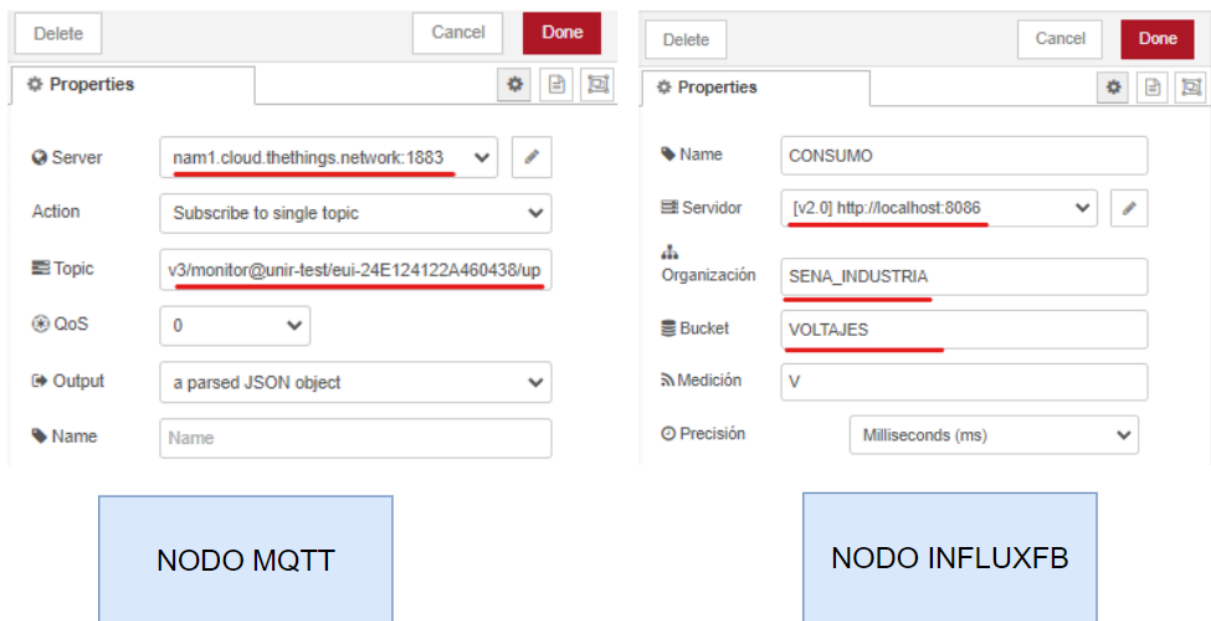
A continuación, se observa un fragmento recortado del código para entender cómo se implementa en el nodo function la decodificación de los datos. Este es el código necesario para transformar los datos entre los formatos adecuados. El código completo se puede observar en los anexos.

```
// Convertir los bytes en un Buffer  
const bytes = Buffer.from(msg.payload.uplink_message.decoded_payload.bytes);  
  
// Obtener el signo del número  
signo = parseInt(binario[0]);  
  
// Obtener el exponente del número  
exponente = parseInt(binario.slice(1, 9), 2) - 127;  
  
// Obtener la mantisa del número  
mantisa = 1 + binario.slice(9, 32);  
  
n2 = 0;  
  
// Calcular la parte entera y decimal del número  
if (exponente >= 0) {  
  entera = mantisa.slice(0, exponente + 1);  
  decimal = mantisa.slice(exponente + 1);  
  n1 = parseInt(entera, 2);  
  i = 0;  
  
// Calcular el resultado final sumando la parte entera y decimal
```

```
resultado = n1 + n2;  
  
msg.payload = Math.round(resultado);  
  
// Devolver el mensaje modificado  
return msg;
```

En la notación de punto flotante, un número se descompone en tres partes principales: el signo, el exponente y la mantisa. La mantisa contiene los dígitos significativos del número, es decir, los dígitos que representan su parte fraccionaria. En el código anterior se obtienen estos 3 valores, la variable mantisa almacena una cadena de dígitos binarios, que representan la parte fraccionaria del número en el formato de punto flotante, para finalmente convertir cada dígito binario en el decimal preciso que representa las medidas enviadas por el equipo medidor a través del conversor.

Figura 25 Captura Configuraciones adicionales de los nodos



Fuente: Elaboración propia

La mayoría de nodos requieren una configuración adicional, estas configuraciones corresponden a los parámetros únicos de cada nodo. En la figura 25 se observa que el nodo MQTT requiere la configuración del servidor al cual se va a conectar y el tópicos al que se va a

suscribir. Según la documentación de TTN, el bróker genera los tópicos de manera automática combinando los valores como sigue:

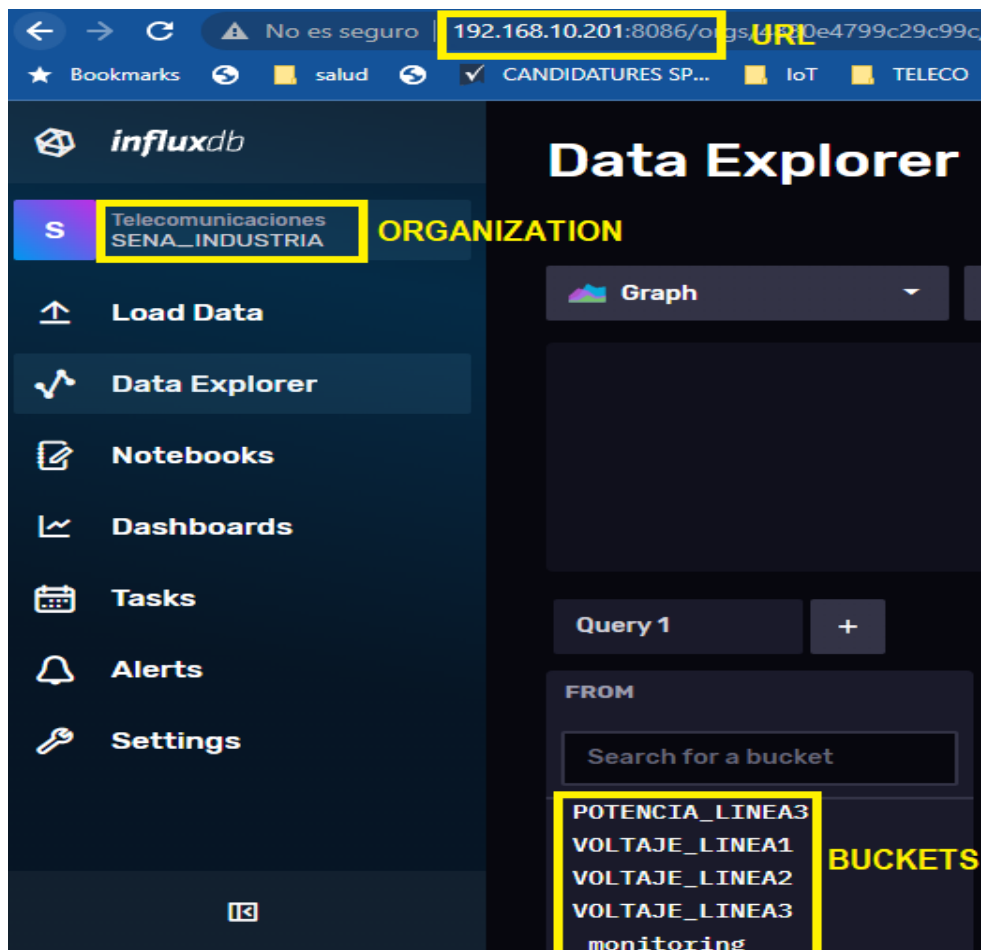
- Topic `v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/up`

Los valores de application, tenant y device_id de la línea anterior, son obtenidos todos desde la propia plataforma.

El flujo de configuración completo se puede observar en los anexos.

Del mismo modo, el nodo InfluxDB requiere la configuración de las URL del servidor de InfluxDB al que se conectará, la organización y el bucket en el que se guardarán los datos.

Figura 26 Captura de pantalla InfluxDB 2.0



Fuente: Elaboración propia

Los parámetros a configurar en el nodo InfluxDB corresponden a la URL, la Organización y el bucket, como se resaltan en la figura 26. Una organización es un espacio de trabajo para un

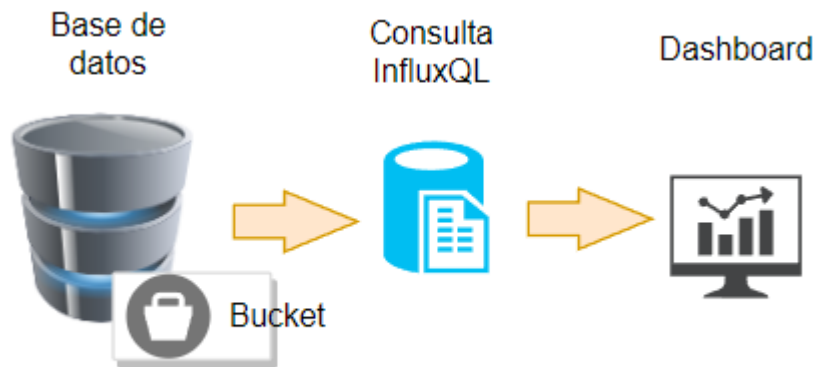
determinado número de usuarios. Los dashboard, el bucket y los usuarios pertenecen a una organización.

La URL hace referencia a la dirección IP o dominio y el puerto en el que se ha habilitado el servidor de InfluxDB. El bucket nos permite separar los datos como tablas de bases de datos convencionales.

Al igual que en TTN, aquí también es necesario generar APIKEY para la autorización de integración con servicios de terceros, en este caso, los nodos de Node-Red deben incluir el APIKEY para permitir la conexión entre ambas aplicaciones.

4.1.4. Desarrollo de los dashboard de visualización

Figura 27 Diagrama de conexión Grafana a InfluxDB



Fuente: Elaboración propia

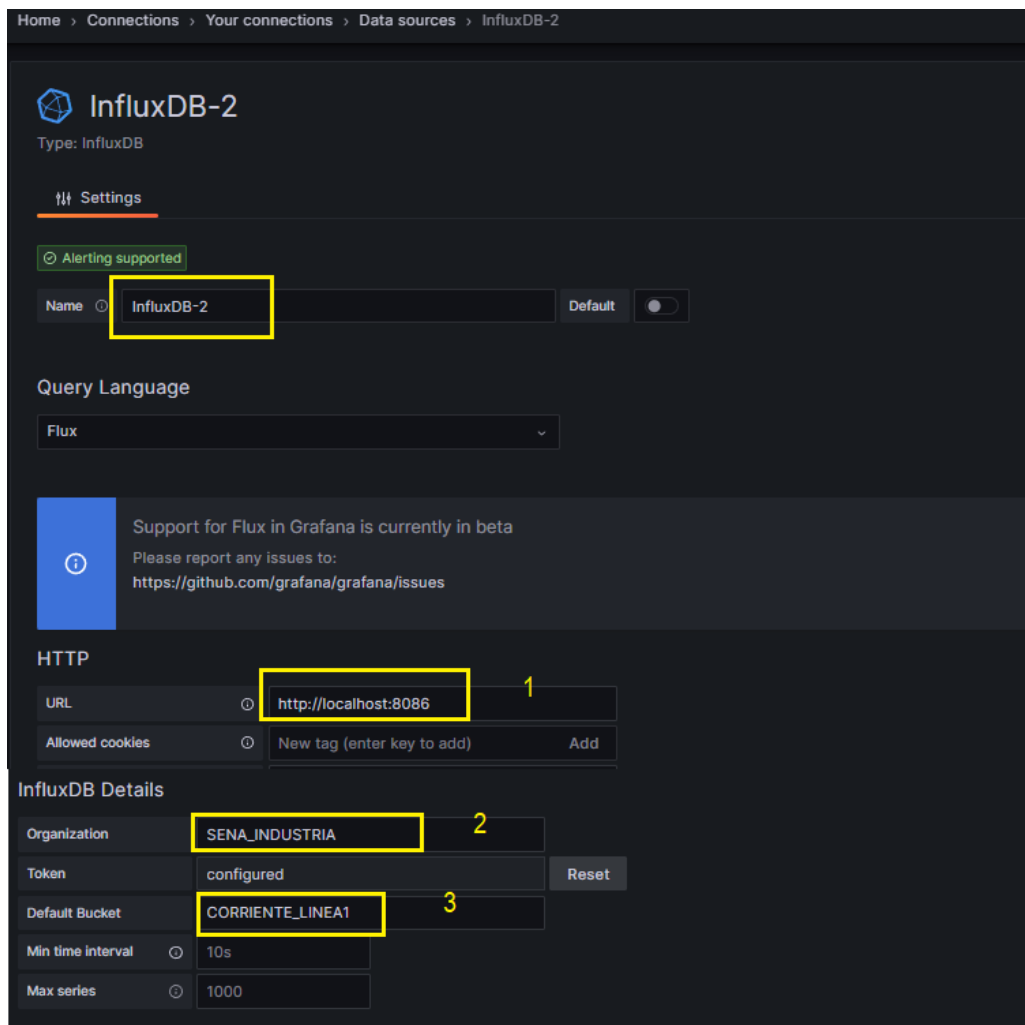
Grafana permite convertir los datos de series temporales (TSDB) en gráficos y visualizaciones. Como se observa en la figura 27, el funcionamiento típico de Grafana consiste en establecer la conexión a fuentes de datos, en este caso a InfluxDB.

Una vez establecida la conexión, permite realizar consultas en múltiples lenguajes de consulta. En este caso, el lenguaje usado es el lenguaje nativo FluxQL. Las consultas permiten transformar los datos, agregar filtros de tiempo y condiciones para extraer los datos relevantes y mostrarlos de manera resumida.

Con los datos extraídos, se construyen paneles que muestran los datos en forma de gráficos, tablas, medidores, mapas, entre otros tipos de visualizaciones.

Se pueden crear múltiples paneles en un tablero para mostrar diferentes métricas y datos. Estos paneles pueden ser interactivos, se pueden aplicar zooms, cambiar escalas, seleccionar rangos de tiempo y utilizar herramientas de navegación para obtener información detallada de los datos.

Figura 28 Panel configuración Grafana



Fuente: Elaboración propia

En la figura 28 se observan 3 parámetros importantes para realizar la configuración y la conexión entre Grafana e InfluxDB. El primero corresponde a la dirección IP del equipo donde está corriendo el servicio de la base de datos, el segundo es el nombre de la organización, este parámetro corresponde a la configuración de InfluxDB (Figura 25). El tercer parámetro corresponde al bucket con el que se conectará el panel. La configuración solicita el usuario y

contraseña de la aplicación, aunque en la figura no se muestra. En el campo “Query lenguaje” es importante recordar, que se debe seleccionar el lenguaje de consulta nativo FluxQL.

Una vez terminada la conexión, es posible realizar una consulta para verificar que la conexión esté funcionando correctamente en Grafana. Los paneles estan asociados a las consultas sobre los datos almacenados en la base de datos.

```
// Consulta den influxQL para obtener los datos en un periodo de 2 dias
from(bucket: "CORRIENTE_LINEA1")
  |> range(start: -2d)
  |> filter(fn: (r) => r["_measurement"] == "A")
  |> filter(fn: (r) => r["_field"] == "value")
  |> aggregateWindow(every: v.windowPeriod, fn: mean, createEmpty: false)
  |> yield(name: "mean")
```

El fragmento de código anterior, es un ejemplo de consulta en lenguaje FluxQL para un rango de tiempo de 2 días de información en el bucket seleccionado.

```
|> filter(fn: (r) => r["_measurement"] == "A")
```

El fragmento de la línea anterior, aplica un filtro a los datos seleccionados. Solo se incluirán los registros que tengan un campo “_measurement” con el valor "A". Esto permite seleccionar específicamente los datos relacionados con la medición "A".

```
|> aggregateWindow(every: v.windowPeriod, fn: mean, createEmpty: false)
```

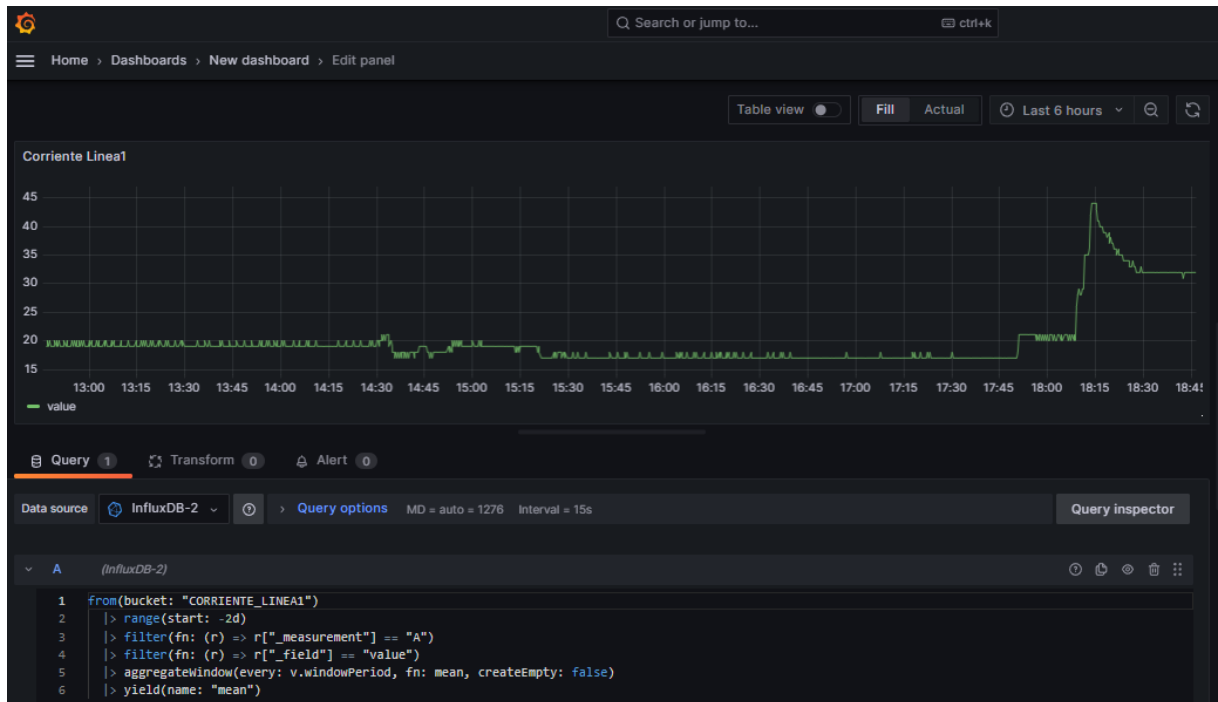
Esta línea agrega los datos en ventanas de tiempo. “v.windowPeriod” representa el tamaño de la ventana de tiempo definida en el panel de Grafana, y la función mean indica que se calculará el promedio de los valores en cada ventana. El parámetro “createEmpty: false”, especifica que no se generarán ventanas vacías en caso de que no haya datos disponibles.

```
|> yield(name: "mean")
```

Finalmente, se utiliza “yield” para devolver los resultados de la consulta. En este caso, se devuelve un flujo de datos llamado "mean", que contiene los promedios calculados en cada ventana de tiempo.

Una consulta como la descrita anteriormente, genera paneles automáticos de visualización como el de la figura 29.

Figura 29 Captura de una consulta visualizada en Grafana



Fuente: Elaboración propia

En la figura 30 se observa el panel final construido para este proyecto, se trata de un panel que utiliza distintos gráficos para visualizar el comportamiento completo del sistema en una sola pantalla.

En la parte superior, se ubicaron los gráficos denominados Gauge o gráficos de indicador, estos gráficos están mostrando los valores correspondientes a los voltajes de cada una de las fases del sistema trifásico. De la gráfica, se puede deducir que están muy equilibrados los voltajes.

En el sitio de la implementación, se cuenta con un sistema de energía regulada por lo cual los voltajes entre fase se encuentran balanceados. No obstante, se requiere de una gráfica histórica que permita evaluar el comportamiento de los voltajes de línea a lo largo del tiempo.

Los histogramas y polígonos de frecuencia son una buena forma de representar este tipo de datos, en el panel de la figura 30 se pueden observar algunos diagramas de registros históricos

que detallan el comportamiento de algunas variables, en este caso, el histórico de los valores de corriente y potencia de cada fase.

Figura 30 *Panel Grafana diseño Final*



Fuente: Elaboración propia

La utilidad que proporcionan este tipo de datos, está relacionada con las necesidades de cada proyecto, un ejemplo de ello se puede documentar con el panel mostrado en la figura 31.

Figura 31 *Panel de visualización de consumo diario*



Fuente: Elaboración propia

Este gráfico muestra un histograma con un periodo de 30 días donde se visualizan los consumos totales diarios del proyecto a monitorear, los valores están medidos en Kilowatt/día y existe un periodo de 7 días donde no se registran medidas debido a ajustes del sistema. Sin embargo, es posible normalizar los datos asumiendo un consumo promedio del total de datos registrado.

Por ejemplo: Extrayendo el registro csv del periodo medido, se obtiene el siguiente arreglo:

```
consumo_diario_kW=[81,92,173,41,157,177,169,139,94,87,147,120,187,138,135,47,107,29,75,29,96,103,19,71,128,156] // consumo diario
```

Del arreglo se puede obtener el promedio de consumo.

Se obtuvo un promedio de: **Promedio diario = 107kW**

Con este valor se procede a normalizar los datos faltantes y se calcula nuevamente el consumo total para un periodo de 30 días.

Con los valores normalizados el consumo total de 30 días en Kw es:

$$\text{Consumo total kW} = 3172$$

Este valor se usará para argumentar el retorno de inversión (ROI) de este proyecto.

4.1.4.1. Retorno de la inversión

Figura 32 Documento tarifas precio kW/hora

INFORMACIÓN SOBRE TARIFAS

Enero de 2023



CELSIA COLOMBIA S.A. E.S.P. informa a sus clientes regulados las tarifas de prestación del servicio de energía eléctrica vigentes, calculadas con base en las resoluciones CREG 031/97, 119/07(Fórmula Tarifaria), 101 002, 101 029 y 101 031/2022(Compras de energía), 174/2021(Compras de energía de AGPE y GD), 103/00(Cargos Uso STN), 019/07(IPP), 010/09(IPC), 058/08 y 133/13(Cargos ADD), 180 y 191/14(remuneración comercialización), 229/16(Costos de Comercialización), 036/06(Garantías Financieras), 015 y 085/18, 036 y 199/19(Metodología cargos uso STR SDL), 137/19(aprobación cargos por uso), 012 y 058/20, 101 027 y 101 031/2022 (Opción Tarifaria), 003/21, 105 005/2022 (Subsidios estratos 1-2) y Resoluciones UPME 0355/04 y 013/05(consumos subsistencia)



COSTO UNITARIO DE PRESTACIÓN DEL SERVICIO - CU Y TARIFAS APLICADAS (\$/kWh)

La presente publicación sustituye a la realizada el pasado 16 de enero de 2023

Mercado	Nivel de Tensión	CU Aplicado ¹	Tarifas ²			CU Doble ³		CU Franjas ⁴		
			Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Punta	Fuera de Punta	Mínima	Media	Máxima
Valle del Cauca	NT 1 Propiedad OR	799,00	319,6	399,5	679,15	806,67	796,67	791,33	798,26	805,67
	NT 1 Propiedad Cliente	715,79	286,32	357,9	608,42	722,36	713,49	700,00	715,06	722,36
	NT 2	652,36	--	--	--	655,34	650,28	645,39	651,74	655,34
	NT 3	572,47	--	--	--	578,31	570,44	565,67	571,87	578,31
Costo base de Comercialización (\$/Factura): 14057,14	NT 4	519,81	--	--	--	--	--	512,98	519,22	525,63
	NT 1 Propiedad OR	779,93	311,97	389,97	662,94	--	--	771,84	779,13	786,98
	NT 1 Propiedad Mixta	757,05	302,82	378,53	643,49	--	--	--	--	--
	NT 1 Propiedad Cliente	734,17	293,67	367,09	624,04	--	--	--	--	--
Tolima	NT 1 Mixta sin ADM	728,27	--	--	--	--	--	--	--	--
	NT 2	756,16	--	--	--	--	--	747,62	755,4	763,47
	NT 3	616,39	--	--	--	--	--	608,89	616,73	622,76
	NT 4	511,1	--	--	--	--	--	--	--	--
Costo base de Comercialización (\$/Factura): 8820,39	NT 1 Propiedad OR	779,93	311,97	389,97	662,94	--	--	--	--	--
	NT 1 Propiedad Mixta	757,05	302,82	378,53	643,49	--	--	--	--	--
	NT 1 Propiedad Cliente	734,17	293,67	367,09	624,04	--	--	--	--	--
	NT 1 Mixta sin ADM	728,27	--	--	--	--	--	--	--	--
Costo base de Comercialización (\$/Factura): 8820,39	NT 2	756,16	--	--	--	--	--	747,62	755,4	763,47
	NT 3	616,39	--	--	--	--	--	608,89	616,73	622,76
	NT 4	511,1	--	--	--	--	--	--	--	--
	NT 1 Propiedad OR	779,93	311,97	389,97	662,94	--	--	--	--	--

Nota: tarifas kilowatt/hora para Colombia en el trimestre 1 del 2023. último informe actualizado. (Celsia Colombia S.A. E.S.P y Compañía de Electricidad, 2023)

Según se observa en la figura 32, el precio del kilowatt hora en Colombia promedio es de **800 COP** (pesos moneda colombiana) o **0,19 dólares** con la TRM representativa de junio de 2023.

Dado que el consumo total del mes calculado en la sección anterior fue de **3172 Kw**, esto supone un gasto de **602 dólares** mensuales aproximadamente.

Tomando como referencia lo argumentado en la sección **“3.3.5.4. Retorno de la inversión”** se establece un plan de ahorro de **10%** del consumo total, apoyado en el sistema de monitoreo desarrollado.

Con un plan de ahorro proyectado del **10%** sobre el total mensual calculado anteriormente, se tendría un ahorro mensual de **60.2 dólares** mensuales.

Si se tiene en cuenta el cálculo presupuestal registrado en la sección titulada “Presupuesto y retorno de la inversión”, el costo total del proyecto es de **1943 dólares**, con lo que se obtiene un retorno de la inversión de:

$$ROI = 1943/60,2$$

$$ROI = 32,27 \text{ meses}$$

Pero entonces se advirtió que se debía tener en cuenta que puede no ser necesario incurrir en los gastos de adquisición del servidor y la adecuación de este, dado que el proyecto se puede ejecutar sobre servidores existentes, o sobre equipos de características menores y con menor precio, o incluso como servicio en la nube.

En este caso el retorno de la inversión esperado sería como sigue:

$$ROI = 666/60,2$$

$$ROI = 11,06 \text{ meses}$$

Es decir, que un proyecto con adquisición de servidores, equipos de protección, Gateway y materiales para fabricación del nodo de medición, tendría un retorno de inversión de 32,27 meses, pero puede reducirse a 11,06 meses si se implementa sobre infraestructura existente. Adicionalmente la implementación de nuevos nodos no requiere de adquisición de nuevos Gateway lo que hace que el retorno vaya disminuyendo con la cantidad de nodos implementados.

5. Conclusiones y trabajos futuros de la contribución

Tal y como se plantea en la introducción de este trabajo, el principal problema que aborda este proyecto es la falta de flexibilidad y escalabilidad de las soluciones de monitoreo energético actuales, considerando esto como una característica que desincentiva la inversión en los proyectos de eficiencia energética.

En el desarrollo del estado del arte, se recogen evidencias para determinar por qué las redes cableadas y con dispositivos centralizados se consideran rígidas, dado que exigen el desarrollo de obras de infraestructura y cableado estructurado para su ampliación. Del mismo modo, se argumenta cómo los fabricantes de dispositivos generan problemas en los clientes para la integración de soluciones complejas, debido al uso de protocolos propietarios o firmwares personalizados, lo cual obliga al usuario a usar una única plataforma que quizá no se adapte a sus necesidades.

En cuanto al uso de plataformas de propósito específico, se evidencia que estas pueden generar limitaciones al usuario, dado que la información que este espera analizar, monitorear y representar visualmente puede tener un carácter muy diverso. Es así como se plantea el propósito general del presente trabajo: el desarrollo de un sistema flexible, escalable y de cobertura amplia para el monitoreo del consumo eléctrico utilizando tecnologías de IoT de open source.

Con el desarrollo de las fases presentadas en la sección “desarrollo de la contribución específica” de este proyecto, se consideran alcanzados tanto el objetivo principal como los objetivos específicos propuestos.

Para el objetivo específico número 1 **“Construir un nodo de medición eléctrica inteligente con conectividad LoRaWan, asegurando una arquitectura flexible y de amplia cobertura”**, se implementó un nodo conformado por un medidor de energía trifásico compatible con protocolos Modbus/RS-485 y un transceptor inalámbrico o conversor de medios. Su funcionalidad es convertir un medidor cableado en uno inalámbrico, dotándolo de la capacidad de transmitir la información de las medidas en una red LoRa e integrándolo a una arquitectura LoRaWan. Los componentes de este medidor se encapsularon en una caja termoplástica con protección industrial, con la finalidad de concebir el dispositivo como un

nodo único de medición completo, de fácil transporte y de fácil instalación en cualquier punto a monitorear.

Con el desarrollo de este medidor, se apunta al objetivo general de desarrollar una red de cobertura amplia, ya que al ser un nodo con conectividad LoRa, se aprovecha una de las características principales de este tipo de redes LPWAN, como lo es el amplio rango de cobertura. Además, al convertir el medidor en un nodo, se dota a la red de gran flexibilidad, típica de las redes WSN, dado que se pueden desplazar los nodos a cualquier área o punto a monitorear dentro del área de cobertura. Adicionalmente, los nodos adicionales no requieren cambios en la arquitectura del proyecto ni complejas adecuaciones de infraestructura. Además, los Gateways de tecnología LoRa, incluyendo el utilizado en esta solución, soportan conectividad de miles de puntos simultáneamente, lo que significa que esta red es altamente escalable.

Otra ventaja adicional debida a la implementación de estos nodos de sensores, es que permiten la interacción entre equipos industriales modernos y equipos heredados que funcionan con protocolos de uso común como Modbus u otros protocolos de comunicación industrial.

Dado que LoRa es un protocolo abierto, con amplia disponibilidad de dispositivos en la industria y cada vez con mayor confianza, permite a los usuarios seleccionar el hardware LoRa que mejor se adapte a sus necesidades y presupuesto, lo que resulta en que el cliente tenga la posibilidad de reducir costos en su implementación, en comparación con la obligación de adquirir dispositivos con protocolos propietarios que tienen menos oferta en el mercado.

El segundo objetivo planteado, **"Desarrollar el código necesario para la integración fluida de la plataforma LoRaWan, la base de datos y las interfaces de usuario asegurando la escalabilidad del sistema"**, se llevó a cabo en la sección "Desarrollo del código y pruebas de integración". En esta sección, se implementó un código de programación a través de Node-Red, que permite interconectar todas las plataformas de la solución. El código permite la interconexión entre la pasarela LoRa, las bases de datos y los paneles de visualización. Las características de Node-Red relacionadas con la programación visual por flujos facilitan la replicabilidad del código en estructuras JSON. Para esta solución, solo basta con importar el flujo implementado descrito en los anexos y configurar los parámetros de autenticación de los

dispositivos y la configuración del bróker, los tópicos generados y los nombres asignados en la base de datos InfluxDB. El uso de este middleware aporta a la escalabilidad del sistema, dado que los códigos para la integración de dispositivos son fácilmente replicables. Además, el hecho de que Node-Red funcione sobre Node.js nativo permite que las aplicaciones se puedan diseñar con alta escalabilidad y soporte para gran cantidad de conexiones.

El tercer objetivo específico, "**Asegurar la persistencia de los datos en una base de datos de series, asegurando la disponibilidad y seguridad de los datos**", se alcanza con la implementación de la base de datos InfluxDB. Dentro de la investigación se citaron algunos recursos bibliográficos dedicados a realizar pruebas de rendimiento e idoneidad de esta base de datos, y en el proyecto actual se seleccionó InfluxDB por presentar un gran rendimiento para el procesamiento de datos en tiempo real. Aunque en este proyecto no se envíen grandes cantidades de datos simultáneamente, existe documentación en la red y recursos bibliográficos suficientes que destacan esta característica.

Por otro lado, una característica interesante para el desarrollo de este proyecto es la interoperabilidad con el software Grafana. Grafana reconoce el lenguaje nativo de InfluxDB, por lo que es posible incorporar consultas de manera muy sencilla.

Lo anterior está relacionado con el último objetivo específico, "**Desarrollar interfaces de visualización para el usuario, asegurando la presentación clara y comprensible de los datos**". Este objetivo se cubre en la sección titulada "Desarrollo de los paneles de visualización". El proyecto Grafana está suficientemente desarrollado para interactuar con diferentes fuentes de datos, entre ellas InfluxDB. Actualmente, Grafana tiene extensiones que le permiten acceder directamente a las bases de datos almacenadas en InfluxDB con mínimos parámetros de configuración. Aunque Grafana tiene su propio lenguaje de consulta, también soporta el lenguaje de configuración nativo de InfluxDB llamado FluxQL. Esto sintetiza mucho más el proceso de desarrollo de los paneles de visualización. En esta sección se pudo observar la manera simple de construir paneles de visualización de los datos almacenados. Adicionalmente, se seleccionaron del repositorio de gráficos nativo de Grafana aquellos que podrían representar los parámetros más relevantes al momento de evaluar el funcionamiento del sistema, como voltajes, corrientes y potencias monitoreadas en cada fase del nodo sensor trifásico.

En resumen, con el desarrollo y los objetivos específicos alcanzados, se logra el objetivo general de desarrollar un sistema flexible, escalable y de cobertura amplia para el monitoreo del consumo eléctrico utilizando tecnologías de IoT de código abierto. Este sistema aprovecha las ventajas de dispositivos LoRa para lograr una arquitectura WSN altamente flexible y de amplia cobertura. Además, la utilización de software de código abierto, como Node-Red, InfluxDB y Grafana, junto con protocolos abiertos, permite la interacción de dispositivos de múltiples fabricantes, incrementando la oferta de productos y equipos disponibles en el mercado y reduciendo significativamente los costos de implementación. Asimismo, el sistema es escalable gracias al uso de software adecuado para el desarrollo de aplicaciones escalables y a la arquitectura de nodos inalámbricos. Con las características antes descritas, es posible definir este sistema, como un ***sistema, flexible, escalable y de cobertura amplia para el monitoreo del consumo eléctrico utilizando tecnologías de IoT open source.***

5.1.1. Líneas de trabajo futuras

Se identifican varias posibles líneas para el futuro en el ámbito de este proyecto. Es interesante explorar estas opciones y utilizarlas como ejemplos para comprender cómo se pueden implementar proyectos innovadores. Una de estas líneas implica el uso de servicios en la nube, como Google Cloud, Azure, AWS etc. para llevar a cabo la implementación de proyectos. Mediante estas plataformas, es posible conectar y gestionar los datos de manera eficiente y segura. Además, se pueden aprovechar herramientas como la inteligencia comercial y los servicios analíticos para extraer aún más valor de los datos recopilados. Esta combinación de tecnologías permite obtener insights y tomar decisiones informadas basadas en un análisis profundo de los datos. Asimismo, se pueden aplicar técnicas de aprendizaje automático utilizando TensorFlow, una plataforma de código abierto que facilita el desarrollo de modelos y algoritmos avanzados.

Otra opción prometedora para proyectos de este tipo es utilizar aplicaciones de computación de borde. Esta tecnología permite procesar y analizar los datos en el borde de la red, cerca de donde se generan, lo que ofrece ventajas en términos de latencia, ancho de banda y privacidad. Al combinarla con TensorFlow y técnicas de aprendizaje automático, se pueden aplicar métodos analíticos sofisticados a los datos recopilados, lo que abre un amplio abanico de posibilidades para la generación de insights y la toma de decisiones inteligentes.

Además de estas opciones, hay otra vía a considerar para proyectos relacionados con el monitoreo de redes eléctricas. Es importante prestar atención a la calidad de la red y asegurarse de que los sistemas estén funcionando de manera óptima. Esto implica analizar diferentes parámetros, como la potencia reactiva, la potencia aparente y otras condiciones relevantes. Los nodos ubicados en los medidores desempeñan un papel crucial en la transmisión de información precisa y oportuna sobre el estado de la red. Aprovechando las características de estos nodos y utilizando software especializado, es posible construir algoritmos avanzados para analizar y visualizar los datos de manera efectiva. También se pueden aplicar técnicas de aprendizaje automático para determinar el nivel de calidad de la red y detectar posibles problemas o anomalías.

En resumen, el campo de la tecnología y la analítica de datos ofrece diversas posibilidades profesionales para el futuro. El uso de servicios en la nube, la computación perimetral, TensorFlow y algoritmos avanzados son solo algunas de las herramientas que se pueden utilizar para implementar proyectos innovadores. Es importante considerar las características específicas de cada proyecto y adaptar las soluciones tecnológicas según las necesidades y objetivos planteados. El análisis de redes eléctricas y la mejora de la calidad de los sistemas también son aspectos clave a tener en cuenta en este campo en constante evolución. Con una combinación adecuada de tecnologías y enfoques, es posible crear soluciones flexibles, escalables y eficientes para el monitoreo y análisis del consumo eléctrico utilizando tecnologías de IoT y analítica de datos.

6. Referencias Bibliográficas

6.1. Bibliografía

- Alarcón López, Á. H., Quimbayo Castro, J. A., García Perdomo, E., & Marín Zambrano, A. M. (2022). wsn redes de sensores inalámbricos y su aplicación a la agricultura de precisión: un caso de metaanálisis. actas del vii congreso investigación, desarrollo e innovación de la universidad internacional de ciencia y tecnología idi-unicyt 2022.
- Anih, T. J., Bede, C. A., & Umeokpala, C. F. (2020). Detection of anomalies in a time series data using InfluxDB and python. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2012.08439>
- Celsia Colombia S.A. E.S.P y Compañía de Electricidad. (2023). INFORMACIÓN SOBRE TARIFAS. Celsia.com. https://www.celsia.com/wp-content/uploads/2023/01/Tarifa-Celsia-Colombia_enero-2023-final.pdf
- Cowlyn, J., Dai, X., & Putrus, G. (2016). Wireless sensor networks for in situ energy efficiency monitoring. 2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ISCAE).
- Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias. (2022). Agencia Nacional del Espectro.
- de Araújo, P., Filho, R., Rodrigues, J., Oliveira, J., & Braga, S. (2018). Infrastructure for integration of legacy electrical equipment into a smart-grid using wireless sensor networks. *Sensors* (Basel, Switzerland), 18(5), 1312. <https://doi.org/10.3390/s18051312>
- Della Mea, V., Popescu, M. H., Gonano, D., Petaros, T., Emili, I., & Fattori, M. G. (2020). A communication infrastructure for the health and social care Internet of Things: Proof-of-concept study. *JMIR Medical Informatics*, 8(2), e14583. <https://doi.org/10.2196/14583>
- Gómez, J. C. N. (2017). Propuesta metodológica para la elaboración de planes nacionales de eficiencia energética para los países del sistema de la integración centroamericana (SICA). UERN-CEPAL Mexico. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40976/S1700116_es.pdf

- González, L., Sofía, O., Laguía, D., Gesto, E., & Hallar, K. (2020). Internet del Futuro – Estudio de tecnologías IoT. *Informes Científicos - Técnicos UNPA*, 12(3), 105–137. <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v12.n3.744>
- Guevara, N. E., Bolaños, Y. H., Diago, J. P., & Segura, J. M. (2022). Development of a low-cost IoT system based on LoRaWan for monitoring variables related to electrical energy consumption in low voltage networks. *HardwareX*, 12(e00330), e00330. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00330>
- Guidelines for Use of Extended Unique Identifier (EUI). (2017). En Organizationally Unique Identifier (OUI), and Company ID (CID).
- Heredia, J. S., & Sailema, G. C. (2018). Comparative analysis for web applications based on REST services: MEAN stack and java EE stack. *KnE engineering*, 3(9), 82. <https://doi.org/10.18502/keg.v3i9.3647>
- Introduction to Grafana. (s/f). Grafana Labs. Recuperado el 15 de junio de 2023, de <https://Grafana.com/docs/Grafana/latest/introduction/>
- Khalek, F. A., Nassar, J., Lefevre, V., Gosselin, F., & Gouvy, N. (2020). A Smart Grid WSN Research Testbed. 2020 16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob).
- LoRaWan architecture. (s/f). The Things Network. Recuperado el 15 de junio de 2023, de <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>
- Luyando Cuevas, J. R., Florencia Zabaloy, M., Guzowski, C., & Alvarado Lagunas, E. (2021). Estudio exploratorio sobre eficiencia energética a empresas del Área Metropolitana de Monterrey. *Secuencia* (Mexico City, Mexico). <https://doi.org/10.18234/secuencia.v0i111.1863>
- Ma, C., Li, D., & Mao, H. (2018). The design of electrical equipment overheat monitoring system on electric propulsion ship based on WSN. *MATEC web of conferences*, 246, 03029. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824603029>
- Michael, S., & Alan, M. (2019). Demystifying LoRaWan Security and Capacity. 2019 29th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). <https://doi.org/10.1109/itnac46935.2019.9077978>

- Na, S., Hwang, D., Shin, W., & Kim, K.-H. (2017). Scenario and countermeasure for replay attack using join request messages in LoRaWan. 2017 International Conference on Information Networking (ICOIN).
- Nasar, M., Department of Computing and Informatics, Mazoon College, Muscat, Sultanate of Oman., Kausar, M. A., & Department of Information Systems, University of Nizwa, Nizwa, Sultanate of Oman. (2019). Suitability of InfluxDB database for IoT applications. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(10), 1850–1857. <https://doi.org/10.35940/ijitee.j9225.0881019>
- Nayyef, I. M., & Ali Hussien, A. (2020). Intelligent power monitoring and control with wireless sensor network techniques. *Indonesian journal of electrical engineering and computer science*, 18(2), 1112. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v18.i2.pp1112-1122>
- Niels, A., & Jan, E. F. (2006). Redes de sensores inalámbricos. *Revista ABB*, 39–42.
- Pavas Martinez, F. A., Universidad Nacional de Colombia, Gonzalez Vivas, O. A., Sanchez Rosas, Y. S., Universidad Nacional de Colombia, & Universidad Nacional de Colombia. (2017). Cuantificación del ahorro de energía eléctrica en clientes residenciales mediante acciones de gestión de demanda. *Revista UIS ingenierías*, 16(2), 217–226. <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n2-2017020>
- Rizwan, R., Arshad, J., Almogren, A., Jaffery, M. H., Yousaf, A., Khan, A., Ur Rehman, A., & Shafiq, M. (2021). Implementation of ANN-based embedded hybrid power filter using HIL-topology with real-time data visualization through Node-Red. *Energies*, 14(21), 7127. <https://doi.org/10.3390/en14217127>
- Salazar, L., Guzman, V., & Bueno, A. (2018). Análisis de medidas de ahorro de energía en una empresa de producción. *Ingenius*, 19, 40–50. <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.04>
- Sánchez-Sutil, F., Cano-Ortega, A., & Hernández, J. C. (2021). Design and implementation of a smart energy meter using a LoRa network in real time. *Electronics*, 10(24), 3152. <https://doi.org/10.3390/electronics10243152>

Torres Ventura, J., Ruelas Puente, A. H., & Herrera García, J. R. (2023). Rendimiento para la interoperabilidad entre Rasperry pi, ESP8266 y PLC con Node-Red para el IIoT. *Ingenius*, 29, 90–97. <https://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.08>

United Nations. (2020). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2020. UN.

Version 1. 10 An Industry Io T Consortium Foundational Document. (s/f). The industrial internet reference architecture. [iiconsortium.org](https://www.iiconsortium.org). Recuperado el 15 de junio de 2023, de https://www.iiconsortium.org/IIC_PUB_G1_V1.80_2017-01-31.pdf

Yi, J., Xiong, Z., Ji, B., Zhu, X., & Xu, J. (2015). An intelligent monitoring system for electric based on WSN. *Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Technology and Management Science*.

Yunus, R. R., Abidin, H. Z., Kamaru Zaman, F. H., & Che Abdullah, S. A. (2019). Outdoor signal performance of LoRaWan technology for campus-scale IoT connectivity. 2019 29th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC).

6.2. Citas De Imágenes

Eastron Electronic Co. (2023). *Multi-Tariff RS485 Modbus Din Rail Three Phase Multi-Function Energy Meter*. Recuperado el Junio de 2023, de www.eastrongroup.com: <https://www.eastrongroup.com/product/three-phase-multifunction-energy-meter/multitariff-rs485-modbus-din-rail-three-phase-multifunction-energy-meter.html>

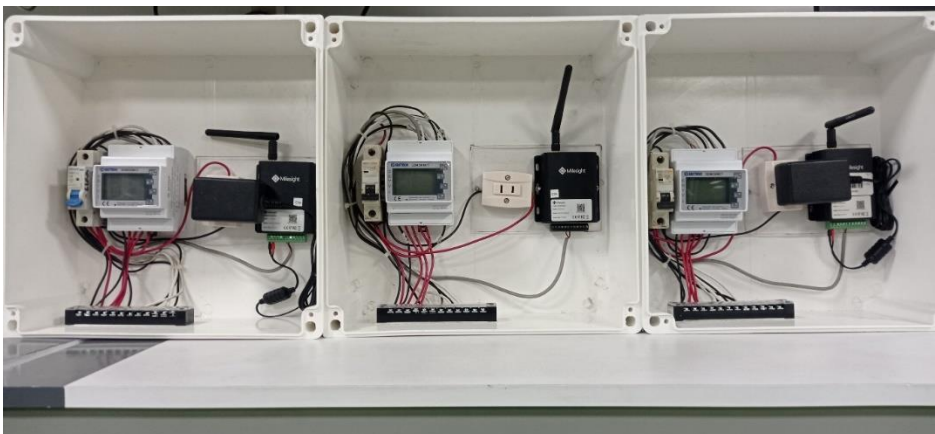
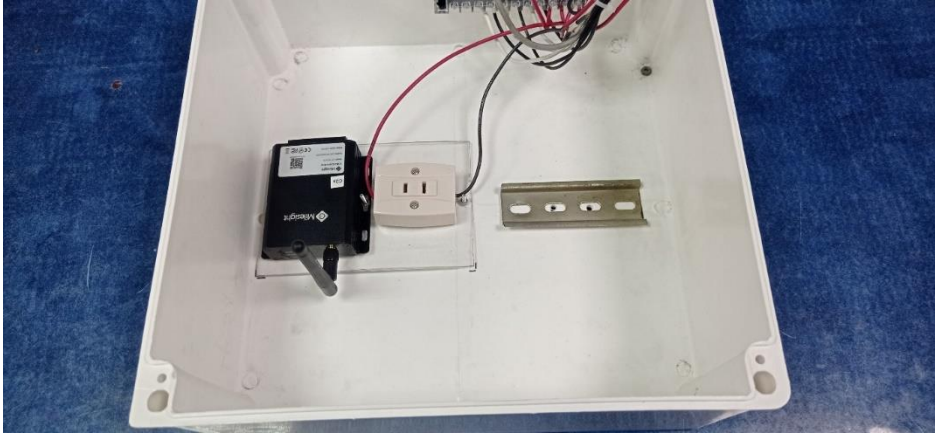
Milesight. (2023). www.milesight-iot.com. Recuperado el Junio de 2023, de <https://www.milesight-iot.com/LoRaWan/Gateway/ug65/>

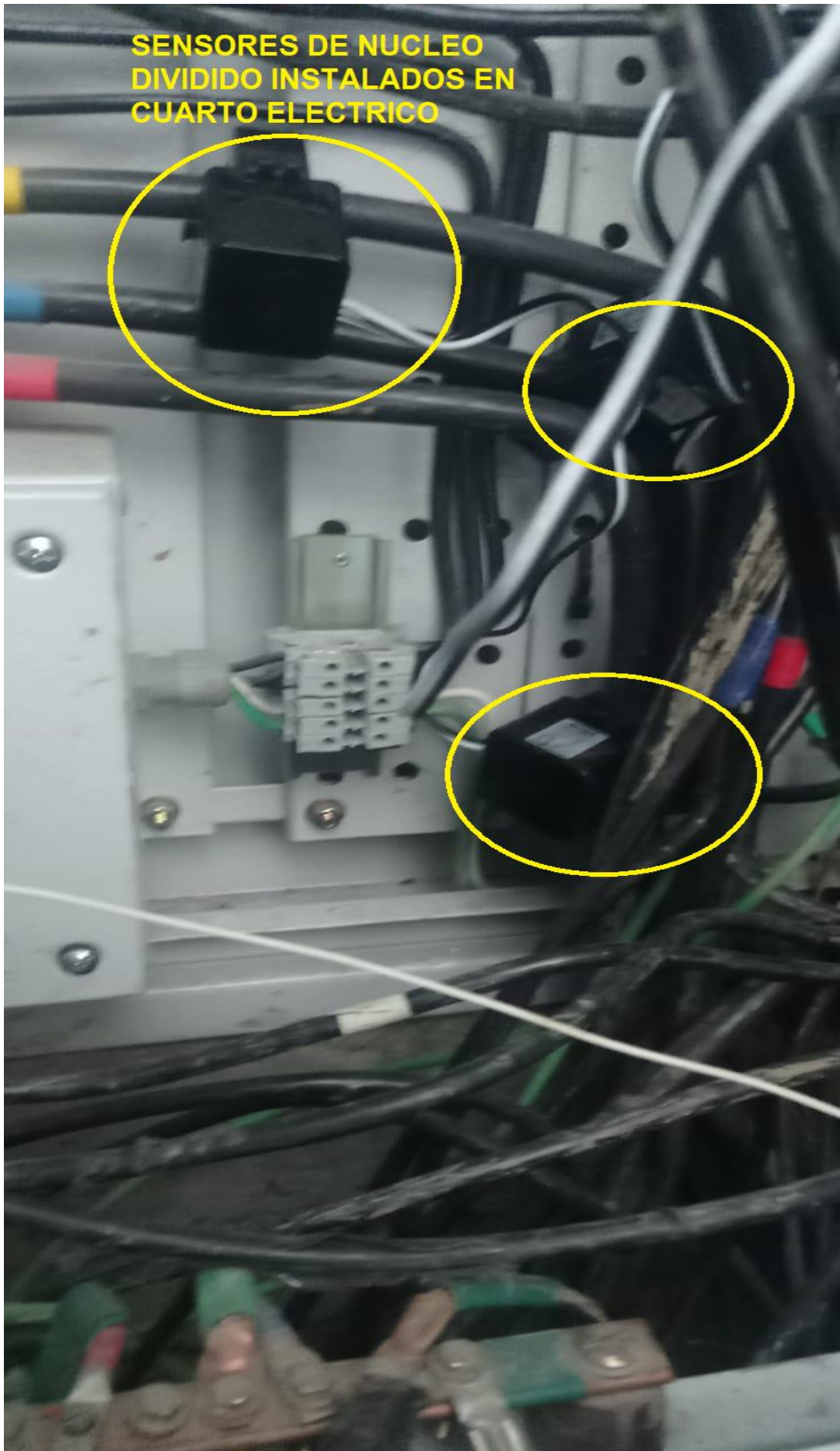
naylampmechatronics. (2023). Tutorial sensor de corriente ac no invasivo sct-013. Recuperado el Junio de 2023, de naylampmechatronics.com: https://naylampmechatronics.com/blog/51_tutorial-sensor-de-corriente-ac-no-invasivo-sct-013.html

- Network, T. T. (s.f.). *thethingsnetwork.org*. Obtenido de <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>
- prosoft technology. (2023). *Architectures Modbus TCP/IP to IEC 61850 Dual Port Gateway*. Recuperado el Junio de 2023, de www.prosoft-technology.com: <https://www.prosoft-technology.com/Products/Gateways/Modbus-TCP-IP/Modbus-TCP-IP-to-IEC-61850-Dual-Port>
- satel-iberia. (2023). *Datalogger con Analizadores Eléctricos y Radiofrecuencia incluida*. Recuperado el Junio de 2023, de www.satel-iberia.com: <https://www.satel-iberia.com/productos/monitorizacion-energetica/dataloggers-concentradores-de-medida/datalogger-sennet-dl171/>
- satel-iberia. (2023b). *Ejemplos de conexionado*. Recuperado el Junio de 2023, de www.satel-iberia.com/: <http://support.satel-iberia.com/wp-content/uploads/2015/09/Ejemplos-de-Conexionado.pdf>
- Schneider Electric. (2023). *Easergy CL110 wireless environmental temperature and humidity sensor*. Recuperado el Junio de 2023, de <https://www.se.com/uk/en/product/ZBRTT1/easergy-cl110-wireless-environmental-temperature-and-humidity-sensor/>
- The Things Network. (s.f.). *The Things Fundamentals on LoRaWan*. Recuperado el Junio de 2023, de www.thethingsnetwork.org: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>
- Ursalink. (2023). *Milesight*. Recuperado el Junio de 2023, de www.milesight.com: https://resource.ursalink.com/document/uc1152_user_guide_en.pdf

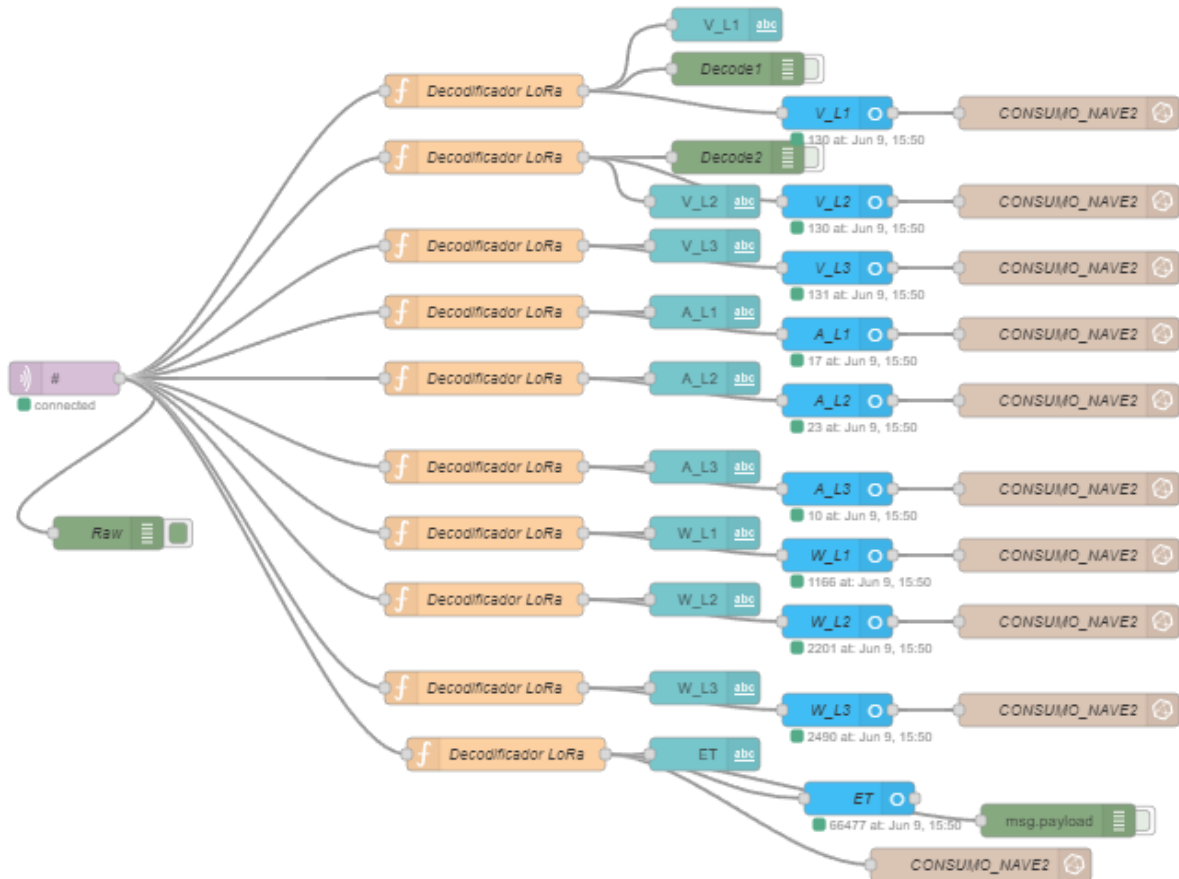
7. Anexos

7.1. Fotografías De Montaje





7.2. Diagrama De Flujo Completo Node-Red



7.3. Flujo De Node-Red Github

El archivo JSON que contiene el flujo de Node-Red que se desarrolló en este proyecto puede ser descargado del siguiente repositorio.

<https://github.com/cristianovsky/Proyecto-Unir>

7.4. CODIGO NODO FUNCTION

```
// Convertir los bytes en un Buffer
const bytes = Buffer.from(msg.payload.uplink_message.decoded_payload.bytes);

// Arreglo auxiliar para almacenar los valores binarios de los bytes
aux = ["", "", "", ""];

console.log(bytes);
```

```
// Convertir cada byte en su representación binaria de 8 bits
for (i = 0; i < 4; i++) {
    aux[i] = bytes[i + 10].toString(2);

    // Asegurarse de que cada cadena binaria tenga una longitud de 8 bits
    while (aux[i].length < 8) {
        aux[i] = "0" + aux[i];
    }
}

// Concatenar los valores binarios en un solo número binario
binario = aux[1] + aux[0] + aux[3] + aux[2];

// Obtener el signo del número
signo = parseInt(binario[0]);

// Obtener el exponente del número
exponente = parseInt(binario.slice(1, 9), 2) - 127;

// Obtener la mantisa del número
mantisa = 1 + binario.slice(9, 32);

n2 = 0;

// Calcular la parte entera y decimal del número
if (exponente >= 0) {
    entera = mantisa.slice(0, exponente + 1);
    decimal = mantisa.slice(exponente + 1);
    n1 = parseInt(entera, 2);
    i = 0;

    // Calcular la parte decimal
    while (i < decimal.length) {
        if (parseInt(decimal[i]) != 0) {
            n2 = n2 + decimal[i] * Math.pow(2, -i - 1);
        }
        i = i + 1;
    }
} else {
    entera = 0;
    n1 = entera;
    decimal = mantisa;

    // Agregar ceros al inicio de la mantisa si el exponente es negativo
    for (i = 0; i < exponente * -1; i++) {
        decimal = "0" + decimal;
    }
}
```

```
i = 0;

// Calcular la parte decimal
while (i < decimal.length) {
    if (parseInt(decimal[i]) != 0) {
        n2 = n2 + decimal[i] * Math.pow(2, -i - 1);
    }
    i = i + 1;
}

// Calcular el resultado final sumando la parte entera y decimal
resultado = n1 + n2;

// Verificar el signo y aplicarlo al resultado
if (parseInt(signo) == 1) {
    resultado = resultado * -1;
}

// Asegurarse de que los resultados muy cercanos a cero se redondeen a cero
if (resultado < 0.01 && resultado > -0.01) {
    resultado = 0;
}

// Asignar el resultado al mensaje de salida
msg.payload = Math.round(resultado);

// Devolver el mensaje modificado
return msg;
```

7.5. Dashboard Elaborados



En la imagen se puede apreciar que el sistema está funcionando de manera muy estable en un periodo que ya completa 43 días. El espacio sin datos en medio, fue necesario mientras se ponía a punto el sistema.



Panel completo.