



UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones

**Diseño y construcción de un sistema basado en IoT para la
monitorización y el control del consumo energético residencial a través
de power line communications (PLC)**

**Trabajo de Integración Curricular,
previo a la obtención del título de
Ingeniero en Telecomunicaciones.**

AUTOR:

Jonathan Andrés Riofrio Irene

DIRECTOR:

Ing. Paulo Samaniego Rojas, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2025

Certificación

Loja, 3 de febrero del 2025

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas. Mg. Sc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño y construcción de un sistema basado en IoT para la monitorización y el control del consumo energético residencial a través de power line communications (PLC)**, previo a la obtención del título de **Ingeniero en Telecomunicaciones** de la autoría del estudiante **Jonathan Andrés Riofrio Irene**, con **cédula de identidad Nro. 1104163645**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas. Mg. Sc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Jonathan Andrés Riofrio Irene**, declaro ser autor del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula: 1104163645

Fecha: 3 de febrero del 2025

Dirección: Catamayo

Correo electrónico: jonathan.a.riofrio@unl.edu.ec

Teléfono: 0969273059

Carta de autorización por parte del autor para la consulta de producción parcial o total, y publicación electrónica de texto completo del Trabajo de Integración Curricular.

Yo, **Jonathan Andrés Riofrio Irene** declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño y construcción de un sistema basado en IoT para la monitorización y el control del consumo energético residencial a través de power line communications (PLC)**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los tres días del mes de febrero del dos mil veinticinco.

Firma: 

Autor: Jonathan Andrés Riofrio Irene

Cédula: 1104163645

Dirección: Catamayo

Correo electrónico: jonathan.a.riofrio@unl.edu.ec

Teléfono: 0969273059

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Integración Curricular: Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas.
Mg. Sc

Dedicatoria

A mi familia, por ser mi soporte y refugio en los tiempos más difíciles. A mis padres José Antonio Nicolás Riofrio y Zoila Mariana Irene Robalino, por su sacrificio, amor y enseñanza; y a mis hermanos, por su apoyo incondicional. Este trabajo es una forma de honrar todo lo que me han brindado.

Jonathan Andrés Riofrio Irene

Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme otorgado los dones y la fortaleza necesarios para desenvolverme en el ámbito académico, nada de esto hubiera sido posible sin las circunstancias y experiencias que han moldeado mi camino.

Expreso mi agradecimiento a mi tutor el Ing. Paulo Samaniego y a los docentes de la Universidad Nacional de Loja quienes fueron parte fundamental en mi formación profesional. Su dedicación al compartir conocimientos y experiencias fueron clave para la planificación y desarrollo de este trabajo.

Un agradecimiento especial a mi tío Daniel Irene, cuyo apoyo y generosidad, tanto en palabras como en acciones, me inspiraron a seguir persiguiendo mis sueños.

Jonathan Andrés Riofrio Irene

Índice de contenidos:

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice de contenidos:	vii
Índice de tablas:	x
Índice de figuras:	xi
Índice de anexos:	xiv
1 Título	1
2 Resumen	2
Abstract	3
3 Introducción	4
4 Marco teórico	7
4.1 Estado del arte	7
4.2 Panorama de producción y consumo de energía eléctrica en el Ecuador	12
4.3 Consumo energético residencial	13
4.3.1 Parámetros eléctricos correspondientes al consumo energético residencial.....	14
4.4 Paradigma Internet de las Cosas (IoT)	15
4.4.1 Arquitectura IoT	16
4.4.2 Protocolos de comunicación	21
4.4.3 Seguridad.....	24
4.5 Comunicaciones mediante línea eléctrica (PLC)	26
4.5.1 Definición	26

4.5.2	Clasificación de las tecnologías PLC.....	26
4.5.3	Caracterización del canal indoor	28
4.5.4	Estructura de una red básica interior PLC	29
4.5.5	Principio de funcionamiento	31
4.5.6	Principales estándares BB-PLC para redes domésticas.	32
4.6	Gestión energética	37
4.6.1	Procesos para la gestión.....	37
4.7	Sensores	38
4.7.1	Comparativa de sensores de parámetros eléctricos	38
4.8	Actuadores.....	39
4.8.1	Comparativa de los relés más comunes	40
5	Metodología.....	41
5.1	Lugar de la implementación.....	41
5.2	Enfoque metodológico	41
5.3	Diagrama de los métodos específicos utilizados para el desarrollo del presente trabajo.....	42
5.4	Revisión de información técnica sobre IoT y PLC.....	42
5.5	Diseño del sistema	43
5.6	Diseño del sistema de gestión de información.....	43
5.7	Implementación y pruebas del sistema	44
5.8	Validación del sistema propuesto	44
6	Resultados.....	45
6.1.1	Topología de la red IoT fusionada con PLC.....	45
6.1.2	Arquitectura IoT de 4 capas	46
6.1.3	Selección del software y hardware	48
6.1.4	Protocolo de mensajería	49
6.1.5	Diagrama de conexiones del hardware	55
6.1.6	Diagrama de conexiones eléctricas	57
6.2	Diseño del dashboard.....	58
6.2.1	Construcción e instalación del tablero de anclaje a la red eléctrica	64
6.2.2	Desarrollo del código de funcionamiento	65
6.2.3	Pruebas de funcionamiento del monitoreo de circuitos.....	67

6.2.4	Validación del sistema de monitoreo	71
6.2.5	Monitoreo del consumo eléctrico residencial	72
6.2.6	Resultados del monitoreo energético	74
6.2.7	Control de circuitos eléctricos	78
7	<i>Discusión</i>	81
8	<i>Conclusiones</i>	84
9	<i>Recomendaciones</i>	85
10	<i>Bibliografía</i>	86
11	<i>Anexos</i>	92

Índice de tablas:

Tabla 1 Revisión de literatura	8
Tabla 2 Características de los protocolos de IoT	23
Tabla 3 Características de las principales tecnologías y estándares PLC de los últimos 20 Años.....	28
Tabla 4 Parámetros PHY relevantes de los principales sistemas PLC	33
Tabla 5 Comparativa de sensores de parámetros eléctricos.....	39
Tabla 6 Comparativa de los relés más comunes	40
Tabla 7 Estructura de los mensajes Blynk	49
Tabla 8 Especificaciones técnicas PZEM-004T	50
Tabla 9 Especificaciones técnicas módulo relé 4 CH.....	52
Tabla 10 Especificaciones técnicas Arduino Uno R3 SMD	53
Tabla 11 Especificaciones técnicas del módulo Ethernet Shield W5100.....	54
Tabla 12 Especificaciones técnicas del Adaptador Nano Powerline TL-PA4010	55
Tabla 13 Materiales para la construcción y ensamblaje del tablero de anclaje a la red eléctrica.....	64
Tabla 14 Comparación de los valores medidos con el multímetro Klein Tools y con el sistema de monitoreo	69
Tabla 15 Tabla de valores promedio de las muestras de corriente tomadas cada 5 minutos	69
Tabla 16 Factor de calibración aplicado a los valores medidos con el sistema de monitoreo.....	71
Tabla 17 Comparación de los valores medidos con el multímetro ANENG y con el sistema de monitoreo	72
Tabla 18 Calculo del error existente entre los valores de potencia aparente	72

Índice de figuras:

Figura 1 Infraestructura de la interoperabilidad de SG (F. Ayadi, 2019).....	10
Figura 2 Producción energética acumulada mensual (CENACE, 2024).....	13
Figura 3 Demanda en tiempo real (CENACE, 2024).....	13
Figura 4 Arquitectura de 3 capas del ecosistema IoT (M. Bouzidi, 2022).....	17
Figura 5 Arquitectura de IoT según la ITU-T (Sergio Daniel Saade, 2018).....	18
Figura 6 Arquitectura de 3 y 5 capas (S. Narasimha Swamy, 2020).....	18
Figura 7 Arquitectura de referencia SOA. (RS Bhadoria, 2022).....	19
Figura 8 Arquitectura de 3 capas combinada con la red eléctrica (SMAA Abir, 2021).....	20
Figura 9 Modelo de referencia IoT centrado en la comunicación (CIoT) (Eyhab Al-Masri, 2020).....	21
Figura 10 Clasificación de los ruidos de la red de distribución de bajo voltaje (Jon González Ramos, 2023).....	29
Figura 11 Diagrama de una red PLC doméstica (HomePlug).....	30
Figura 12 Diagrama de bloques de un sistema PLC (DigiKey, 2013).....	30
Figura 13 Diagrama de acoplamiento. (Alain Richard Ndjiongue, 2019).....	32
Figura 14 Separación en el dominio de la frecuencia de la señal de energía eléctrica y la señal con los datos.....	32
Figura 15 Arquitectura HPAV (HomePlug, 2005).....	34
Figura 16 Diagrama de bloques de un transceptor HomePlug AV (Wi-SUN Alliance, 2007).....	34
Figura 17 Transceptor MIMO ODFM de HomePlug AV2 (Wi-SUN Alliance, 2014).....	35
Figura 18 Arquitectura Genérica de la red ITU-T G.hn (ITU, 2021).....	36
Figura 19 Modelo de referencia de protocolo de un transceptor de red doméstica. (ITU, 2023).....	37
Figura 20 Topología estrella.....	45
Figura 21 Diagrama de referencia de la red IoT y PLC fusionadas.....	46
Figura 22 Arquitectura IoT de 4 capas seleccionada.....	47
Figura 23 Módulo de comunicación PZEM-004T v3.0.....	49
Figura 24 Diagrama de bloques funcional del PZEM-004T.....	51
Figura 25 Módulo relé de 4 canales (AV Electronics, 2024).....	51

Figura 26	Placa de desarrollo Arduino UNO R3 SMD (NovatronicEc, 2020) .	52
Figura 27	Ethernet Shield W5100	53
Figura 28	Adaptadores Nano Powerline AV500 TL-PA4010 (TP-Link, 2024)	54
Figura 29	Diagrama de conexiones del plano electrónico.....	56
Figura 30	Diseño de la placa PCB para el dispositivo maestro.....	57
Figura 31	Diagrama de conexión de la parte eléctrica del sistema.....	58
Figura 32	Zona de desarrollo de Blynk console	58
Figura 33	Configuración básica de la plantilla (Template)	59
Figura 34	Pasos para terminar de crear una plantilla.....	59
Figura 35	Formulario para crear un flujo de datos (Datastream)	60
Figura 36	Sección de edición del web dashboard.....	60
Figura 37	Sección de dispositivos agregados a la cuenta de usuario	61
Figura 38	Sección de voltaje y frecuencia del Web Dashboard	61
Figura 39	Sección de intensidad de corriente del Web Dashboard	62
Figura 40	Sección de energía, potencia aparente y panel de switches	62
Figura 41	Historial del consumo de corriente.....	63
Figura 42	Historial de consumo de potencia aparente.....	63
Figura 43	Historial de consumo de energía activa.....	63
Figura 44	Tablero de anclaje a la red eléctrica construido, ensamblado e instalado	65
Figura 45	Entorno de desarrollo integrado Arduino.....	66
Figura 46	Valor del widget de etiqueta en prueba 1 C3	67
Figura 47	Valor del multímetro en prueba 1 C3.....	67
Figura 48	Valor del widget de etiqueta en prueba 2 C4	67
Figura 49	Valor del multímetro en prueba 2 C4.....	67
Figura 50	Valor del widget de etiqueta en prueba 3 C2	68
Figura 51	Valor del multímetro en prueba 3 C2.....	68
Figura 52	Valor del widget de etiqueta en prueba 4 C1	68
Figura 53	Valor del multímetro en prueba 4 C1	68
Figura 54	Botón para descargar el reporte de datos en crudo.....	73
Figura 55	Forma de presentación de los datos en crudo.....	74
Figura 56	Potencia aparente consumida de 7AM a 9AM.....	74
Figura 57	Potencia aparente consumida de 9AM a 10:40AM.....	75
Figura 58	Potencia aparente consumida de 2PM a 3:40PM.....	75

Figura 59 Potencia aparente consumida de 6:20PM a 10PM.....	76
Figura 60 Potencia aparente consumida de 11AM Y 12AM.....	76
Figura 61 Consumo de intensidad de corriente del ciclo de lavado de una lavadora	77
Figura 62 Etiqueta con los valores de energía activa del inicio del periodo de recorte	77
Figura 63 Etiqueta con los valores de energía activa del final del periodo de recorte	77
Figura 64 Panel de switches con C1 siempre conectado	79
Figura 65 Ping desde la plataforma Blynk hacia el dispositivo maestro Arduino UNO.....	79
Figura 66 Pico de consumo de una plancha para ropa.....	82
Figura 67 Establecimiento del nombre de la red-adaptador powerline 1	93
Figura 68 Establecimiento del nombre de la red-adaptador powerline 2	93
Figura 69 Intensidad de corriente C1 medida con la pinza amperimétrica ANENG	104
Figura 70 Intensidad de corriente C1 medida con el sistema de monitoreo....	104
Figura 71 Intensidad de corriente C2 medida con la pinza amperimétrica ANENG	104
Figura 72 Intensidad de corriente C2 medida con el sistema de monitoreo....	104
Figura 73 Intensidad de corriente C3 medida con la pinza amperimétrica ANENG	104
Figura 74 Intensidad de corriente C3 medida con el sistema de monitoreo....	104
Figura 75 Intensidad de corriente C4 medida con el sistema de monitoreo....	104
Figura 76 Intensidad de corriente C4 medida con la pinza amperimétrica ANENG	104

Índice de anexos:

Anexo 1 Distribución de los componentes del tablero de anclaje a la red eléctrica	92
Anexo 2 Parámetros de configuración para la red powerline privada.....	93
Anexo 3 Diagrama de conexiones de corriente alterna (120V).....	94
Anexo 4 Código de programación o firmware cargado en el dispositivo Arduino UNO.....	95
Anexo 5 Valores medidos con el multímetro CL110 y el sistema de monitoreo	101
Anexo 6 Especificaciones técnicas del multímetro Klein Tools CL110	103
Anexo 7 Comparación de los valores medidos con la pinza amperimétrica de la marca ANENG y el sistema de monitoreo	104
Anexo 8 Especificaciones técnicas del módulo PZEM-004T	105
Anexo 9 Factura del consumo de servicio eléctrico residencial - julio 2024 ...	106
Anexo 10 Certificado de la traducción del resumen.....	107

1 Título

Diseño y construcción de un sistema basado en IoT para la monitorización y el control del consumo energético residencial a través de power line communications (PLC)

2 Resumen

En el presente trabajo se realizó el diseño y construcción de un sistema de monitoreo y control del consumo energético residencial utilizando el paradigma internet de las cosas (Internet of Things, IoT) y la tecnología de comunicaciones mediante línea eléctrica (Power line Communications, PLC). Esta combinación permite una gestión eficiente de la energía, aprovechando la infraestructura existente de líneas eléctricas para transmitir datos y evitando la necesidad de nuevos cableados. La implementación de este sistema nos permite no solo estar al tanto del consumo energético en tiempo real, sino también controlar a distancia el encendido y apagado de los circuitos en el sitio. Entre los principales resultados obtenidos destacan: el diseño de la topología de la red en el marco del IoT, la representación de los componentes del sistema mediante un esquema unifilar, la construcción de un tablero de anclaje a la red eléctrica, el desarrollo del firmware (código de programación), la generación de gráficas y conjuntos de datos en tiempo real del consumo eléctrico de los circuitos, la interpretación de datos en tiempo real de un día típico y una respuesta rápida al ejecutar una instrucción on/of desde la plataforma en línea hacia el dispositivo maestro. Esto genera una oportunidad para aplicar esta solución en entornos más amplios, con potencial para mejorar la eficiencia energética y disminuir los costos de operación. La seguridad del sistema en un entorno doméstico se centra en la configuración de una red PLC privada con encriptación AES-128 (propia de los adaptadores powerline). Además, la interfaz de usuario es intuitiva, lo que facilita el acceso y control del sistema a usuarios sin conocimientos técnicos avanzados. Este trabajo representa un aporte en la gestión energética residencial, contribuyendo a la sostenibilidad mediante la reducción del consumo de energía y la dependencia de fuentes no renovables.

Palabras clave: monitoreo, energía, PLC, IoT.

Abstract

In this work, the design and construction of a monitoring and control system for residential energy consumption was carried out using the Internet of Things paradigm and power line communications technology. This combination enables efficient energy management by leveraging the existing electrical line infrastructure to transmit data, eliminating the need for new wiring. The implementation of this system allows not only real-time monitoring of energy consumption but also remote control of circuit switching on and off. The main results obtained include: the design of the network topology within the IoT framework, the representation of system components using a one-line diagram, the construction of a power grid anchoring panel, the development of firmware (programming code), the generation of real-time graphs and datasets of the circuits' electricity consumption, real-time data interpretation of a typical day, and a rapid response when executing an on/off instruction from the online platform to the master device. This creates an opportunity to apply this solution in broader environments, with the potential to improve energy efficiency and reduce operating costs. The system's security in a domestic setting focuses on the configuration of a private PLC network with AES-128 encryption (specific to powerline adapters). Additionally, the user interface is intuitive, making it easy for users without advanced technical knowledge to access and control the system. This work contributes to residential energy management, promoting sustainability by reducing energy consumption and reliance on non-renewable sources.

Keywords: monitoring, energy, PLC, IoT.

3 Introducción

La energía eléctrica es uno de los recursos más importantes que influyen en el desarrollo sostenible de la sociedad, por lo que resulta imprescindible tener una buena gestión al hacer uso de ella. El desarrollo general de este trabajo aporta a la resolución de la problemática relacionada con la falta de información sobre el consumo eléctrico en los hogares. La no disponibilidad de sistemas de monitoreo y control, impide que los usuarios tengan prácticas más eficientes, lo que resulta en un consumo excesivo de energía. Además, la dependencia continua de fuentes energéticas no renovables produce cambios climáticos lo que a la vez conlleva a épocas de estrés hídrico y a una disminución de la energía renovable producida por las hidroeléctricas (ONU-Agua, 2019).

Es evidente que la sostenibilidad urbana tanto en el plano económico, social y ambiental se ve negativamente afectada debido a la mala gestión de los recursos naturales disponibles en nuestro entorno. Por ejemplo, en octubre del 2023 el sector eléctrico de Ecuador entró en crisis debido a los bajos caudales de las hidroeléctricas y otros problemas estructurales del sector, por esa razón el gobierno ecuatoriano impulsó campañas para promover el uso eficiente de la energía eléctrica. (Ministerio del Ambiente, 2023)

Para diciembre del 2023 según la ministra del ramo, Andrea Arrobo Peña, se logró una reducción superior al 4% del consumo de energía diaria. (Ministerio de Energía y Minas, 2023) Sin embargo, el problema resurgió en marzo del 2024 y los racionamientos en el país continuaron de manera irregular.

La solución planteada en este caso se asocia directamente con funciones correspondientes al marco de gestión de energía, por esa razón se considera un enfoque dentro del desarrollo redes inteligentes (Smart Grids, SG), ya que este concepto hace referencia a la integración de las redes de distribución de energía eléctrica y las modernas tecnologías de la información para monitorear, almacenar, transportar, gestionar y distribuir energía. En 2013 se implementaron sistemas de gestión de energía en 17 empresas del Ecuador produciendo un ahorro de \$50 970, evitándose 6 501 toneladas de CO₂ equivalentes y disminuyendo el consumo de Diesel de 378 360 galones por año. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2020)

Este proyecto pretende impulsar la eficiencia energética al proporcionar a los residentes información detallada de su consumo energético para que puedan tomar las medidas de ahorro de energía adecuadas, para ello se elabora un sistema basado en IoT

que cuenta con la capacidad de controlar y monitorear el consumo eléctrico de los circuitos que conforman la red eléctrica residencial de baja tensión (120V y 60Hz), a través de PLC. El sistema propuesto basado en IoT consiste en la implementación de dispositivos electrónicos ubicados en el cuadro de distribución eléctrica residencial (después del medidor de servicio y tomando como punto de partida el tablero de distribución). La finalidad es recolectar los datos de medición eléctrica de cada circuito dividido en el tablero, para posteriormente visualizar su consumo energético. Por otro lado, en el plano de control el objetivo es enviar instrucciones de encendido y apagado de cargas. La interacción directa del sistema con el usuario se realiza a través de un panel de control (dashboard) en Internet. La ubicación de cada uno de los elementos del sistema corresponde a la arquitectura IoT de 4 capas: capa de dispositivos, capa de red, capa de middleware y capa de aplicación.

Todos los dispositivos que integran el sistema dentro de la residencia se encuentran soportados por una red de acceso local (Local Area Network, LAN), la cual, de manera general, está constituida por un punto de acceso con conexión a internet que se conecta a un adaptador PLC, y este, a su vez, utiliza la línea eléctrica residencial para enlazarse a otro adaptador PLC. La tecnología de transmisión de datos utilizada permite obtener una solución integral, esto evita la necesidad de agregar una vía de cableado separada, desde el punto de recogida de los datos hasta el acceso a internet, aprovechando así los recursos existentes en la residencia.

El alcance de este proyecto está definido principalmente por el entorno residencial en el que se trabaja, el marco de IoT en el cual se encuentran distribuidos los distintos elementos del sistema y la tecnología de transmisión de datos PLC asociada al canal de enlace.

En la actualidad, existen diversas soluciones que varían en función de la tecnología de transmisión empleada y los métodos de análisis y procesamiento de los datos recopilados. La integración de tecnologías de la información y comunicación en el monitoreo, estimación del consumo y producción de energía eléctrica a nivel nacional es crucial para que los consumidores y operadores puedan anticiparse a posibles situaciones de crisis. Esta integración no solo facilita la detección rápida de fallas en los planes de operación, sino que también optimiza la toma de decisiones estratégicas, minimizando el riesgo de pérdidas económicas significativas debido a interrupciones en el servicio.

El sistema propuesto se distingue por su enfoque en la accesibilidad y eficiencia, utilizando recursos tecnológicos que están al alcance de los usuarios y aprovechando la

infraestructura eléctrica existente en los hogares (adaptada para funcionar como canal de transmisión de datos). A diferencia de otras soluciones complejas o que requieren inversiones significativas en equipos, esta propuesta utiliza principalmente un módulo relé de 4 canales, Arduino UNO, y módulos PZEM-004T, integrados en un tablero eléctrico económico. La implementación de estos componentes dentro del marco de la tecnología PLC e IoT permite un monitoreo y control detallado y preciso de los circuitos eléctricos residenciales.

4 Marco teórico

En este capítulo, se abordan los conceptos técnicos fundamentales necesarios para comprender el sistema de monitoreo y control propuesto. Para empezar, se realiza una revisión de literatura relacionada con el tema del presente trabajo, luego se describe el panorama nacional energético de los últimos años y finalmente se profundiza en los dos pilares principales que sustentan esta investigación: las comunicaciones mediante línea eléctrica y el internet de las cosas.

4.1 Estado del arte

Para evaluar la idoneidad de aplicar PLC e IoT en aplicaciones de monitoreo y control de la red eléctrica residencial, se recopila información de distintos trabajos que hayan utilizado o estudiado estas tecnologías dentro del área de las Smart Grid. Cada uno de los documentos considerados son sintetizados con la finalidad de extraer la contribución esencial relacionada con el tema de interés. En la Tabla 1 se resumen las referencias revisadas para el desarrollo de esta sección.

En (SMAA Abir, 2021) se realiza una revisión de las funcionalidades clave del sistema de red de energía inteligente habilitado para IoT ilustrando la arquitectura, las tecnologías y los parámetros y estándares de software relacionados para la operación del sistema energético. Además, se analiza y categoriza las vulnerabilidades de seguridad de IoT de la red energética y se discuten técnicas de mitigación. Finalmente, se destaca cómo garantizar la privacidad de los datos durante el comercio de energía y el intercambio de información entre pares. Respecto al uso de IoT en hogares y edificios, se afirma que sus elementos aumentan la productividad y mejoran el factor de potencia al tiempo que preservan la eficiencia energética; por ejemplo, el sistema de iluminación inteligente para hogares y edificios ofrece regulación de iluminación programada a través de luces LED

Tabla 1 Revisión de literatura

Tema principal	Referencia	Enfoque
IoT	(SMAA Abir, 2021)	Revisión de la arquitectura, las vulnerabilidades y las funcionalidades de los sistemas de redes de energía inteligentes habilitados para IoT.
	(MU Saleem, 2022)	Diseño, implementación y evaluación del rendimiento de un sistema de gestión de energía inteligente basado en IoT.
	(Kember Buenaventura, 2022)	Desarrollo de un sistema de monitoreo del consumo eléctrico en tiempo real.
	(J. Pan, 2015)	Propuesta de un marco de internet de las cosas para energía inteligente.
	(Eckner Chaljub, 2022)	Prototipo de monitoreo de energía y control de dispositivos eléctricos a nivel residencial.
	(Muhammad Umair, 2023)	Desarrollo de un modelo probabilístico para pronosticar el consumo de energía en un entorno doméstico inteligente y un algoritmo de conservación proactiva de energía.
PLC	(A. Sendin, 2024)	Desarrollo y validación de un prototipo de comunicación de banda ancha a través de la línea eléctrica para contadores inteligentes de próxima generación en redes eléctricas y de acceso.
	(L. N. S. Varanasi, 2024)	Dispositivo de borde inteligente que utiliza la comunicación por línea eléctrica para la gestión de la energía y el control de electrodomésticos.
	(Edwin Peláez, 2018)	Diseño de un sistema de medición y monitoreo del consumo de energía por circuitos en el hogar mediante PLC.

Nota. Esta tabla resume los trabajos relacionados que se revisaron para evaluar la idoneidad de fusionar PLC e IoT en el desarrollo de proyectos con propósitos de monitoreo y control energético.

Los autores (MU Saleem, 2022) abordan el problema del conocimiento insuficiente de los consumidores sobre el consumo de la electricidad, para ello proporcionan un diseño de arquitectura IoT por capas que integra un módulo de middleware y medidores inteligentes para la gestión y el análisis de datos, es decir, ofrecen un enfoque de monitoreo en tiempo real de equipos eléctricos y control de carga de amplio rango, combinado con un equipo que es capaz de evaluar y monitorizar parámetros de energía trifásica como corriente, voltaje, potencia activa, reactiva y

aparente, frecuencia y factor de potencia. Se utiliza la placa de desarrollo Node MCU con el protocolo transporte de telemetría (Message Queuing Telemetry Transport, MQTT) para poder enviar los datos hacia la nube.

De manera similar en el proyecto (Kember Buenaventura, 2022) se desarrolló un sistema de monitoreo del consumo eléctrico que consta de un equipo físico y una plataforma visual de las variables cuya base de comunicación es el paradigma IoT. En cambio, (J. Pan, 2015) se inspira en la “computación proporcional a la energía”(la energía consumida depende de las funciones que esté realizando la máquina) para proponer un marco de IoT que permita controlar el consumo de energía de forma automatizada utilizando plataformas de teléfonos inteligentes y tecnologías de computación en la nube con el propósito de promover la proporcionalidad de energía a múltiples escalas, incluyendo edificios, usuarios y organizaciones.

Es posible también utilizar los servicios de correo electrónico y mensajería existentes en internet para recibir y enviar datos de consumo energético utilizando las cuentas de los usuarios o clientes. Por ejemplo, en (Eckner Chaljub, 2022) se construyó un prototipo que permite controlar el encendido y apagado de cargas desde la aplicación Telegram a través de internet.

En el artículo (Muhammad Umair, 2023) se diseña e implementa un sistema de automatización del hogar habilitado para IoT basado en niebla para obtener resultados prácticos en escenarios de gestión energética del mundo real, esto se logra desarrollando un modelo estocástico basado en cadenas de Markov que permite calcular las probabilidades de transición del estado del usuario que luego se utilizan para predecir la demanda de energía en los próximos intervalos de tiempo y posteriormente reducir el consumo de una casa inteligente. Se concluye que el nodo de niebla implementado con una Raspberry Pi 4, WiFi, el protocolo MQTT y los algoritmos de predicción hacen que el tiempo promedio de respuesta mejore, que el equipo se pueda utilizar en modo fuera de línea y que el hogar ahorre más energía.

Los trabajos relacionados con PLC muestran que es posible su aplicación para transmitir datos de forma paralela o sustitutiva a otras tecnologías de comunicación, principalmente a través de los tres dominios SG, denominados transmisión, distribución y usuario o consumidor, esto se puede ilustrar claramente en la Figura 1, donde los nodos de comunicación inalámbrica convergen con las líneas eléctricas puesto que están siendo alimentados por las mismas.

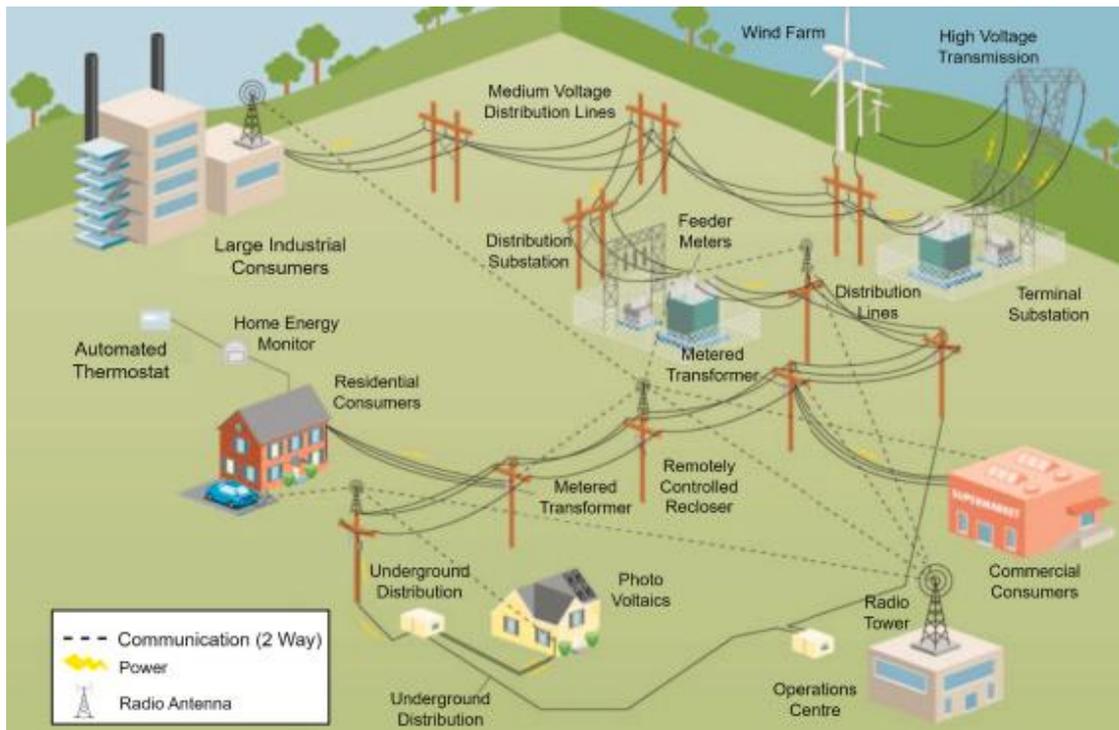


Figura 1 Infraestructura de la interoperabilidad de SG (F. Ayadi, 2019)

En (A. Sendin, 2024) se presenta y describe un prototipo de banda ancha sobre línea eléctrica (Broadband Over Power Lines, BPL) que se ha desarrollado con el objetivo de realizar el análisis de canales de acceso a la red de baja tensión para definir los parámetros de capa física más adecuados en los contadores inteligentes, esto se logra variando los valores de frecuencia, ancho de banda, numerología de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) esquemas de modulación, técnicas de corrección de errores hacia adelante (Forward Error Correction, FEC), etc. Las pruebas realizadas permitieron concluir que: las frecuencias más altas se comportan peor para los dispositivos PLC, concentrar la potencia de transmisión en la parte más baja del canal mejora la disponibilidad y la modulación binaria por desplazamiento de fase (Binary Phase-Shift Keying, BPSK), con una tasa de codificación de $\frac{1}{2}$ tiene la relación señal a ruido más alta.

No obstante, también existen trabajos más prácticos cuyo objetivo es la gestión de la red eléctrica del hogar elaborando un prototipo físico de monitoreo y control de la red eléctrica con sensores, actuadores, microcontroladores y el protocolo de transferencia de hipertexto (Hypertext Transfer Protocol, HTTP) para comunicar los dispositivos con la nube, esto se puede evidenciar en (L. N. S. Varanasi, 2024) donde se presenta un sistema Maestro-Esclavo que utiliza módulos PLC KQ-330 de la marca Flyrobo basados en modulación por desplazamiento de frecuencia (Frequency Shift Keying, FSK), y en

(Edwin Peláez, 2018) donde se utiliza módulos PLC TL-WPA4220 de la marca TP-Link basados en modulación OFDM.

Cada trabajo proporciona su aporte en la construcción de este tipo de sistemas que tienen la capacidad de controlar y monitorear el consumo de la red eléctrica residencial. Sin embargo, presentan soluciones enfocadas a necesidades por separado con tecnologías de transmisión de datos diferentes. En este proyecto, se busca enviar los datos de monitoreo y control a través de la línea eléctrica, en el marco del Internet de las Cosas (IoT), utilizando el protocolo de mensajería propietario BLYNK para permitir la comunicación de los dispositivos con la nube. Esta solución aprovecha los medios de transmisión existentes en la residencia y define una arquitectura IoT que facilita la comprensión de la distribución de los elementos del sistema. Es importante destacar que un modem PLC, con el equipamiento tecnológico adecuado, puede cubrir áreas que el WiFi no puede alcanzar debido a obstáculos físicos o a la saturación de la banda de 2.4 GHz.

De manera general, en el desarrollo de trabajos futuros relacionados con fases y funciones de la gestión del consumo eléctrico, no solamente se debe limitar las acciones a cuestiones de desconexión y conexión de cargas mediante relés, sino que también debe considerarse la parte de gestión energética en todas las etapas de la red de suministro eléctrico, desde la generación hasta la entrega final al usuario. Para ello es necesario ejecutar acciones en base a la planificación o estimación de consumo y producción en un periodo de tiempo establecido. Por ejemplo, se puede reducir el consumo restringiendo los recursos en tiempo y cantidad en caso de sobrepasar un umbral establecido, actualizar los datos de predicción de abastecimiento en función de los cambios en la generación, activar automáticamente el suministro de respaldo en caso de emergencias o crisis, dar mantenimiento al sistema eléctrico de forma periódica, corregir fallas luego de su detección, gestionar dinámicamente las rutas de distribución según las condiciones del entorno, entre otras.

Uno de los desafíos que se presentan para poder digitalizar todo el sistema de suministro eléctrico es la adaptabilidad de las tecnologías de transmisión a los distintos niveles de voltaje y las condiciones de ruido presentes en las líneas eléctricas. PLC por su parte tiene la capacidad de trabajar en redes de alta, media y baja tensión, por lo que se podría unificar los canales de distribución correspondientes al proveedor del servicio de internet y al proveedor del servicio de energía eléctrica, pudiendo reducir la brecha

digital generada por la mala cobertura y calidad de servicio en las zonas rurales, y facilitar el conflictivo ordenamiento del tendido de cables en las zonas urbanas.

4.2 Panorama de producción y consumo de energía eléctrica en el Ecuador

El panorama de consumo energético existente en el Ecuador es documentado por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (MERNNR). Según el balance energético nacional 2022, el sector residencial consumió 7 833 GWh, lo que implica una disminución del 1,6% respecto del año anterior. Sin embargo, el resto de sectores tanto industriales como comerciales muestran un aumento en el consumo eléctrico que en conjunto suman un total de 27 797 GWh que representan un 3% más respecto al año previo (Ministerio de Energía y Minas, 2022). Además, cabe recalcar que la oferta total del Ecuador para el año 2022 fue de 33 282 GWh lo que dejó un sobrante de 5 485 GWh.

Existe un plan maestro de electricidad el cual en base a estimaciones de oferta y demanda de energía eléctrica, expone los requerimientos o necesidades que sostienen el abastecimiento de energía eléctrica para todo el país, a pesar de ello, si se llegaran a presentar inconvenientes en el cumplimiento de los acuerdos, el sector podría entrar en crisis. De hecho, en octubre del 2023 y abril 2024 el sector eléctrico tuvo que ejecutar procesos de racionamiento de energía eléctrica, que según (CENACE, 2023), se deben a que la demanda estaba creciendo mucho más rápido que la oferta, de manera más concreta este suceso crítico se puede adjudicar a dos factores, uno de ellos es la escasez del caudal existente en las hidroeléctricas y el otro tiene que ver con el desfase en el cumplimiento de la planificación de los proyectos de generación eléctrica.

Para finales de abril del 2024 los datos de producción y demanda energética provistos por el sistema de control supervisor y adquisición de datos (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) del Operador Nacional de Electricidad (CENACE) son los que se muestran en las Figuras 2 y 3 respectivamente. Esta información nos muestra que en el Ecuador la mayor parte de la producción eléctrica es hidráulica y que la central hidroeléctrica que más aporta es Coca Codo Sinclair.

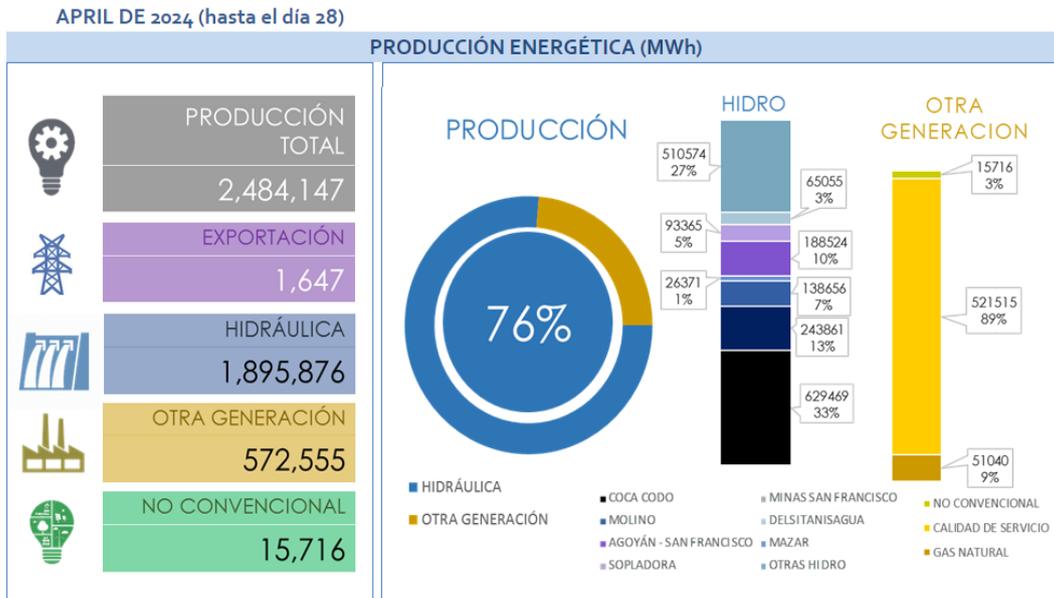


Figura 2 Producción energética acumulada mensual (CENACE, 2024)

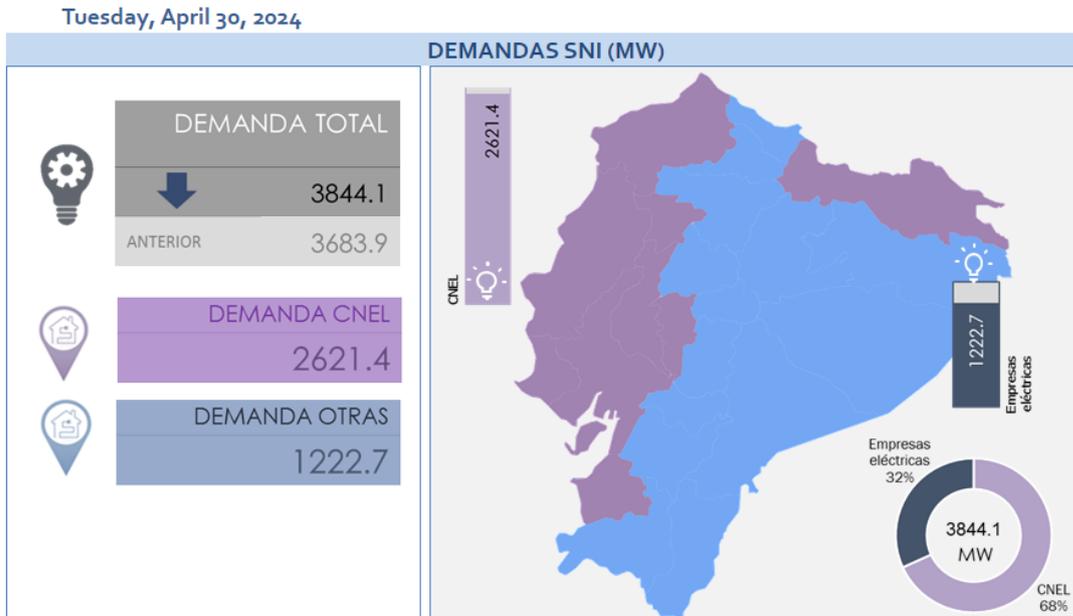


Figura 3 Demanda en tiempo real (CENACE, 2024)

4.3 Consumo energético residencial

El consumo de energía eléctrica residencial se mide en kilovatios hora (kWh) y se corresponde con varios factores que influyen en la cantidad de consumo a pagar: desde las dimensiones de la propiedad hasta el número de personas que coexisten en un mismo espacio, pasando por el uso de electrodomésticos y los hábitos de consumo. (PepeEnergy, 2023)

4.3.1 Parámetros eléctricos correspondientes al consumo energético residencial

En un sistema eléctrico de corriente alterna (CA), la potencia se puede clasificar en tres tipos principales: potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente. Cada tipo de potencia tiene un rol específico en la operación de los sistemas eléctricos y en el consumo de energía.

4.3.1.1 Potencia activa (P).

La potencia activa, medida en vatios (W), es la cantidad de energía real que se convierte en trabajo útil. Específicamente, se refiere a la energía que realiza efectivamente trabajo, como encender una lámpara, hacer funcionar un electrodoméstico o mover un motor.

Esta potencia es responsable de la energía que se convierte en calor, luz, o movimiento. En otras palabras, es la potencia que efectivamente se utiliza para realizar tareas específicas. (A.Eberle, 2024)

Su expresión matemática para calcularla es la siguiente: $P = V_{rms} \times I_{rms} \times \cos \varphi$ donde la función coseno corresponde al factor de potencia, que representa la relación entre la potencia activa y la potencia aparente.

4.3.1.2 Potencia Reactiva (Q).

La potencia reactiva, medida en voltamperios reactivos (VAR), es la energía que no realiza trabajo útil, pero es necesaria para el funcionamiento de ciertos dispositivos eléctricos.

Esta potencia se asocia con los campos magnéticos de componentes inductivos (como motores y transformadores) y los campos eléctricos de componentes capacitivos, se almacena y libera periódicamente en el circuito. No se consume ni se convierte en trabajo útil, sino que oscila entre la fuente de energía y los dispositivos. Según (ITEC, s.f), esta potencia es esencial para mantener el campo magnético en los motores eléctricos y el funcionamiento de otros dispositivos inductivos y capacitivos.

La potencia reactiva se calcula como $Q = V_{rms} \times I_{rms} \times \sin \varphi$ donde la función seno corresponde a la parte del factor de potencia que representa la diferencia de fase entre el voltaje y la corriente.

4.3.1.3 Potencia Aparente (S)

La potencia aparente, medida en voltamperios (VA), es la combinación de la potencia activa y la potencia reactiva en un sistema eléctrico. Representa la potencia total

que un generador o una fuente de energía debe proporcionar para satisfacer las demandas del sistema.

La potencia aparente se puede visualizar como la "potencia total" que incluye tanto la potencia real utilizada para realizar trabajo (potencia activa) como la potencia que se intercambia entre la fuente y los dispositivos (potencia reactiva). Es una medida de la capacidad total del sistema para suministrar energía.

La potencia aparente se calcula como $S = V_{rms} \times I_{rms}$. También puede relacionarse con la potencia activa y reactiva mediante la fórmula $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

La relación entre la potencia activa, reactiva y aparente se representa comúnmente mediante un triángulo de potencias, donde:

- La potencia activa es la base del triángulo.
- La potencia reactiva es la altura del triángulo.
- La potencia aparente es la hipotenusa del triángulo

El factor de potencia es el coseno del ángulo entre la potencia activa y la potencia aparente y se calcula como: $\cos \varphi = \frac{P}{S}$

4.3.1.4 Energía activa

Calcular la energía residencial consumida implica determinar la cantidad total de energía utilizada por una vivienda durante un período específico, generalmente medido en kilovatios-hora (kWh).

Para calcular la energía consumida, se necesita conocer la potencia de cada dispositivo y el tiempo durante el cual están en uso.

La fórmula viene dada de la siguiente manera:

$$E = Potencia\ activa\ (kW) \times Tiempo\ (h)$$

En las residencias normalmente no hay una alta demanda de potencia reactiva. Sin embargo, si se llegase a detectar una demanda excesiva por el uso de electrodomésticos con motores o máquinas industriales, se deberá pagar una penalización según como lo establezca la empresa proveedora del servicio de energía eléctrica.

4.4 Paradigma Internet de las Cosas (IoT)

Internet de las cosas es un paradigma bien conocido en la actualidad que se viene desarrollando desde hace aproximadamente cuatro décadas atrás. Según (S. Narasimha Swamy, 2020), se lo puede definir como una integración de las tecnologías de sensores,

embebidas, informáticas y de comunicaciones. El objetivo de IoT es proporcionar servicios sin interrupciones a cualquier cosa, en cualquier momento y en cualquier lugar.

Dentro del marco de IoT las aplicaciones se dirigen hacia la recolección de datos, análisis y procesamiento de datos, monitoreo desde la nube y control remoto de dispositivos.

4.4.1 Arquitectura IoT

Una arquitectura de IoT se puede comprender como un sistema de elementos constituyentes, estructura de red y tecnologías de nube que funcionan de conformidad con los protocolos y estándares de seguridad de IoT establecidos. (Guinea Mobile, 2022)

Existen muchas arquitecturas que sirven de ayuda para comprender este concepto implicado en la conexión global de todas las cosas. Sin embargo, en este trabajo se consideran los principales modelos por capas más representativos, los cuales organizan los diferentes componentes y funciones de un sistema IoT en varios niveles, y un modelo orientado a Smart Grids: modelo de 3 capas, modelo de 4 capas, modelo de 5 capas, arquitectura orientada a servicios (Service-oriented Architecture, SOA) y un modelo fusionado con la red eléctrica.

4.4.1.1 Modelo de 3 capas.

La arquitectura de 3 capas fundamenta la base para representar los modelos posteriores, ya que IoT opera principalmente en estas capas, a pesar de ello, este modelo sin ninguna modificación deja implícito las tecnologías, estándares y protocolos habilitadores principales. Por esa razón, (M. Bouzidi, 2022) propone una modificación subdividiendo la capa de percepción en bloques elementales más específicos.

Capa de percepción (*perception layer*): se incluyen todos los dispositivos encargados de recolectar datos y ejecutar acciones en el entorno, entre estos se incluyen los sensores, actuadores y dispositivos de borde.

Capa de red (*network layer*): se enfoca en conectar los objetos y compartir información entre ellos. Para compartir la información se adaptan estándares de comunicación por cable o inalámbricos como Ethernet, WiFi, Wi-MAX, ZigBee y BLE. (S. Narasimha Swamy, 2020)

Capa de Aplicación (*application layer*): facilita el manejo de datos y brinda los servicios que los usuarios finales requieren. Una vez recolectados por dispositivos IoT, los datos son examinados en esta capa para tomar decisiones en diversos campos de aplicación, como atención médica avanzada, urbanización inteligente, automatización residencial, agricultura de precisión y respuesta ante emergencias. (M. Bouzidi, 2022)

En la Figura 4 se presenta un resumen del ecosistema IoT, mostrando el mapeo entre las distintas capas de la arquitectura y las implementaciones tecnológicas de comunicación en el mundo real. Además, se observa que la capa de percepción está subdividida en bloques que representan los sensores, los protocolos de comunicación y los estándares de acceso a la red.

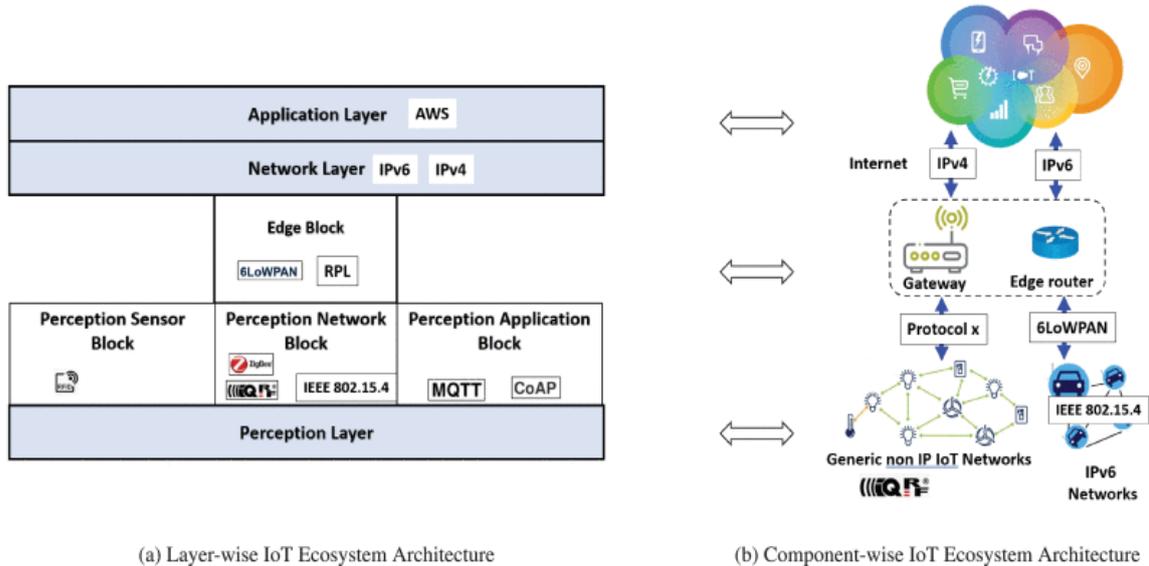


Figura 4 Arquitectura de 3 capas del ecosistema IoT (M. Bouzidi, 2022)

4.4.1.2 Modelo de 4 capas.

La Unión internacional de telecomunicaciones (UIT-T) sugiere una arquitectura de 4 capas aprobado en la recomendación UIT-T Y.2060. A este modelo con respecto al de 3 capas, se le agrega una capa de apoyo a servicios y aplicaciones con la finalidad de proveer un ambiente con capacidades de soporte genéricas, capacidades de soporte específicas y capacidades de seguridad. En la Figura 5 se muestra la distribución de los distintos bloques que definen la estructura del modelo.

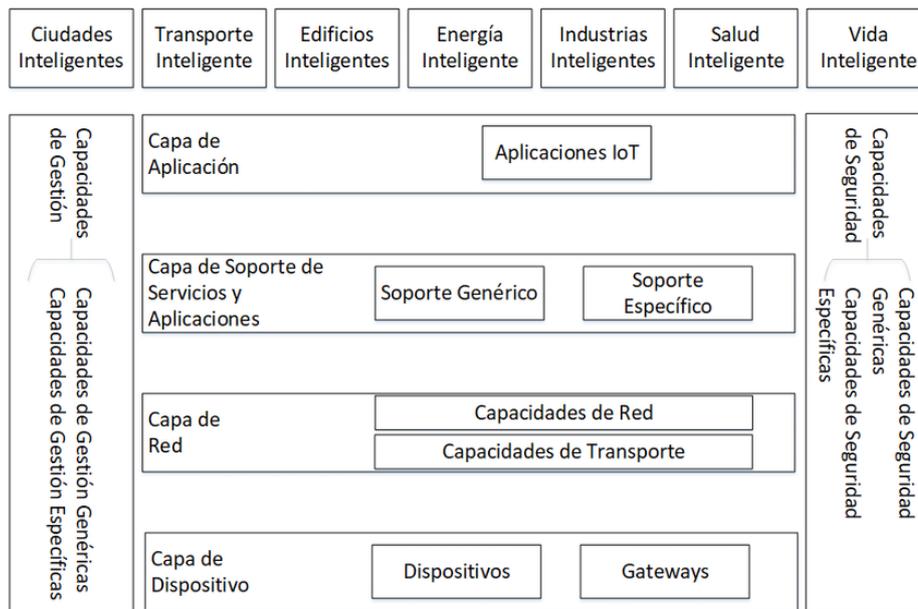


Figura 5 Arquitectura de IoT según la ITU-T (Sergio Daniel Saade, 2018)

4.4.1.3 Modelo de 5 capas.

A diferencia del modelo de referencia de 3 capas, este modelo posee 2 capas extra denominadas capa de gestión de servicio (service management layer) y capa de negociación (business layer) tal como se muestra en la Figura 6.

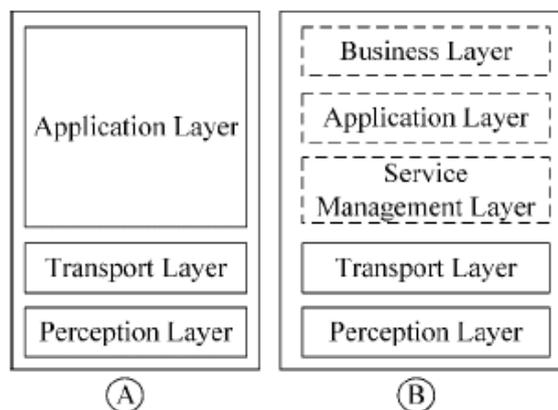


Figura 6 Arquitectura de 3 y 5 capas (S. Narasimha Swamy, 2020)

Capa de Gestión de Servicios: también se conoce como capa de middleware. Almacena, analiza y procesa enormes cantidades de datos procedentes de la capa de transporte. Puede gestionar y proporcionar un conjunto diverso de servicios a las capas inferiores. Emplea muchas tecnologías, como bases de datos, computación en nube y módulos de procesamiento de *big data* (Smruti R. Sarangi, 2017).

Capa de Negociación: Esta capa supervisa las funciones del sistema IoT y los variados servicios que ofrece. Utiliza los datos en su estado original provenientes de otras

capas para crear modelos de negocio, diagramas de flujo y representaciones gráficas. Su función principal radica en el análisis, monitoreo y evaluación del sistema IoT y sus componentes asociados.

4.4.1.4 Arquitectura orientada a servicios (SOA).

Es una arquitectura que ofrece una referencia del posicionamiento de los componentes de software y hardware dentro de un escenario basado en IoT. Los distintos elementos que la conforman se encuentran divididos por capas como se muestra en la Figura 7.

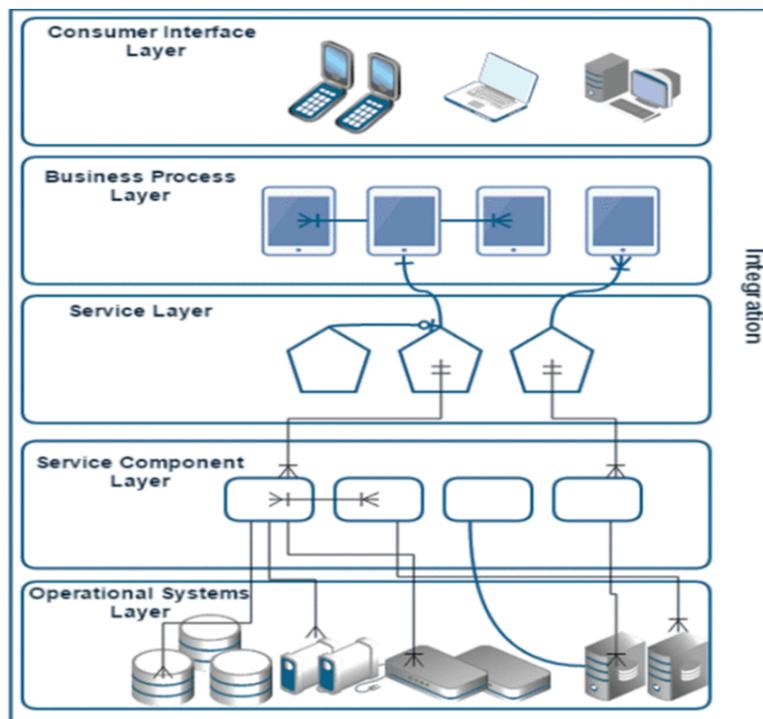


Figura 7 Arquitectura de referencia SOA. (RS Bhadoria, 2022)

Cada capa cumple un rol necesario para la comunicación entre los dispositivos consumidores de servicios y los sistemas encargados de proveerlos. El aporte de esta forma de organización en los sistemas IoT, refuerza la seguridad debido a los diferentes niveles de abstracción e interfaces, por un lado, y facilita la comunicación entre entidades heterogéneas vinculadas al sistema IoT al virtualizar las comunicaciones y la distribución de datos, por otro. (RS Bhadoria, 2022).

- **Capa del sistema operativo (*operational systems layer*):** consta de elementos como almacenamiento, unidades de procesamiento, etc. Es una posición donde

reside el proveedor de servicios real. También es responsable de ejecutar e implementar servicios en la web (RS Bhadoria, 2022).

- **Capa de componentes de servicios (*service component layer*):** se crean servicios complejos, denominados flujo de trabajo de procesos de negocio (BP) y se gestionan los servicios básicos proporcionados (HQ Al-Shammari, 2019).
- **Capa de servicio (*service layer*):** consiste en la pila de servicios que puede incluir servicios interactivos, servicios de orquestación y procesos comerciales, servicios de información de datos, servicios de aplicaciones, servicios de accesibilidad y gobernanza de servicios. Esta capa también define el soporte de funcionalidad empresarial y las capacidades para los servicios en SOA. (RS Bhadoria, 2022)
- **Capa de procesos de negocio (*business process layer*):** controla los datos y retiene el flujo de la interacción entre los servicios y los procesos de negocio.
- **Capa de consumidor (*consumer interface layer*):** es donde los consumidores interactúan con SOA. Permite que una solución SOA admita un conjunto de funciones independiente del canal e independiente del cliente (Open Group, s.f.).

4.4.1.5 Modelo de 3 capas Orientado a Smart Grid.

Las arquitecturas de IoT normalmente se dividen por capas y cada capa cumple su requisito, pero no todos los modelos se pueden adaptar a una aplicación determinada. En (SMAA Abir, 2021) se fusiona el modelo de tres capas con la red eléctrica con la finalidad de tener un esquema de referencia del posicionamiento de los elementos que conforman una Smart Grid tal como se ve en la Figura 8.

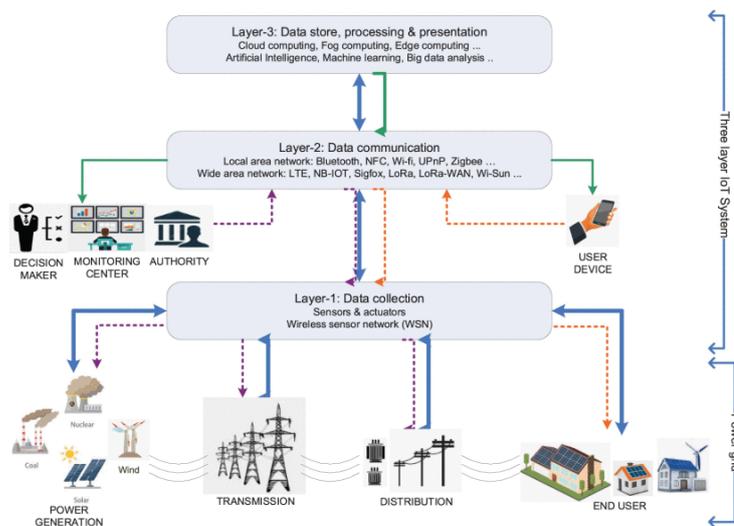


Figura 8 Arquitectura de 3 capas combinada con la red eléctrica (SMAA Abir, 2021)

El esquema nos muestra que en su capa inferior se llevan a cabo procesos de recolección de datos y ejecución de acciones en los distintos escenarios correspondientes al sistema de distribución de energía eléctrica, desde la generación hasta la entrega final en la residencia del usuario. En la jerarquía, ascendiendo un nivel, encontramos la capa de comunicación, cuya función es transferir los datos recibidos sin procesar a través de una red respaldada por tecnología de transmisión. Estos datos son dirigidos hacia los servicios correspondientes en la capa superior, donde serán procesados y analizados para las tareas de toma de decisiones.

4.4.2 Protocolos de comunicación

La selección de los protocolos de comunicación para su aplicación en IoT, depende del servicio que soporte la red en general, es decir, si se requiere transmitir video HD o superior en tiempo real, es necesario recurrir a protocolos que permitan una alta conectividad y un alto nivel de procesamiento gráfico. Por el contrario, si tan solo se necesita medir variables ambientales cada determinado tiempo, no es necesaria una comunicación sincrónica, por ende, los recursos que se invierten en términos de velocidad, potencia y procesamiento pueden ser reducidos sin comprometer la entrega fiable de los datos. En la Figura 9, podemos observar un modelo de referencia IoT centrado en la comunicación, el cual está basado en el modelo de referencia TCP/IP. Cada capa contiene protocolos con características distintas que permiten la comunicación desde un dispositivo a otro (sensor o actuador-dispositivo de usuario).

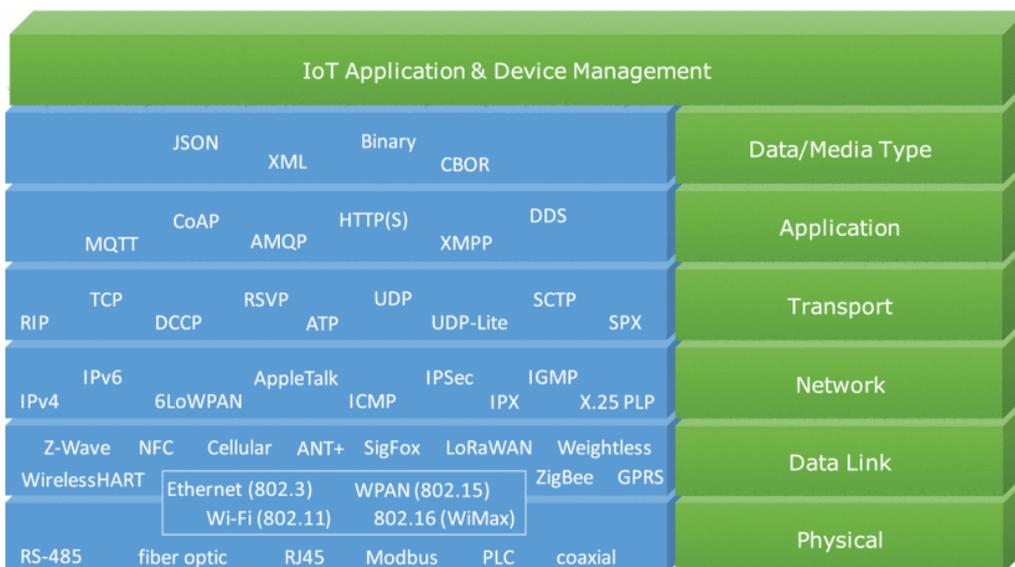


Figura 9 Modelo de referencia IoT centrado en la comunicación (CIoT) (Eyhab Al-Masri, 2020)

Los protocolos de mensajería que sirven para intercambiar información entre dispositivos IoT a través de internet, se encuentran ubicados en la capa de aplicación del modelo de interconexión de sistemas abiertos (Open System Interconnection, OSI). Sin embargo, si se considera un modelo de arquitectura de 4 capas focalizado en la aplicabilidad del paradigma IoT, estos se encuentran ubicados en la capa de middleware.

En este trabajo se describen más a detalle los principales protocolos utilizados en el ámbito de IoT: protocolo de transferencia de hipertexto (Hypertext Transfer Protocol, HTTP), transporte de telemetría de cola de mensajes (Message Queuing Telemetry Transport, MQTT) y protocolo de aplicaciones restringidas (Constrained Application Protocol, CoAP).

4.4.2.1 HTTP.

HTTP es un protocolo sin estado (el servidor no almacena información de las sesiones anteriores) que se utiliza generalmente para la comunicación de datos a través de la World Wide Web. (Eyhab Al-Masri, 2020) menciona que una de las características más relevantes de HTTP es la negociación de contenido de la representación de datos, la misma que permite compartir diferentes dispositivos heterogéneos construidos independientemente de los datos. Está desarrollado para funcionar en una arquitectura en la cual, un cliente envía una solicitud y un servidor devuelve una respuesta. Existen 4 versiones de HTTP, pero la que se utiliza hoy en día es HTTP1.1.

4.4.2.2 MQTT.

Este protocolo de mensajería basado en un conjunto de estándares, utiliza un patrón de publicación suscripción cuya finalidad es la de desacoplar al remitente del receptor. Es decir, no existe una comunicación directa como en la red tradicional de cliente y servidor, sino que, se incluye un tercer componente que funciona de intermediario o broker para controlar la comunicación entre publicadores y suscriptores (AWS, 2023). Los publicadores o sensores envían mensajes al bróker MQTT con un tema y formato específico para que los dispositivos interesados se suscriban y reciban los datos asociados.

4.4.2.3 CoAP.

Es un protocolo de interacción solicitud respuesta por lo tanto es compatible con HTTP. Al ser liviano y con baja velocidad de transmisión, suele ser utilizado en nodos y redes restringidas, por ello, su nombre se designa con esto. El diseño es apropiado para aplicaciones de máquina a máquina (M2M), como la gestión de la cadena de suministro

y medidores inteligentes para monitorear el consumo de energía. Sin embargo, CoAP no es un protocolo seguro. (Apostolos Gerodimos, 2023)

Múltiples protocolos de mensajería conocidos suelen ser soportados en plataformas de servicios para IoT. Entre estos se encuentran: protocolo avanzado de colas de mensajes (Advanced Message Queuing Protocol, AMQP), protocolo extensible de mensajería y presencia (XMPP) y servicio de distribución de datos (Data Distribution Service, DDS). En la Tabla 2 se presenta un resumen de las características de los protocolos de mensajería detallados en este trabajo, así como de otros que no son tan comunes en aplicaciones. La definición como protocolo es relativa a las especificaciones de sintaxis, semántica y sincronización.

Tabla 2 Características de los protocolos de IoT

Protocols	HTTP	CoAP	AMQP	MQTT	XMPP	CORBA	ZeroMQ	DDS	OPC UA
Transport	TCP	UDP	TCP	TCP	TCP	UDP	TCP	UDP, TCP	TCP
QoS	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No
Complexity	Low	Low	Low	Low	High	Medium	Medium	High	High
Low power and lossy network	Fair	Exc.	Fair	Fair	Fair	Poor	Fair	Poor	Fair
Security	SSL, TLS	DTLS	SSL, TLS	SSL, TLS	TLS	SSL	TLS	DTLS, SSL	SSL
Message pattern	Req/Res	Req/Res, Pub/Sub	Req/Res, Pub/Sub	Pub/Sub	Req/Res, Pub/Sub, Push/Pull	Req/Res, Push/Pull	Req/Res, Pub/Sub, Push/Pull	Pub/Sub	Req/Res, Pub/Sub, Push/Pull
Extensibility	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes
Message priority	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No	Yes	No
Real-time	Yes	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Application	Smart Energy	SHS	AMI	SM	SG	SAS	SHS	EMS	SAS

Nota. En esta tabla se describen las características de varios protocolos que hacen posible la comunicación entre los distintos dispositivos y elementos de un sistema IoT. CORBA se considera un estándar de arquitectura con protocolos específicos, ZeroMQ es más considerado como una librería y OPC UA está orientado a la automatización industrial. (Md. Ohirul Qays, 2023)

4.4.3 Seguridad

Existen 3 principales razones por las cuales un sistema IoT puede resultar vulnerable a un ciber ataque. La primera está relacionada con los protocolos utilizados en las capas de middleware cuya seguridad es dependiente de los protocolos de capa subyacente. Como se puede apreciar en la Tabla 2, casi todos los protocolos descritos se basan en el protocolo criptográfico de seguridad de la capa de transporte (Transport Layer Security, TLS). Cualquier ataque capaz de vulnerar este protocolo pone en riesgo los datos que circulan por la red. La segunda razón, tiene que ver con la restricción de los recursos, la cual impide ofrecer algoritmos de seguridad complejos debido a la limitación de las métricas y el tamaño de almacenamiento (Md. Ohirul Qays, 2023). Y, por último, un sistema puede verse vulnerable debido a que son los seres humanos quienes manejan y registran las sesiones correspondientes al acceso del sistema.

Para poder comprender más a detalles los tipos de ataques y las medidas que se requieren aplicar en un sistema IoT, es necesario tomar como referencia el modelo base de arquitectura “*tricapa*”.

Para (Apostolos Gerodimos, 2023) en la capa de **percepción** las amenazas más importantes son las siguientes:

Escucha de borde: Las escuchas ilegales se deben a la falta de procesamiento para técnicas de cifrado complejas.

Captura de nodos: Un atacante puede tomar el control de un nodo y utilizarlo como una puerta para acceder a los datos que circulan en la red.

Nodo falso malicioso: Es posible la instalación de un nodo que no es legítimamente parte de la red y que su actividad consuma recursos de la red.

Ataque de repetición: Un intruso puede escuchar la información saliente de la línea del emisor para obtener las credenciales de autenticación que permitan enviar una solicitud proveniente de un usuario aparentemente “legítimo”.

En la capa de red las amenazas tienen que ver más con capturas del tráfico IP (paquetes) y la saturación de los servicios de red:

Ataques de denegación de servicio (Denial of Service, DoS): Esta acción se puede lograr al provocar una tormenta de broadcast, una inundación de solicitudes provenientes de uno o varios dispositivos a la vez, o al explotar la unidad máxima de transferencia (Maximum Transmission Unit, MTU).

Ataque Man in the middle: En este caso el atacante se encuentra como intermediario de la comunicación malicioso, el cual en esa posición podría interceptar y manipular los datos que están circulando de un extremo a otro de la red sin que los dispositivos lo noten.

Ataques de almacenamiento: Un atacante puede obtener acceso a los datos almacenados en un servidor con el fin de adulterarlos o eliminarlos.

Snifeo a nivel de red: La escucha a nivel de red hace referencia a la captura de paquetes para obtener información sobre el patrón de tráfico, la dirección IP, credenciales de inicio de sesión.

En la capa de aplicación las amenazas más comunes son las que se describen a continuación:

Cross Site Scripting: Inyección de scripts de código malicioso.

Ataque de código malicioso: Se construye o modifica un software con código malicioso como troyano o una puerta trasera para tener acceso a los periféricos I/O y al almacenamiento de un dispositivo (cámara, micrófono, registros de llamadas, etc).

Ataque de cenicienta: Este ataque consiste en cambiar el reloj del sistema para dejar inutilizables las funciones de protección contra virus y accesos no autorizados.

Las medidas de seguridad necesarias se deberían aplicar en las tres capas con la finalidad de reforzar la protección. No obstante, todo depende de la arquitectura del sistema, la disponibilidad de los recursos y la exposición de los distintos elementos ante las amenazas existentes (naturaleza del entorno). Una manera robusta y centralizada de aplicar seguridad en un sistema IoT sería la utilización de *firewalls* físicos administrados por el encargado de seguridad. En estos dispositivos se pueden llevar a cabo técnicas de filtrado de tráfico (paquetes), prevención de intrusos y bloqueo de ciber ataques las cuales pueden llegar a ser transparentes a nivel de aplicación. Por otro lado, una alternativa es adoptar un enfoque distribuido, aplicando medidas de seguridad directamente en los dispositivos IoT, en los gateways y complementándolas con servicios de seguridad en la nube. Asimismo, resulta fundamental integrar estándares y marcos de referencia como ISO 27001, NIST o CIS Controls, que facilitan la gestión de vulnerabilidades y riesgos en los sistemas.

Si la tecnología se desarrolla y expande con la finalidad de gestionar telemáticamente sectores primordiales o estratégicos de una nación, es necesario también disponer medidas de seguridad avanzadas, de otro modo, se dejarían los sistemas

expuestos al ciber terrorismo lo que se podría traducir en una “negligencia tecnológica” que en el peor de los casos podría poner en riesgo la vida de los usuarios pertenecientes a un sistema en concreto.

4.5 Comunicaciones mediante línea eléctrica (PLC)

4.5.1 Definición

PLC es una tecnología de transmisión de datos que permite la comunicación entre dispositivos a través de la infraestructura eléctrica. Normalmente las líneas que conforman una instalación eléctrica no son óptimas para el transporte de datos debido a la coexistencia con la energía de suministro y al ruido o distorsiones agregadas por los componentes propios de la red eléctrica como transformadores, empalmes, cargas, generadores, etc. Sin embargo, este problema se trata de compensar con la integración de protocolos y técnicas de modulación apropiadas.

Esta tecnología tiene la capacidad de manejar el flujo de datos tanto en banda ancha como estrecha, por ende, permite ofrecer desde servicios ligeros como medición, censado y control de cargas hasta servicios que requieren una tasa de transmisión más alta como multimedia.

Uno de los motivos para usar PLC es que la red eléctrica está presente en casi cualquier infraestructura y además posee una extensa capacidad de conexión física que cualquier otra alternativa con cable/inalámbrica, por lo que, casi todos los dispositivos con conexión a la red eléctrica pueden ser servicios de valor agregado.

4.5.2 Clasificación de las tecnologías PLC

Las tecnologías PLC pueden caracterizarse en función del tipo de señal eléctrica transmitida, Corriente Continua (CC) o Corriente Alterna (CA); la tensión de la red (baja, media o alta tensión); y, por último, la banda de frecuencia de transmisión. (Jon González Ramos, 2023)

4.5.2.1 Banda ultra estrecha (Ultra Narrow Band, UNB).

Tecnologías que funcionan a muy baja velocidad de transmisión de datos en la banda de frecuencia ultrabaja (ULF, 0.3-3 kHz) o en la parte superior de la banda de frecuencia superbaja (SLF, 30-300 Hz). (Lars Thorsten Berger, 2014)

Algunos ejemplos de sistemas UNB-PLC son Señalización de portadora rizada (Ripple Carrier Signaling, RCS), el sistema tortuga (the Turtle system) y el sistema

automático de comunicación bidireccional (Two-way Automatic Communications System, TWACS).

En el desarrollo de Smart Grids, el sistema de lectura de medición automática (Automatic meter Reading, AMR) es fundamental ya que proporciona comunicaciones bidireccionales completas a través de la red de suministro eléctrico existente. Adicionalmente, permite a las empresas de servicios públicos, acceder y controlar los medidores de manera rentable.

4.5.2.2 Banda estrecha (Narrow Band, NB).

Las tecnologías de banda estrecha (NB) operan en las bandas de muy baja, baja y parte de media frecuencia (VLF/LF/MF), que incluyen las bandas del Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) (3-148,5 kHz), la banda de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) (10-490 kHz), la banda de la Asociación de Industrias y Empresas de Radio de Japón (ARIB) (10-450 kHz) y la banda china (3-500 kHz). (Lars Thorsten Berger, 2014)

Para NB-PLC, la tecnología propuesta se denomina ITU-T G.hnem. Las especificaciones para la capa PHY están reguladas por la norma ITU-T G.9955, mientras que la ITU-T G.9956 proporciona normas para la DLL. Para evitar confusiones en las recomendaciones la Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunication Union, ITU-T) propone ITU-T G.9903 para G3- PLC y ITU-T G.9904 para la red PRIME. (Alain Richard Ndjiongue, 2019)

Hay dos tipos de NB-PLC que se diferencian por la tasa de datos:

- **LDR (Low Data Rate)**

Se refiere a las tecnologías cuya capacidad es de unos pocos kbps. Usualmente se usa modulación de portadora única o espectro ensanchado

- **HDR (High Data Rate)**

Se refiere a tecnologías capaces de alcanzar velocidades de transmisión de datos de entre decenas de kbit/s y unos cientos de kbit/s.

4.5.2.3 Banda ancha (Broad Band, BB).

Normalmente operan en las bandas de frecuencia media, alta o muy alta (MF/HF/VHF) (1,8-250 MHz) y tienen una velocidad de capa física (PHY) que oscila entre varios Mbit/s y varios cientos de Mbit/s.

Ejemplos de tecnologías BB-PLC son los dispositivos conformes a las normas TIA-1113 (HomePlug 1.0), IEEE 1901 y ITU-T G.hn (G.9960-G.9964). Otros ejemplos no basados en Organizaciones de desarrollo de normas (Standards Development Organizations, SDO) son HomePlug AV2, HomePlug Green PHY, UPA Powermax y Gigle MediaXtreme. (Lars Thorsten Berger, 2014)

En la Tabla 3 se puede observar un resumen de las principales características de las tecnologías PLC de los últimos 20 años.

Tabla 3 Características de las principales tecnologías y estándares PLC de los últimos 20 Años

Standards/ Modem	Modulation Scheme	PLC Section	Frequency Band (Hz)	Data Rate (bps)
IEEE P1901	OFDM	NB	2-100 M	500 M
IEEE P1901.1	OFDM (DBPSK, D4PSK, D8PSK, BPSK, 4PSK, 8PSK, 16QAM)	NB	< 15 M	< 500 k
IEEE P1901.2	D4PSK, D8PSK, BPSK, 4PSK, 8PSK, 16QAM	NB	10-490 k	< 500 k
ITU-T G.9904	OFDM (DBPSK, D4PSK, D8PSK, BPSK)	NB	CENELEC-A	61.4 k
ITU-T G.9903	OFDM (DBPSK, D4PSK, D8PSK, BPSK D4PSK, D8PSK, BPSK)	NB	CENELEC-A/FCC	46/234 k
HomePlug 1.0	D4PSK	BB	1.8-30 M	1-14 M
HomePlug AV	BPSK, 4PSK, 8QAM, 16, 64, 256, 1024QAM	BB	> 2 MHz	1-14 M
G3-PLC	OFDM	NB	36-90.6 k (CENELEC-A)	200 k
PRIME	OFDM	NB	42-89 k (CENELEC-A)	128 k
IEC61334	S-FSK	NB	60-76 k (CENELEC-A)	2.4 k
ISO/IEC 14908-1	BPSK	NB	115-132 k (CENELEC- B/C)	5.0 k
ANSI/EIA709.1,2	BPSK	NB	86, 131 k	3.6-5.4 k
KNX	S-FSK	BB	125-140 k	1.2 k
MAX2990	OFDM	NB	CENELEC/FCC	100 k
STM7580	BFSK	NB	60-132.5 k	4.8 k

Nota. Esta tabla muestra las características relacionadas con la tecnología de transmisión PLC de las organizaciones de desarrollo de normas, alianzas, vendedores y módems seleccionados. (Alain Richard Ndjiongue, 2019)

4.5.3 Caracterización del canal indoor

La caracterización del canal depende mucho del ambiente en el que se transmiten los datos (interior o exterior), el nivel de voltaje de suministro de la red eléctrica y la banda de frecuencia en la cual se está trabajando. Para el caso del interior de una residencia, resulta imperfecto el acoplamiento de la red eléctrica con los transceptores

PLC, esto se debe a la aleatoriedad normal del uso de la red eléctrica para alimentar electrodomésticos, es decir que la impedancia varía en función de las cargas capacitivas, inductivas o resistivas que se encuentren consumiendo energía en determinado momento.

El canal PLC interior es selectivo en la frecuencia, este hecho se evidencia al relacionar hiperbólicamente el ancho de banda de coherencia y la dispersión del retardo al cuadrado medio. Según la investigación realizada por (Alain Richard Ndjiongue, 2019), la dispersión del retardo respecto al canal PLC del interior de una casa disminuye al incrementar el ancho de banda de coherencia con la frecuencia, esto se realizó en un rango de 0 a 10 MHz. Además, dicho trabajo encontró que la capacidad del canal depende del nivel de voltaje y las variaciones del entorno, concluyendo que en las mejores condiciones el canal BB-PLC puede llegar hasta los 600Mbps.

El ruido de la red eléctrica puede clasificarse en ruido de fondo, que varía durante largos periodos de tiempo, y ruido impulsivo, que muestra un comportamiento rápido que varía en el tiempo (Jon González Ramos, 2023). Estos ruidos provienen de la suma de otros y su emisión depende de los dispositivos conectados en la red eléctrica o de los cambios que ocurran en la impedancia. En la Figura 9 se resumen los ruidos que componen una red de bajo voltaje.

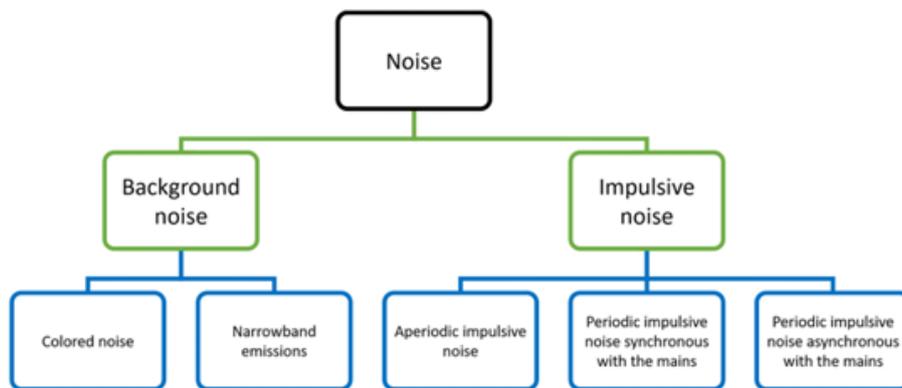


Figura 10 Clasificación de los ruidos de la red de distribución de bajo voltaje (Jon González Ramos, 2023)

4.5.4 Estructura de una red básica interior PLC

Una red interior PLC está compuesta por transceptores PLC (módems), dispositivos terminales (cargas), Gateway residencial (Router/AP) y el canal (red eléctrica residencial). En la Figura 11 se puede observar la distribución de los equipos y elementos de una red básica interior PLC.

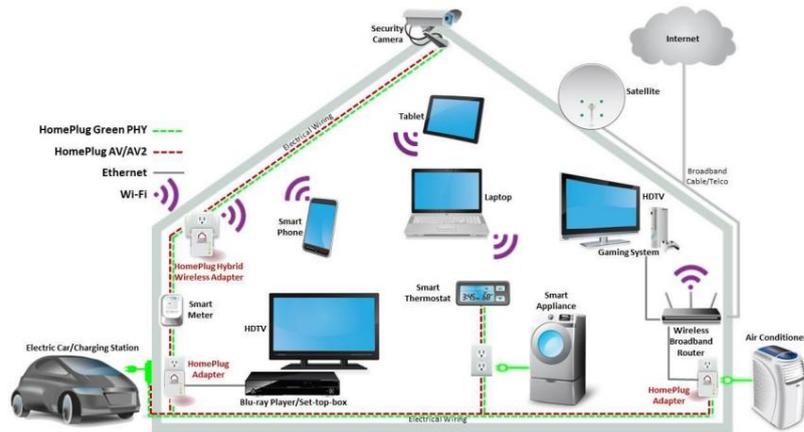


Figura 11 Diagrama de una red PLC doméstica (HomePlug).

- **Transceptores PLC**

Son dispositivos que permiten enviar y recibir información interactuando de forma directa con la red eléctrica. Estos son los encargados de tratar las señales y mantener la coexistencia entre tecnologías de transmisión ya que están conectados a los tomacorrientes de la residencia. Las redes PLC modernas utilizan tecnología de modulación OFDM para mejorar la velocidad y la estabilidad del procesamiento de datos en entornos inherentemente ruidosos como las redes eléctricas. En la Figura 12 se puede apreciar los diferentes bloques que conforman este dispositivo.

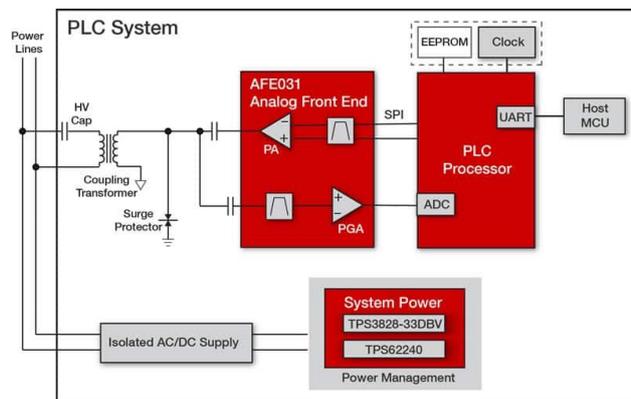


Figura 12 Diagrama de bloques de un sistema PLC (DigiKey, 2013)

- **Dispositivos terminales**

Son los equipos finales que actúan como fuentes de información dentro de una red PLC. Estos dispositivos encuentran conectados directamente al modem PLC usándolo como intermediario para comunicarse con los demás elementos de la red. La capacidad de conectarse inalámbricamente

para acceder a la red depende del tipo de tarjeta de red que posee tanto el dispositivo terminal como el modem de acceso.

- **Gateway o router residencial**

Es una pasarela que permite interconectar la red PLC interna con otras redes como la internet, de modo que se pueda mantener una compatibilidad entre protocolos y arquitecturas distintas. Además, cumple con funciones de enrutamiento de paquetes, seguridad y asigna direcciones IP a los hosts.

- **Canal (Red eléctrica)**

Es el medio por el cual viaja la información hacia los distintos elementos que conforman la red. En el caso de las comunicaciones mediante línea eléctrica, las condiciones naturales del canal son malas para la transmisión de datos debido al ruido impulsivo y de fondo existente.

4.5.5 Principio de funcionamiento

El uso de UNB-PLC se basa en redes eléctricas de alto voltaje. Sin embargo, el tema de esta investigación se enfoca en las tecnologías para aplicaciones en redes de bajo voltaje domésticas, es por eso que en la definición del principio de funcionamiento solo se consideran las bandas correspondientes a las tecnologías NB-PLC y BB-PLC.

La tecnología PLC es capaz de transmitir datos a través de la línea de potencia superponiendo una señal de baja frecuencia (50Hz-60Hz) propia de la red eléctrica y una señal de una frecuencia superior (3000KHz-250 MHz) correspondiente a la información transmitida.

El modem de red eléctrica (Power Line Modem, PLM) convierte los bits que salen de la fuente en una señal con características adaptables al medio por donde se va a transmitir (Serna, 2011). Sin embargo, para poder inyectar la señal de información y recibirla es necesario ubicar dos circuitos de acoplamiento entre el canal eléctrico y el modem PLC, tal como se puede observar en la Figura 13. Las características de acoplador deben garantizar la máxima transferencia posible (ROE óptimo implica buen match de impedancias), evitando pérdidas por conexión de los segmentos y asegurando la interacción entre el modem PLC y la red eléctrica. En la teoría el acoplador debería funcionar perfectamente. Sin embargo, en el campo las condiciones de variabilidad no permiten que las impedancias puedan acoplarse bien, esto ocasiona desvanecimiento y por ende afecta negativamente a la Relación Señal a ruido (Signal to Noise Ratio) SNR.

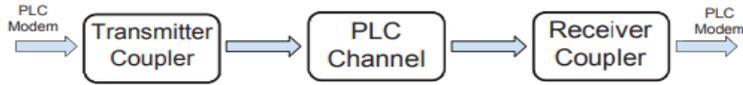


Figura 13 Diagrama de acoplamiento. (Alain Richard Ndjiongue, 2019)

La señal que posee los datos está separada de la señal que posee la energía en el dominio de la frecuencia tal como se puede observar en la Figura 14.

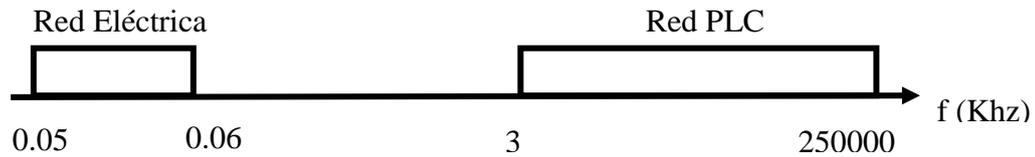


Figura 14 Separación en el dominio de la frecuencia de la señal de energía eléctrica y la señal con los datos.

Una vez que la señal atraviesa el canal, llega hacia el extremo de recepción en donde mediante un proceso de filtrado, se selecciona únicamente la señal correspondiente a la información que se ha enviado y luego se demodula para obtener los datos binarios que representan cada símbolo recibido.

4.5.6 Principales estándares BB-PLC para redes domésticas.

Existen varios estándares cuyas especificaciones han sido desarrolladas para guiar la adaptabilidad de PLC en ambientes tanto industriales, residenciales y móviles. A pesar de ello, la aplicabilidad de un estándar u otro depende de factores como las condiciones del entorno (indoor, outdoor, vehículos, alto voltaje, bajo voltaje, etc), los servicios requeridos soportados por la red (video, voz, acceso a internet, monitoreo, control remoto, entre otros) y la accesibilidad comercial de los equipos (disponibilidad en tiendas online, tiendas físicas, costo y requerimientos técnicos).

En este trabajo se consideran 3 principales estándares PLC domésticos: HomePlug AV, HomePlug AV2 e ITU-T G.hn. Estas tecnologías tienen ciertas diferencias en las especificaciones o parámetros técnicos establecidos en los transceptores como el tipo de código FEC (Forward error correction) y la capacidad MIMO. No obstante, existen parámetros como el espaciamiento interportadora y el número de símbolos del preámbulo que pueden llegar a ser semejantes, esto se evidencia en la Tabla 4 para G.hn y Homeplug AV2.

Tabla 4 Parámetros PHY relevantes de los principales sistemas PLC

Notation	Parameters	ITU-T G.hn	Homeplug AV2
f_S	Maximum frequency (MHz)	100	100
N_p	Nominal number of carriers of the preamble symbols	512	512
Δf_p	Intercarrier spacing in the preamble (kHz)	195,3125	195,3125
M_{S1}	Number of symbols in section 1 of the preamble	7	7
M_{S2}	Number of symbols in section 2 of the preamble	2	2
N_k	Nominal number of carriers of the header and data symbols	4096	4096
Δf_k	Intercarrier spacing of the header and data symbols (kHz)	24,414	24,414
T_{GI}	Guard interval of the header (μ s)	10,24	18,32
T_β	Rolloff interval (μ s)	5,12	4.96

Nota: Los datos de la tabla corresponden a los parámetros establecidos para definir la modulación en la capa física. (J. A. Cortés, 2023)

4.5.6.1 Home Plug AV (HPAV).

HomePlug AV es el estándar base desarrollado por la HomePlug Power Line Alliance y su lanzamiento fue en 2005. Se pueden destacar algunos aspectos importantes tanto de la capa física (PHY) como de la capa de control de acceso al medio (Medium Acces Control, MAC) de la última versión de las especificaciones. La PHY funciona en la gama de frecuencias de 1.80-30 MHz, utiliza multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) empleando 1155 portadoras de las cuales 917 corresponden a la máscara de tono, el espaciamiento entre subportadoras es de 24414 kHz, también tiene un código convolucional turbo (TCC) que proporciona un rendimiento robusto dentro de los 0,5 dB del límite de Shannon. (Wi-SUN Alliance, 2007)

Las densidades de modulación de BPSK a 1024-QAM se aplican de forma adaptativa a cada portadora en función de las características del canal entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx). (Larry Yonge, 2013)

Por otro lado, dentro de la capa MAC, se proporciona un servicio de calidad de servicio (QoS) orientado a la conexión y sin contención sobre una asignación periódica de acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA), y un servicio sin conexión y

priorizado basado en la contención sobre una asignación de acceso múltiple con detección de portadora/evitación de colisiones (CSMA/CA).

En la Figura 15 se detalla la arquitectura general del sistema, descrita en el White Paper de la primera versión que se emitió por la HomePlug Power Line Alliance. Nótese que tanto el plano de control como el de datos se encuentra separado.

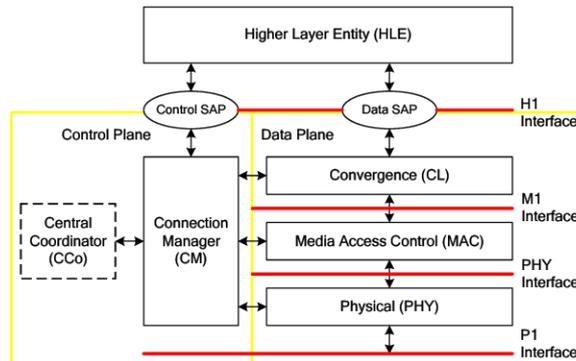


Figura 15 Arquitectura HPAV (HomePlug, 2005)

En el diagrama de bloques de la Figura 16, se estructuran las distintas etapas que atraviesan los flujos de datos y control para que puedan ser transmitidos y recibidos. En el lado del transmisor, las entradas corresponden a los datos provenientes de la capa MAC, se encuentran separadas en: datos HPAV, información de control HPAV y la información de control HomePlug 1.0.

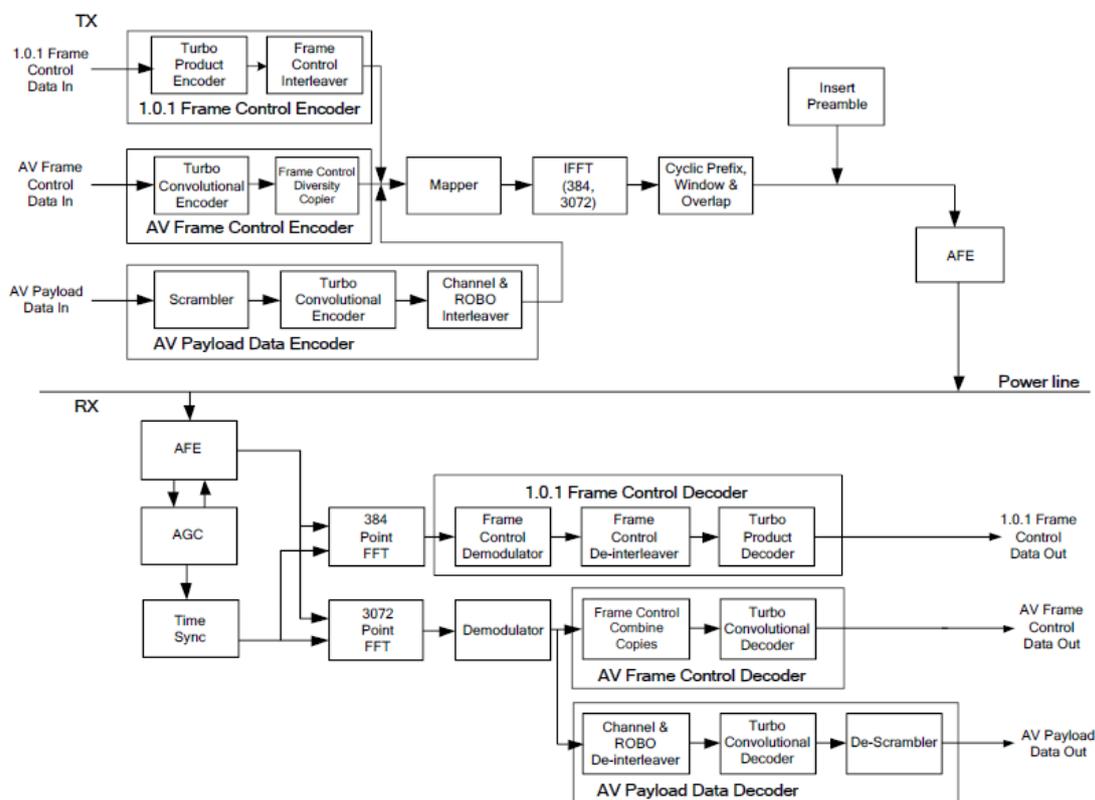


Figura 16 Diagrama de bloques de un transceptor HomePlug AV (Wi-SUN Alliance, 2007)

4.5.6.2 HomePlug AV2.

HomePlug AV2 utiliza modulación MIMO OFDM y emplea 4096 portadoras en 100 MHz, pero sólo se admiten portadoras de 1,8 a 86,13 MHz para la comunicación (3455 portadoras) (Larry Yonge, 2013). De las portadoras por debajo de 30 MHz, 917 se utilizan para la modulación de la máscara de tono de *broadcast* por defecto (Wi-SUN Alliance, 2014). El espaciamiento entre subportadoras es el mismo que el de HomePlug AV (aprox. 24414 kHz).

El diagrama de bloques del transceptor OFDM se muestra en la Figura 17. Tanto los flujos de control como los de datos atraviesan etapas similares a las que tiene el transceptor HPAV. Sin embargo, la diferencia más notable es la etapa de codificación MIMO en el transmisor y decodificación MIMO en el receptor, esta mejora se la hizo con el propósito de obtener mayor capacidad y cobertura.

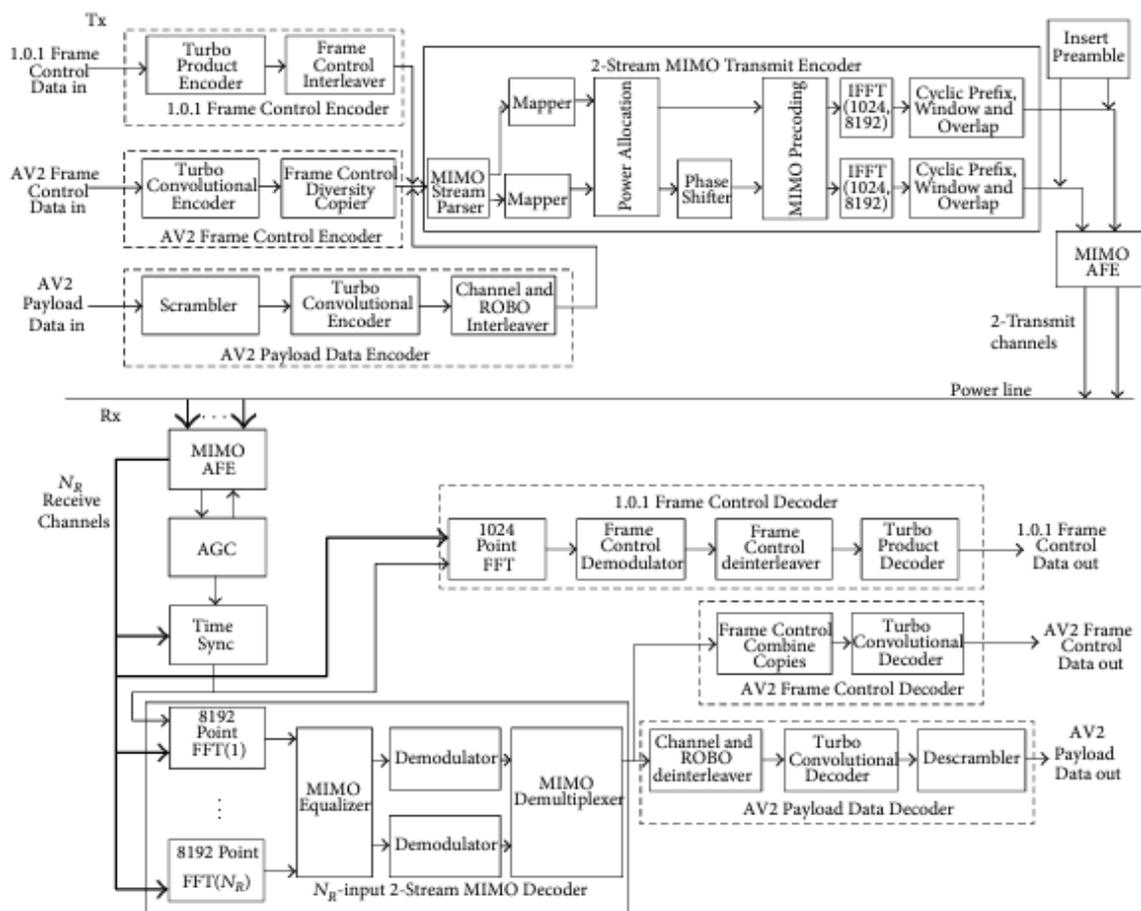


Figura 17 Transceptor MIMO OFDM de HomePlug AV2 (Wi-SUN Alliance, 2014)

4.5.6.3 ITU-T G.hn.

Es una familia de estándares que provee un marco de trabajo para la comunicación a través de líneas eléctricas, líneas telefónicas, cable coaxial y fibra óptica plástica.

Las especificaciones se encuentran dentro de la recomendación ITU-T G.9960 y G.9961 que trata los temas relacionados con los transeceptores unificados de alta velocidad para redes domésticas por cable: arquitectura del sistema, especificación de la capa física y especificación de la capa de enlace de datos.

G.hn utiliza modulación OFDM al igual que los otros dos estándares anteriormente expuestos. A pesar de ello, utiliza un tipo de FEC distinto que se denomina comprobación de paridad de baja densidad (Low-Density Parity-Check, LDPC).

Un conjunto de nodos puede operar sobre el mismo medio físico, pero uno de ellos tiene que ser denominado maestro de dominio (Domain Master, DM). Su función es la de coordinar la operación de todos los nodos en el dominio ITU.T G.hn. Todos los otros nodos son llamados punto final (End-Point, EP). De igual forma, si la red está compuesta por múltiples dominios entonces se establece un maestro global (Global Master, GM). (ITU, 2021)

En la Figura 18 se presenta la arquitectura genérica de una clásica red residencial, en la cual se puede evidenciar que diferentes equipos del hogar comparten el mismo medio cableado para interconectarse.

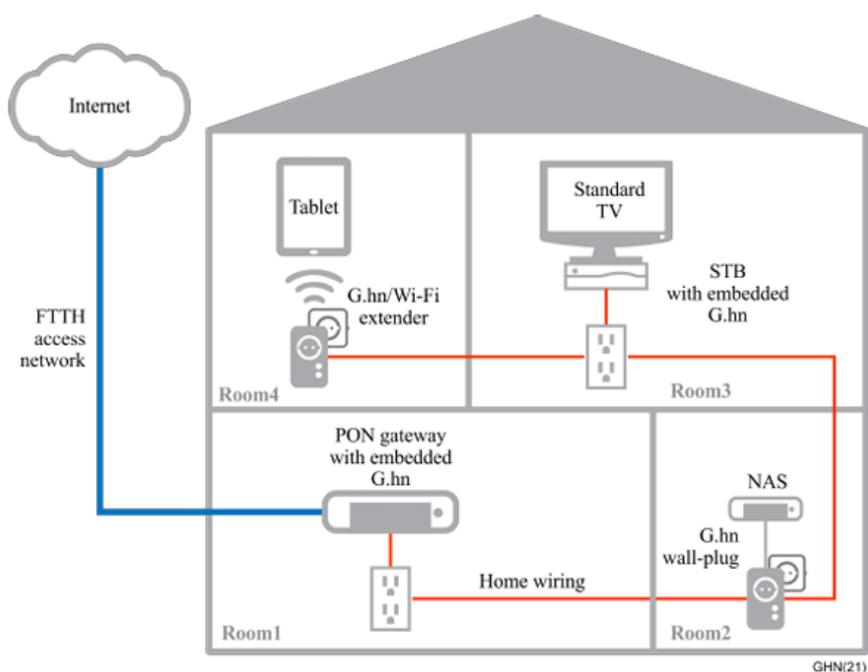


Figura 18 Arquitectura Genérica de la red ITU-T G.hn (ITU, 2021)

Al igual que muchos estándares, con la finalidad de tener una mejor perspectiva de los mecanismos y protocolos que hacen posible la comunicación entre nodos, la ITU.T ha establecido un modelo de referencia más específico que desglosa las dos últimas capas del modelo OSI. En la Figura 19 se puede apreciar los elementos que conforman la capa física y la de enlace.

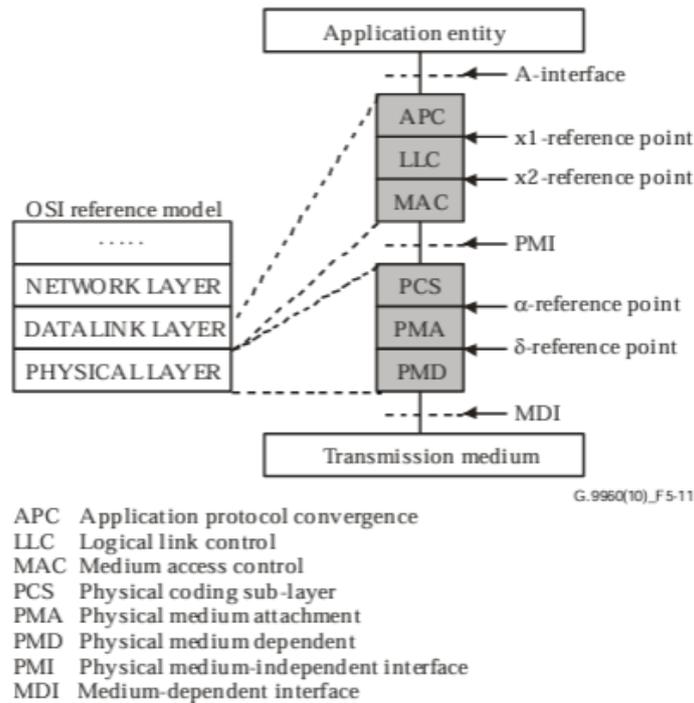


Figura 19 Modelo de referencia de protocolo de un transceptor de red doméstica. (ITU, 2023)

4.6 Gestión energética

Muchas empresas, industrias, domicilios y edificios utilizan una gestión eficiente de la energía que están consumiendo. En términos generales este actuar se puede definir como “la gestión proactiva, organizada y sistemática del uso de la electricidad para satisfacer los requisitos ambientales y económicos”. (MundoPosgrado, 2023)

4.6.1 Procesos para la gestión

- ✓ Monitoreo de las variables correspondiente al consumo energético. (voltaje, amperaje, temperatura, etc.)
- ✓ Toma de decisiones o acciones en base a la información obtenida del monitoreo. (desconexión de cargas, reducción de consumo, etc.)
- ✓ Seguimiento del progreso en base a la eficiencia energética obtenida.

4.7 Sensores

- **Sensor de Voltaje:** Los sensores de voltaje son dispositivos que permiten recolectar datos de la tensión existente entre dos puntos específicos de un circuito. Usualmente se basan en el campo electromagnético detectado convirtiendo o transformando este parámetro en un valor numérico interpretable.
- **Sensor de Corriente:** Utilizan una amplia gama de métodos de detección. Entre ellas, muchos detectan la corriente usando un elemento de conversión magnética insertado en el interior del núcleo magnético o un bobinado creando un núcleo magnético, dependiendo de la corriente que fluya en el conductor bajo prueba. (Kenta Ikeda, 2016)
- **Sensor de Potencia:** Estos sensores se basan en los principios que rigen el funcionamiento de los sensores de corriente. Es decir, tienen la capacidad de medir la potencia en función de la corriente y el voltaje existente en un circuito, se suelen utilizar divisores de voltaje y transformadores de corriente para cumplir este propósito.

4.7.1 Comparativa de sensores de parámetros eléctricos

El criterio de selección de los sensores aplicado en la metodología está determinado por el tipo de variable medida, el consumo en amperios, la precisión de la medición, la capacidad máxima de voltaje y corriente alterna soportada, el tipo de aislamiento utilizado para evitar interferencias y el costo accesible a nivel nacional.

En la Tabla 5 se muestra una comparativa de los sensores más comunes y asequibles para el desarrollo de proyectos relacionados con la medición o el monitoreo de variables eléctricas de corriente alterna. Esto permite tener una mejor visión de las ventajas y desventajas en términos de eficacia y uso eficiente de los recursos.

Tabla 5 Comparativa de sensores de parámetros eléctricos

Sensor	Variable	Consumo Amperios	Precisión	Voltaje y Corriente AC max.	Aislamiento	Costo
ZMPT101b	Voltaje	2mA	0.2%	250V	Básico	7\$
SCT-013- 100	Corriente	S/N	1-2%	100A	No invasivo	11.50\$
ACS712	Corriente	30mA	2.5%	30A	Básico Invasivo	8\$
Módulo PZEM-016	Voltaje, Corriente, potencia, energía, frecuencia y factor de potencia	20-30mA	0.5%	260V 100 A	Optoacoplador	30\$
Módulo PZEM 004T	Voltaje, Corriente, potencia, energía, frecuencia y factor de potencia	20mA	0.5%	260V 100A	Optoacoplador	17.50\$

4.8 Actuadores

Los actuadores son dispositivos encargados de ejercer una acción mecánica o eléctrica a través de una señal de control. Se utilizan en diversas aplicaciones como el encendido y apagado de circuitos a través de internet, la automatización del riego de cultivos, sistema de calefacción para control de temperatura, entre otros.

- **Relé:** Un relé es un interruptor electromagnético controlado por una señal eléctrica. Consiste en una bobina y un conjunto de contactos. Cuando se

aplica una corriente a la bobina, se genera un campo magnético que mueve los contactos para abrir o cerrar un circuito.

4.8.1 Comparativa de los relés más comunes

El criterio de selección de relés que se verá aplicado en la metodología está determinado por el consumo en amperios, la capacidad máxima de voltaje y corriente alterna soportada, el tipo de aislamiento utilizado para evitar interferencias, el voltaje DC de operación y el costo accesible a nivel nacional.

En la Tabla 6 se realiza una comparativa de los módulos relé más usados y asequibles para el desarrollo de proyectos relacionados con el control de cargas o circuitos eléctricos de corriente alterna.

Tabla 6 Comparativa de los relés más comunes

Relé	Consumo	Voltaje y Corriente AC max.	Aislamiento	Voltaje de operación DC	Costo
Modulo relé de 4 canales 10A	Reposo: 5-15mA Activado:320-360mA	250 V 10 A	Optoacoplador	5V	3.50\$
Modulo relé de 4 canales 10A NOYITO	Reposo: 5mA Activado:200mA	250V 10A	Optoacoplador	5V	5\$
Modulo relé de 4 canales 30A NOYITO	Reposo:5mA Activado: 200mA	250 V 30A	Optoacoplador	5V	19\$
Modulo relé de 4 canales YWBL-WH 30A	Reposo: 5mA Activado:200-320mA	250V 30A	Optoacoplador	5V	45\$

5 Metodología

De manera general, el desarrollo del presente trabajo se fundamenta en la aplicación del método deductivo para formular hipótesis a partir de conceptos y expresiones matemáticas ya establecidas.

En esta sección se detalla el enfoque metodológico utilizado para el desarrollo del sistema de monitoreo energético, describiendo tanto el lugar de implementación y sus características, como los métodos aplicados en el diseño, construcción y validación del sistema propuesto. Se incluyen además las bases teóricas que sustentan el diseño experimental y las utilizadas para garantizar la validez de los resultados.

5.1 Lugar de la implementación

El sistema fue implementado en un entorno residencial de $180m^2$ ($12 \times 15m$) ubicado en Catamayo, Loja, Ecuador. La instalación eléctrica opera a 120V y 60Hz, posee un único tablero de distribución con 4 circuitos principales, 3 de toma corrientes y uno de iluminación. En el primer circuito de tomas normalmente se encuentra conectada una TV, un AP y un convertidor óptico eléctrico (correspondiente al servicio de TV por cable). En el segundo circuito de tomas se encuentra conectada una licuadora, una barra de sonido y una plancha, en el tercer circuito de tomas hay una refrigeradora y una computadora portátil, y por último en el circuito de iluminación se encuentran conectados varios focos led de 10 W y uno de 50W. Cada circuito fue evaluado para garantizar la funcionalidad y la compatibilidad del sistema de monitoreo basado en IoT.

5.2 Enfoque metodológico

El enfoque metodológico utilizado en este proyecto fue de tipo mixto, combinando la revisión de literatura, el análisis cuantitativo de datos eléctricos con observaciones cualitativas sobre la funcionalidad del sistema en el entorno implementado.

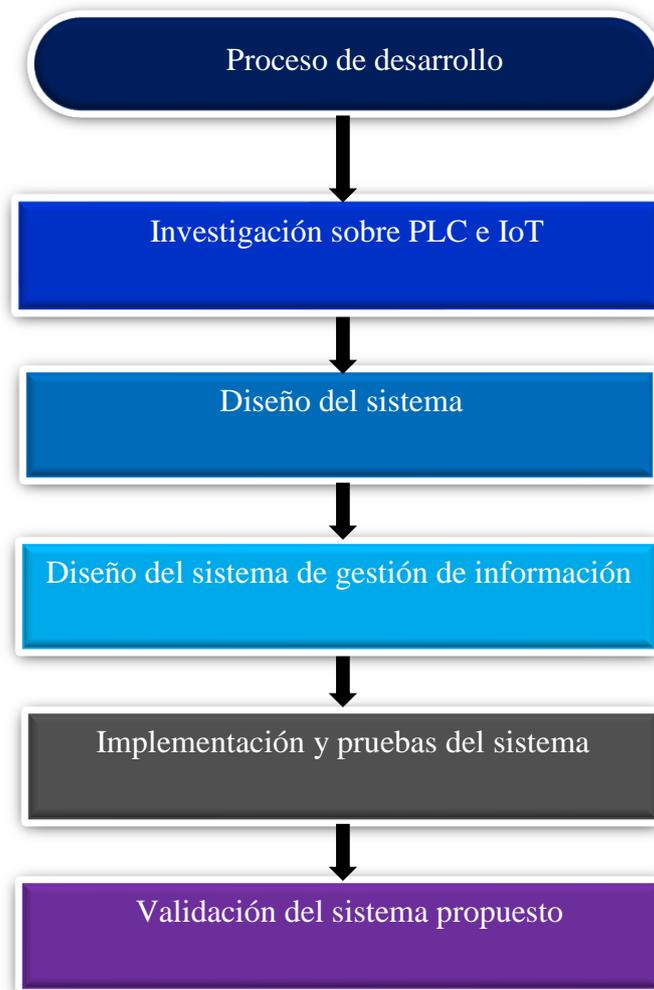
En primer lugar, se llevó a cabo una revisión bibliográfica para analizar los antecedentes teóricos y prácticos del monitoreo de variables eléctricas en entornos residenciales, identificando las principales tecnologías y protocolos. Este análisis permitió fundamentar el diseño del sistema propuesto y definir los parámetros clave para su implementación.

Posteriormente, el diseño experimental permitió medir y validar el comportamiento del sistema bajo condiciones controladas. Para ello, se compararon los valores de las variables eléctricas registrados por el sistema de monitoreo propuesto con

los obtenidos mediante un multímetro profesional, una herramienta ampliamente utilizada por especialistas en electricidad y energía.

Finalmente, el análisis de los datos recolectados durante el monitoreo de un día típico en la residencia, se llevó a cabo utilizando los servicios en la nube de la plataforma Blynk, entre ellos se incluye la recepción, almacenamiento y procesamiento de los datos.

5.3 Diagrama de los métodos específicos utilizados para el desarrollo del presente trabajo



5.4 Revisión de información técnica sobre IoT y PLC

En esta sección, se realizó una revisión de literatura sobre trabajos similares y un estudio sobre el paradigma IoT y la tecnología PLC. Para ello se utilizaron fuentes bibliográficas como artículos científicos, revistas académicas, tesis u otros trabajos relacionados con el tema de interés.

Los aspectos investigados sobre IoT, fueron: definición, modelo de arquitecturas, protocolos de comunicación y seguridad. Con respecto a PLC se investigaron temas

referentes a la clasificación de las tecnologías, principios de funcionamiento, arquitectura, caracterización del canal y estándares.

5.5 Diseño del sistema

En esta etapa, se desarrolló el diseño del sistema de monitoreo y control basado en IoT. Para llevar a cabo esto, fue necesario definir la topología de la red, la arquitectura IoT por capas, la plataforma de servicios en la nube que permita almacenar, procesar y visualizar datos (AWS IoT, ThingSpeak, Blynk, ThingsBoard) y los protocolos de comunicación (MQTT, CoAP, Binario de Blynk o HTTP) que se encargan de facilitar la transmisión de datos entre los dispositivos.

En cuanto al hardware, se seleccionaron, los sensores de voltaje y corriente que recogen datos de medición, los actuadores (switchs eléctricos o relés) que se encargan de ejercer una acción de encendido o apagado, las placas basadas en microcontrolador (Arduino, ESP32, NodeMCU) o microordenadores (Raspberry Pi) que tienen funciones tanto de comunicación, control y procesamiento en general, y los módems PLC que modulan los datos y los transmiten a través de la línea de potencia.

Una vez seleccionados todos los elementos, se elaboró un diagrama con las conexiones físicas de los elementos de hardware tanto en el plano de corriente continua (electrónico) como en el plano de corriente alterna (eléctrico).

Finalmente, se realizó un diagrama de bloques que se puede visualizar en el Anexo 1 con la distribución del hardware y los conectores eléctricos (terminales o borneras) del tablero de anclaje a la red eléctrica residencial. Este tablero se ha situado junto al tablero de distribución eléctrica residencial.

5.6 Diseño del sistema de gestión de información

Se realizó el diseño de la interfaz que permite la interacción del usuario con los flujos de datos de monitoreo y control.

Algunas plataformas IoT en la nube (AWS, ThingsBoard, Ubidots, ThingSpeak, Blynk, HomeAssistant) disponen de una zona de desarrollo para la creación de un panel de control con los widgets (tablas, gráficos, indicadores y botones) respectivos que permitan al usuario visualizar la información del consumo energético y enviar instrucciones de encendido y apagado de cada circuito. En este trabajo se utilizó el componente Blynk para crear los flujos de datos de las variables eléctricas y asociarlos a las etiquetas de texto, gráficas e interruptores respectivos.

En esta sección es importante cuidar la estética y organizar todos los elementos con el objetivo de proporcionar un entorno intuitivo que sea fácil de usar para el usuario.

5.7 Implementación y pruebas del sistema

En este apartado, se construyó y ensambló el tablero del sistema de monitoreo y control (tablero de anclaje a la red eléctrica) y se lo instaló en la red eléctrica residencial del escenario planteado.

Posteriormente, haciendo uso de un entorno de desarrollo integrado de Arduino se desarrolla el código de programación con un lenguaje basado en C++ que se carga en la placa de computo del sistema de monitoreo y control (Arduino UNO). Esto permite recolectar los datos de los sensores, obtener el consumo energético acumulado de cada circuito y enviar los datos hacia el servicio en la nube seleccionado para verificar que se muestran en el dashboard. De igual forma, se desarrolla el código para que los actuadores reciban las instrucciones de encendido y apagado provenientes del sistema de gestión de información (dashboard).

Finalmente, se seleccionan 5 tipos de electrodomésticos para ejecutar las pruebas de funcionamiento comparando los valores de voltaje, corriente y potencia que llegan al dashboard del sistema de monitoreo con los obtenidos realizando una medición manual con un multímetro profesional de la marca Klein Tools. Se espera que los valores registrados por el sistema de monitoreo se encuentren cerca de los medidos con el multímetro para posteriormente poder determinar si es necesaria una calibración.

5.8 Validación del sistema propuesto

En esta sección se evalúa la precisión obteniendo el error de medición del sistema en términos de monitoreo, para ello se mide con un multímetro digital de la marca ANENG el consumo de las cargas conectadas a los circuitos y se compara este valor con el medido usando el sistema propuesto. La fórmula para calcular el error relativo es la siguiente:

$$e \% = |Vm - Vr|/Vr$$

Para validar la precisión del sistema en términos del control(on/off) de circuitos, se calculó el retardo existente al hacer ping hacia el dispositivo maestro desde la plataforma de servicios en la nube.

6 Resultados

6.1.1 Topología de la red IoT fusionada con PLC

La topología de la red se ha diseñado teniendo en cuenta que el canal de comunicación es la línea eléctrica del hogar seleccionado para la implementación, es decir, los datos de las variables eléctricas son extraídos del canal a través de sensores y enviados hacia el internet utilizando el mismo canal. La topología implementada es una estrella, cuyo eje central es el gateway local con acceso a internet y sus vértices sostienen tanto a los sensores y actuadores como a los dispositivos de usuario y servicios en la nube. En la Figura 20 se puede apreciar una representación por capas de los niveles de procesamiento y gestión de datos en una red IoT (NIEBLA, NUBE Y BORDE).

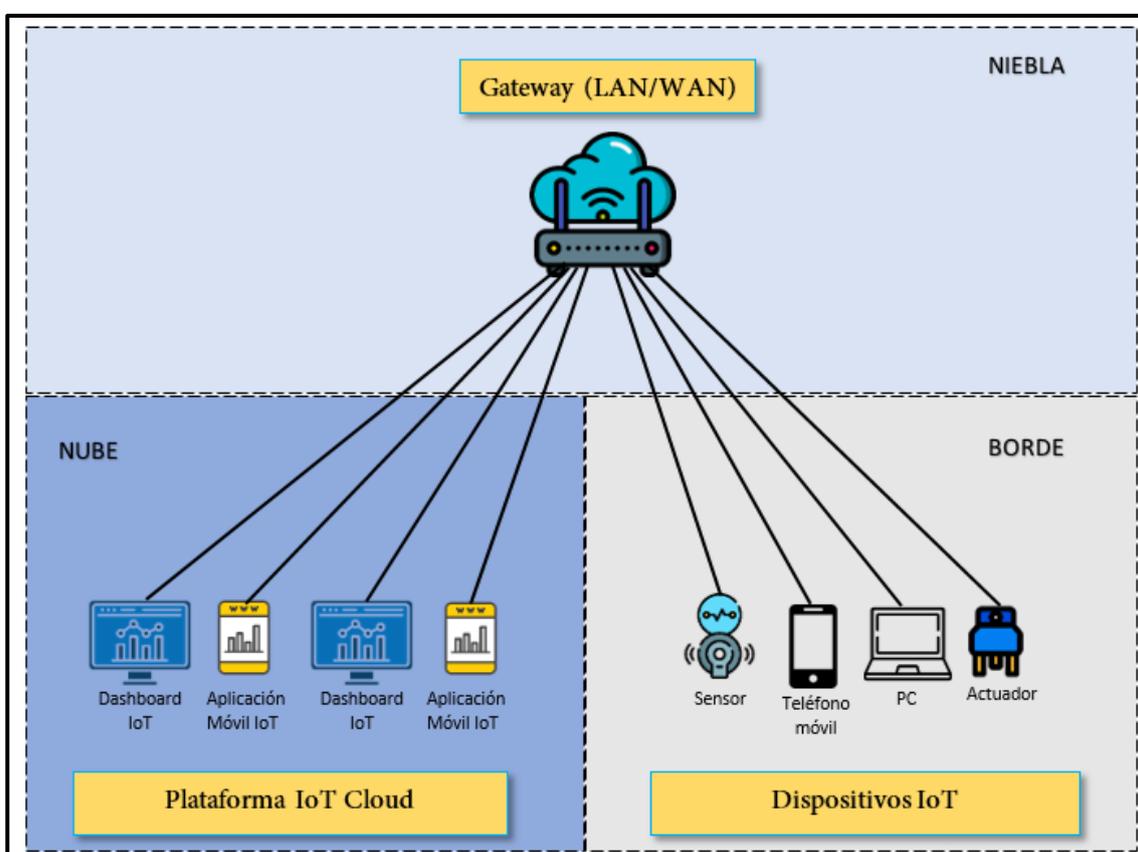


Figura 20 Topología estrella

De forma más detallada, en la Figura 21 podemos identificar que en la capa de borde se lleva a cabo la recopilación de datos y el control mediante sensores y actuadores (relé) que se encuentran acoplados al tablero de distribución. En la capa de niebla los valores medidos son leídos, procesados y enviados utilizando un módulo Ethernet sobre la placa de microcontrolador, adaptadores PLC y un gateway que funcionan como un

puente para reenviar los datos a la nube y poder visualizarlos en los dispositivos de usuario a través del dashboard. El envío de instrucciones de control de cargas se realiza utilizando la misma vía en dirección opuesta.

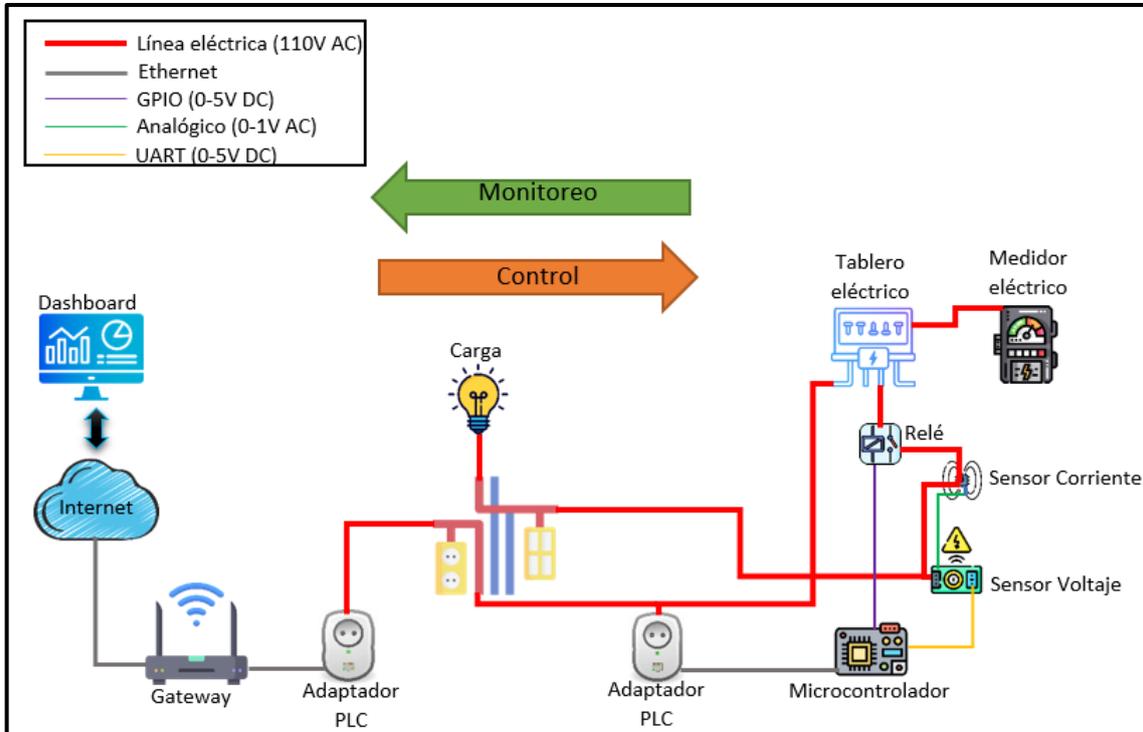


Figura 21 Diagrama de referencia de la red IoT y PLC fusionadas

6.1.2 Arquitectura IoT de 4 capas

El modelo de referencia de 4 capas facilita la organización y gestión del sistema al estructurar sus componentes en capas específicas: la capa de dispositivos agrupa todos los dispositivos IoT que recogen datos y ejecutan acciones o generan y responden peticiones; la capa de red se encarga de la transmisión efectiva de datos entre los dispositivos y otros componentes del sistema; la capa de middleware actúa como intermediario, procesando y coordinando los datos entre la red y los servicios de aplicación; y la capa de aplicación proporciona las herramientas necesarias para el diseño del dashboard y permite que el usuario interactúe con el sistema.

En la Figura 22 se muestra de manera gráfica el modelo de arquitectura IoT de referencia que se ha utilizado y se detalla la distribución de los elementos del sistema (hardware, estándares, protocolos APIs, plataformas IoT, etc). Aquí se demuestra que es

posible cumplir con el propósito principal del sistema a través de distintos medios y soluciones tecnológicas.

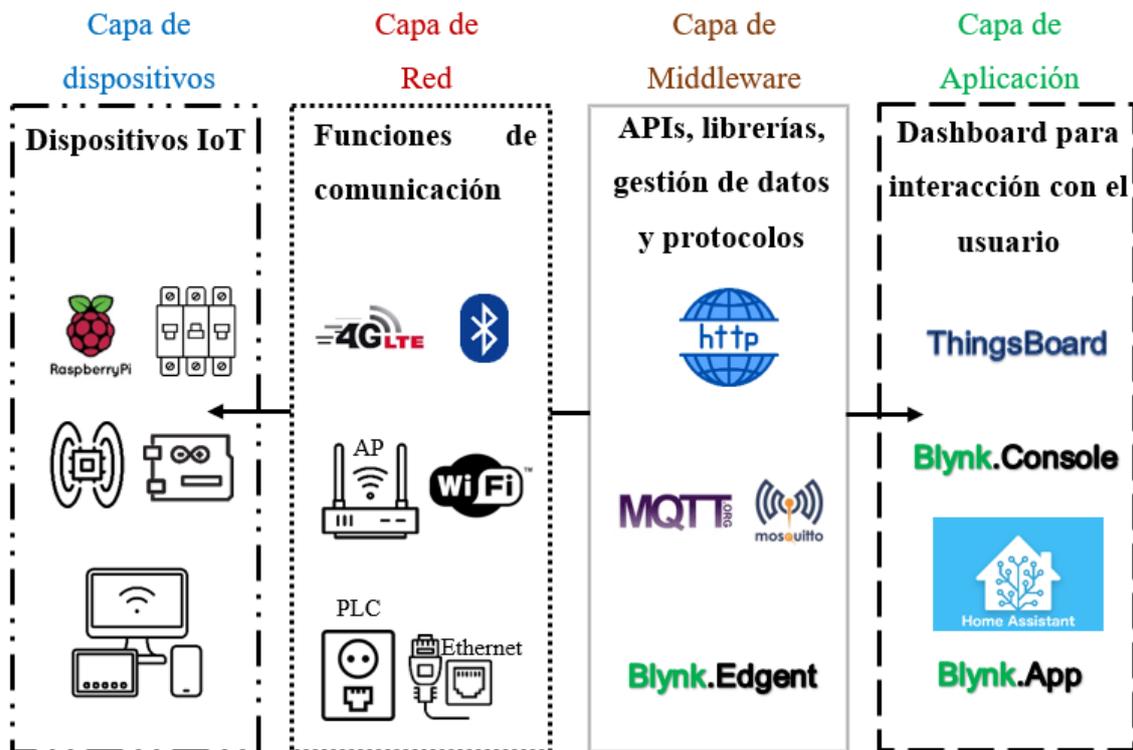


Figura 22 Arquitectura IoT de 4 capas seleccionada

En este trabajo los elementos físicos que se consideran dentro de la capa de dispositivos, se encuentran los teléfonos celulares, computadoras, sensores de voltaje, sensores de corriente, actuadores como relés o interruptores (switchs) y la placa de microcontrolador.

En la capa de red se ubican los módems PLC, módulos ethernet y el punto de acceso que son los encargados de recibir y transmitir información de un extremo a otro de la LAN a través de tecnologías y estándares de comunicación.

En la capa de middleware, se utiliza la plataforma Blynk, que permite la recepción, procesamiento y almacenamiento de datos. Además, proporciona APIs y bibliotecas que facilitan la integración con diferentes dispositivos, garantiza la autenticación y utiliza un protocolo de mensajería binario sobre TCP/IP para establecer la comunicación entre la placa de microcontrolador (Arduino) y dispositivos inteligentes (como computadoras y teléfonos móviles) conectados a la nube.

En la capa de aplicación, se incluyen los servicios en la nube que permiten la visualización de los datos y el envío de instrucciones. En este caso, se utiliza la consola de Blynk (Blynk Console), lo que permite al usuario interactuar con el sistema a través de un panel de control web (Web Dashboard), proporcionando una interfaz intuitiva para monitorear y controlar los dispositivos conectados.

6.1.3 Selección del software y hardware

Los distintos componentes principales del sistema se seleccionaron considerando su fácil accesibilidad y las ventajas técnicas que proporcionan para el cumplimiento de los objetivos. En otras palabras, se ha buscado mantener un equilibrio entre eficacia y eficiencia.

6.1.3.1 Plataforma para monitoreo y control Blynk

En este trabajo se ha optado por utilizar un modelo de distribución de software basado en la nube (SaaS), y se ha elegido la plataforma Blynk para la gestión y control de dispositivos IoT. El uso de servicios en la nube evita tener que adquirir hardware costoso y difícil de configurar.

Se puede definir a Blynk como un paquete de software integral que ofrece servicios para desarrollar proyectos de IoT. (Blynk, 2024)

Los componentes que lo constituyen son los siguientes:

- **Consola Blynk (Blynk Console):** es una aplicación web que permite la gestión de dispositivos, usuarios, datos, usuarios organizaciones y ubicación. Aquí se puede diseñar el dashboard, monitorear y controlar.
- **Aplicaciones Blynk (Blynk App):** ofrece una aplicación móvil nativa para iOS y Android y las funciones son similares al componente anterior.
- **Nube Blynk (Blynk Cloud):** es una infraestructura de servidor que funciona como el núcleo de la plataforma y enlace a todos los componentes.
- **Blynk R:** abarca registro de usuarios con invitaciones, gestión de roles y permisos y multialquiler.
- **Aire Blynk (Blynk Air):** actualización por aire de nuevo firmware en dispositivos.

6.1.4 Protocolo de mensajería

La biblioteca Blynk utiliza un protocolo binario propietario. Cada mensaje consta de encabezado y cuerpo. (Blynk, 2023)

Encabezado

- Comando de protocolo (1 byte);
- Id. del mensaje (2 bytes);
- Longitud del cuerpo del mensaje (2 bytes);

Cuerpo

- cadena (puede tener hasta 2^{15} bytes)

La estructura de los mensajes se observa en la Tabla 7.

Tabla 7 Estructura de los mensajes Blynk

Dominio	ID del mensaje	Longitud/Estado	Cuerpo
1 byte	2 bytes	2 bytes	variable

6.1.4.1 Módulo multifunción PZEM-004T-100A

Existen 2 versiones, una de 10 A y otra de 100A. Sin embargo, en este caso se optó por utilizar la segunda opción que se muestra en la Figura 23 ya que permite una conexión más segura y menos invasiva para medir los parámetros de corriente alterna.

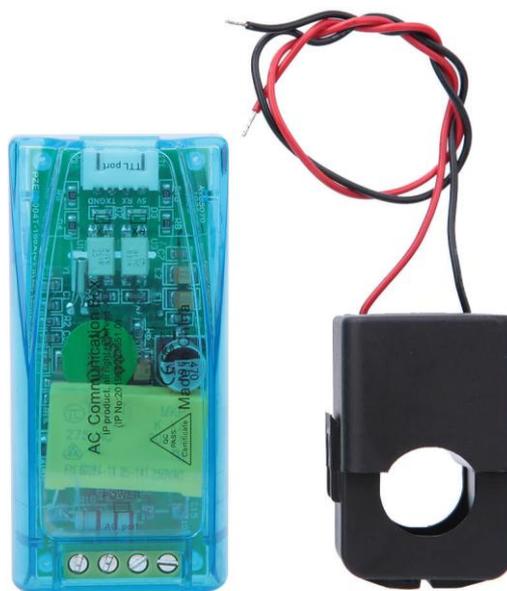


Figura 23 Módulo de comunicación PZEM-004T v3.0

El módulo se utiliza principalmente para medir la tensión alterna, la corriente, la potencia activa, la frecuencia, el factor de potencia y la energía activa (InnovatorsGuru, 2019). No tiene función de visualización, los datos se leen a través de la interfaz lógica transistor a transistor (Transistor-Transistor Logic, TTL).

Las especificaciones técnicas de los rangos de operación y medición se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8 Especificaciones técnicas PZEM-004T

Variable	Rango	Resolución	Precisión
Voltaje	80~260V	0.1V	0.5%
Corriente	0~100A	0.001A	0.5%
Potencia Activa	0~23kW	0.1W	0.5%
Factor de potencia	0~1	0.01	1 %
Frecuencia	45Hz~65Hz	0.1Hz	0.5%
Energía Activa	0~9999.99kWh	1Wh	0.5%

Este módulo debe incluir un transformador de corriente (Current Transformer, CT) no invasivo que permita rodear el cable para poder detectar la intensidad de corriente que está pasando por un circuito. En otras palabras, el campo magnético que produce la corriente eléctrica del cable puede ser medido a través de este componente.

6.1.4.2 Protocolo de comunicación

La capa física usa el protocolo Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, UART) para la interface de comunicación TTL. La velocidad en baudios es de 9600, tiene 8 bits de datos, 1 bit de parada y no tiene paridad. Mientras que la capa de aplicación usa el protocolo serie basado en la arquitectura maestro/esclavo Modbus-RTU. El rango de direcciones del esclavo es 0x01~0xF7. La dirección 0x00 es usada como la dirección de broadcast. (InnovatorsGuru, 2019)

6.1.4.3 Diagrama de bloques funcional

En la Figura 24 se exponen los distintos bloques que conforman el módulo de medición. No está demás mencionar que el optoacoplador es uno de los componentes más importantes ya que ofrece seguridad al aislar el plano de corriente alterna del plano de corriente continua. Los terminales L y N corresponden al neutro y línea para la

alimentación del voltaje de corriente alterna, los terminales CT están diseñados para conectar el transformador de corriente no invasivo, mientras que del lado derecho tenemos los pines básicos que hacen posible la entrada y salida de datos.

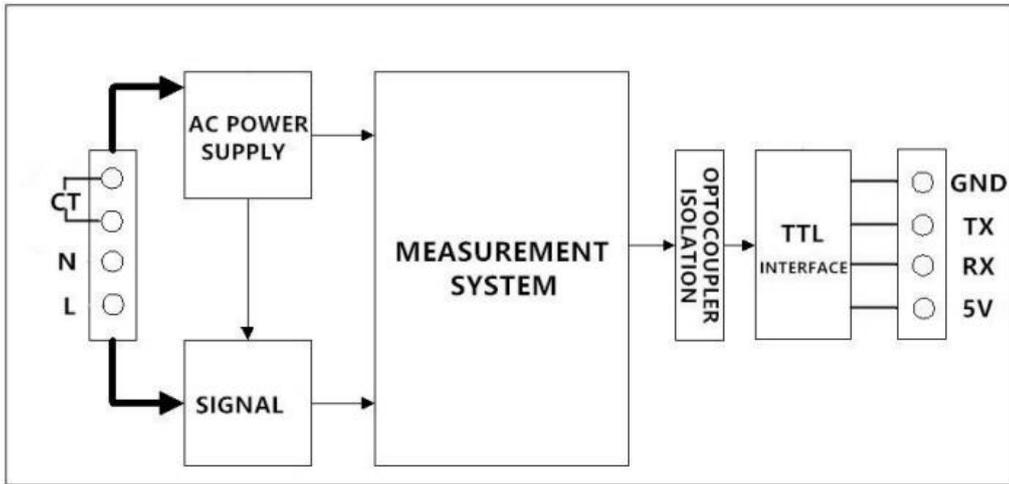


Figura 24 Diagrama de bloques funcional del PZEM-004T

6.1.4.4 Módulo relé de 4 canales

Permite abrir o cerrar los circuitos a través de una señal de control (5VCC) enviada desde el widget interruptor (widget switch) establecido en el dashboard de la plataforma Blynk. En la Figura 25 se puede ver que existen 4 secciones cada una tiene el contacto común, normalmente abierto (NA) y normalmente cerrado (NC).

Para aplicaciones de hogares en las que se superen los valores de corrientes cercanas a la capacidad máxima (~10A) es preferible cambiar y usar otro dispositivo cuyo uso sea de tipo industrial (~30A).



Figura 25 Módulo relé de 4 canales (AV Electronics, 2024)

Las especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9 Especificaciones técnicas módulo relé 4 CH

Relé de 4 canales	
Voltaje de Operación:	5V DC
Señal de Control	TTL (3.3V o 5V)
Nº de Relays (canales)	4 CH
Modelo Relay	SRD-05VDC-SL-C
Capacidad máx	10A/250VAC, 10A/30VDC
Voltaje de Operación	5V DC
Corriente máx	10A (NO), 5A (NC)
Tiempo de acción	10 ms / 5 ms
Para activar salida NO	0 Voltios
Entradas Optoacopladas	Si
Indicadores LED de activación	Si

6.1.4.5 Arduino UNO R3 SMD

El Arduino Uno es una placa de desarrollo y un microcontrolador basado en la plataforma Arduino, diseñado para facilitar la realización proyectos electrónicos y de programación. En el Arduino Uno R3 SMD, el microcontrolador ATmega328P está montado utilizando una técnica llamada "dispositivo de montaje superficial" (Surface-Mount Device, SMD), que significa que el chip está soldado directamente sobre la superficie de la placa. En la Figura 26 se puede observar la forma y distribución de los pines.



Figura 26 Placa de desarrollo Arduino UNO R3 SMD (NovatronicEc, 2020)

Las especificaciones técnicas de la placa se encuentran en la Tabla 10.

Tabla 10 Especificaciones técnicas Arduino Uno R3 SMD

Arduino Uno	
Rango de alimentación recomendado Jack	7 a 12 volts
Voltaje de operación	5V
SRAM	2KB
Comunicación	USART
Rango de alimentación absoluto	6 a 20 volts
Entradas/salidas digitales	14
Canales de PWM	6
Entradas analógicas	6
Corriente máxima de salida en pines de IO	20 mA
Corriente de salida en el pin de 3.3 volts	50 mA
Memoria Flash para programas	32 KB

6.1.4.6 Ethernet Shield W5100

El Shield Ethernet W5100 que se observa en la Figura 27 es una herramienta que permite controlar Arduino a través de Internet o de la LAN de la residencia. Es compatible con Arduino Uno, Mega y Leonardo. Además, las librerías Ethernet y SD vienen incluidas por defecto en el IDE de Arduino, por esa razón no se requiere descargar librerías adicionales. Las principales especificaciones se ven en la Tabla 11.

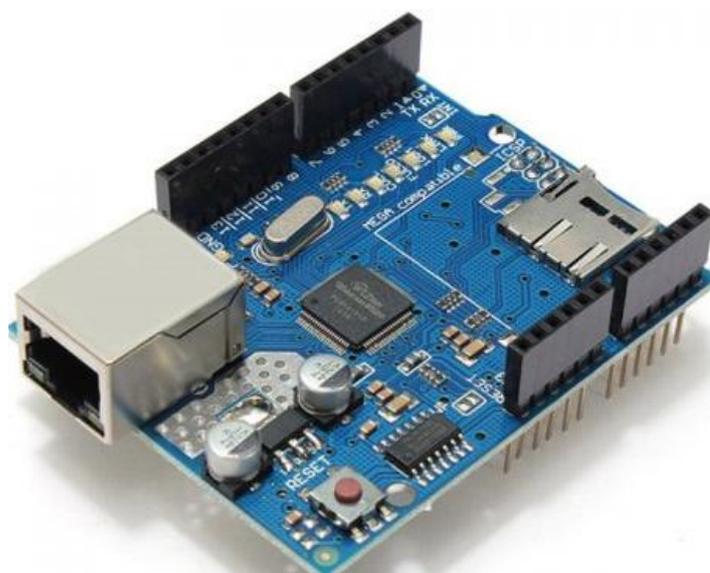


Figura 27 Ethernet Shield W5100

Tabla 11 Especificaciones técnicas del módulo Ethernet Shield W5100

Nano Powerline TLPA-4010	
Voltaje de operación	5V DC
Memoria Buffer TX/RX	16KB
Estándar	IEEE 802.3 10BASE-T y 802.3u 100BASE-TX
Ancho de banda	10Mbps/100Mbps (Half o Full Duplex)
Conector interfaz	RJ45 HR911105A
Peso	27 gramos
Dimensiones	70*54*24 mm

6.1.4.7 Adaptador Nano Powerline AV500 TL-PA4010

Es un dispositivo que permite extender la cobertura de nuestra red de internet haciendo uso de la red eléctrica residencial. Está en cumplimiento con el estándar HomePlug Av y la velocidad de transferencia de datos teórica es de hasta 500 Mbps. Sin embargo, en la práctica las velocidades que se alcanzan oscilan entre los 50~100 Mbps dependiendo de las condiciones de ruido y atenuación existentes en el canal. Para asegurar que solo los adaptadores autorizados se comuniquen entre si es necesario establecer una red privada con el botón Pair o haciendo uso del software de utilidad powerline (Anexo 2). En la Figura 28 se puede ver la forma y el diseño del adaptador que se ha utilizado en este trabajo.



Figura 28 Adaptadores Nano Powerline AV500 TL-PA4010 (TP-Link, 2024)

En la Tabla 12 se muestran sus principales especificaciones técnicas.

Tabla 12 Especificaciones técnicas del Adaptador Nano Powerline TL-PA4010

Nano Powerline TLPA-4010	
Velocidad máxima teórica	500 Mbps
Estándares y Protocolos	HomePlug AV, IEEE802.3, IEEE802.3u
Distancia máxima de cobertura	300 m
Modo de uso	Plug and play
Método criptográfico	AES-128
Modo ahorro de energía	Sí (85%)
Interface	1 puerto Ethernet 10/100Mbps
Interfaz de configuración	Utilidad Powerline(Necesario descargar)
Consumo de energía	Máximo: 4.60W (220V/50Hz) Típico: 4.26W (220V/50Hz) En Espera: 0.88W (220V/50Hz)
Tecnología de modulación	OFDM
Temperatura de funcionamiento	0°C~40°C (32°F~104°F)

6.1.5 Diagrama de conexiones del hardware

Los datos de los sensores y actuadores son recibidos y enviados desde y hacia internet con la ayuda de una Ethernet Shield (Placa Ethernet) montada a la placa Arduino Uno, esta a su vez se encuentra conectada a un adaptador PLC (acoplado a la red eléctrica) utilizando un cable Ethernet tal como se puede apreciar en la parte de recogimiento de datos (parte derecha) de la Figura 21. Para poder tener una mejor referencia de los elementos se puede considerar a este montaje central como el dispositivo “maestro” encargado de gestionar la salida y entrada de los datos.

La conexión de los módulos esclavos PZEM-004T con el dispositivo maestro (Ethernet Shield + Arduino UNO) depende del protocolo de comunicación serial (bit a bit) que se maneja a nivel de la capa física. En este caso los dispositivos son compatibles con UART usando la interfaz de comunicación TTL. Sin embargo, los pines de transmisión y recepción de la placa Arduino UNO son los mismos para los 4 módulos de medición (Pin_2 RX y Pin_3 TX), esto es posible gracias a la utilización del protocolo Modbus RTU que permite intercambiar datos asignando una dirección específica a cada módulo. Es importante considerar que los pines de transmisión se deben conectar de manera cruzada y no directa (TX-RX y RX-TX).

Por otro lado, el módulo relé de 4 canales tiene 4 pines y es compatible con una comunicación digital simple para recibir señales de control de 5V o 0V, por ello es necesario utilizar un pin de la placa Arduino UNO para cada canal.

Los pines de alimentación GND y 5 VCC de los módulos PZEM-004T y el modulo relé de 4 canales pueden ser conectados en puente directamente desde la placa Arduino UNO. Sin embargo, para garantizar un rendimiento óptimo en el funcionamiento de los dispositivos se recomienda integrar una alimentación externa como se muestra en la Figura 29.

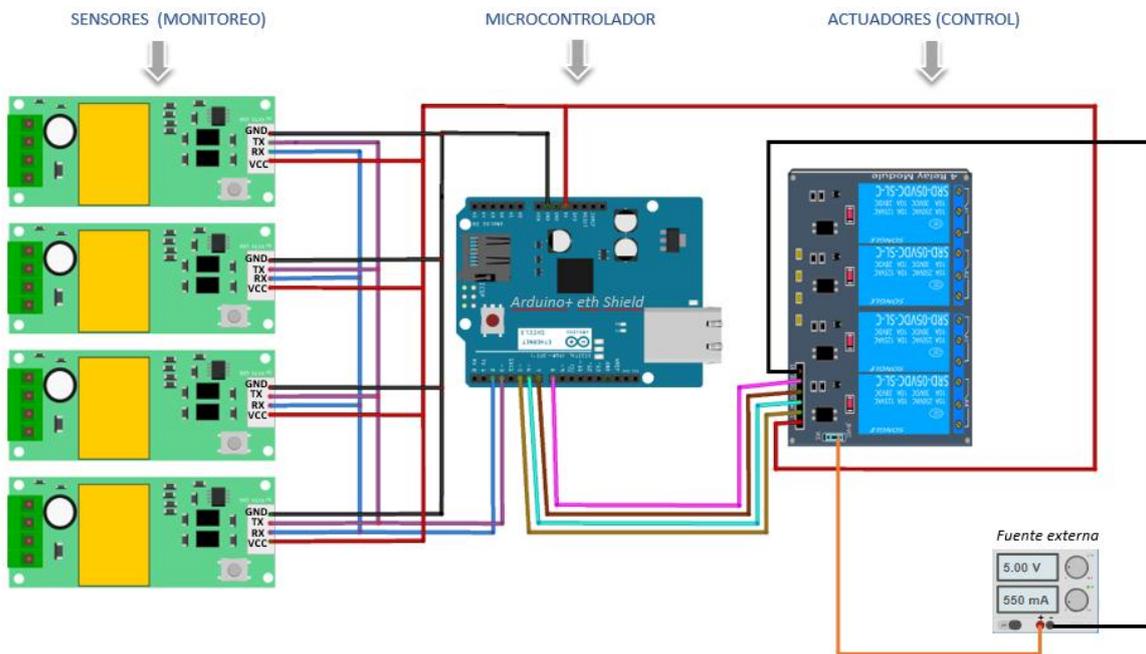


Figura 29 Diagrama de conexiones del plano electrónico

6.1.5.1 Placa PCB para el dispositivo maestro

Varios componentes comparten pines y necesitan puentes, por tal razón se diseñó una placa que facilite el “puenteo” de pines a través de rutas de cobre con la finalidad de poder integrar los elementos del hardware y tener una mejor organización de las conexiones. En la Figura 30 se muestra el diseño.

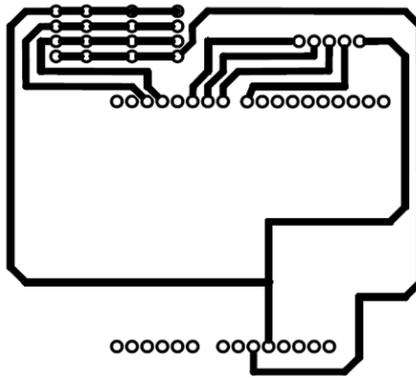


Figura 30 Diseño de la placa PCB para el dispositivo maestro

6.1.6 Diagrama de conexiones eléctricas

Se han seleccionado cuatro circuitos del tablero de distribución eléctrica para llevar a cabo el monitoreo energético: uno de iluminación y tres de tomas. Sin embargo, solo tres de estos circuitos pueden ser controlados (encendidos y apagados) a través del panel de control en línea. Esto se debe a que el circuito que alimenta la sala donde se encuentra el punto de acceso residencial también es el mismo circuito que soporta el canal PLC utilizado para enviar y recibir las instrucciones de encendido y apagado. En caso de desconectar este canal, no será posible reconectarlo mediante el sistema de monitoreo y control; se necesitaría una reconexión manual.

En la Figura 31 se presenta una captura del diagrama documentado en el Anexo 3, aquí se detallan las conexiones de corriente alterna que tienen los sensores y los relés en el tablero de anclaje a la red eléctrica. Los elementos Q corresponden a los interruptores termo magnéticos que se encargan de proteger a los electrodomésticos en caso de que existan cortocircuitos o excesos de corriente. Los elementos B son los bornes o terminales necesarios para realizar las conexiones de los segmentos de circuito, los elementos C son los terminales donde se conectan los cables neutro (barra de neutros), los elementos R corresponden a los relés, el elemento base o tomacorriente es el que permite la conexión del adaptador PLC y la alimentación del Arduino, los terminales enumerados del 1 al 8 corresponden a una bornera agregada para realizar la distribución de alimentación alterna hacia los elementos del sistema de monitoreo y control, y los terminales enumerados del 1 al 4 son los correspondientes a los bornes de la parte de CA de los módulos PZEM-004T.

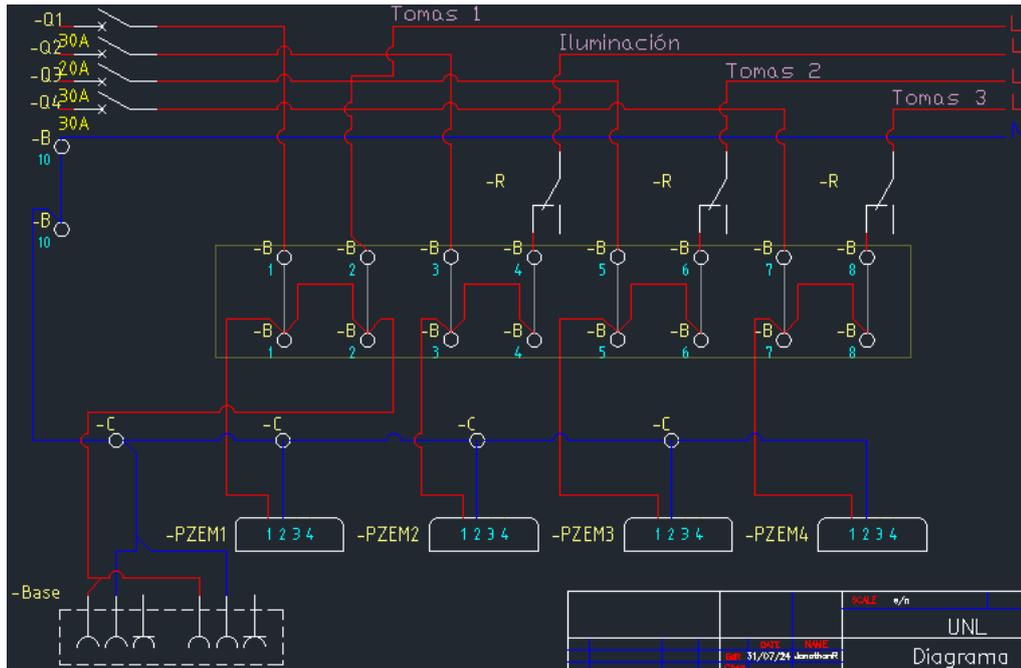


Figura 31 Diagrama de conexión de la parte eléctrica del sistema

6.2 Diseño del dashboard

En este trabajo, se optó por utilizar un modelo de distribución de software basado en la nube (Software as a Service, SaaS) mediante el uso de Blynk. Esta plataforma permite tanto el desarrollo de una plantilla (Template) que gestiona los flujos de datos entrantes y salientes, como el diseño del panel de control web (Web Dashboard). Para comenzar, es necesario iniciar sesión en la plataforma y elegir un plan de suscripción pagado; en este caso, el plan Maker de bajo costo es suficiente, ya que ofrece un límite de 20 flujos de datos, 3 usuarios, 10 dispositivos y 10 plantillas. Además, la plataforma almacena los datos en crudo de manera mensual.

Para crear el proyecto se agregó una nueva plantilla en la zona de desarrollo que se puede ver en la Figura 32.

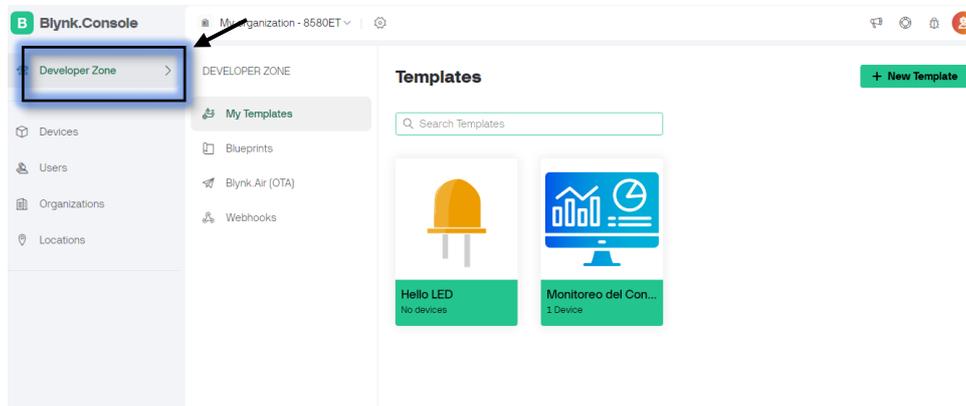


Figura 32 Zona de desarrollo de Blynk console

Al presionar el botón “Nueva Plantilla” se abre una ventana en donde se rellenó el formulario que se muestra en la Figura 33.

Create New Template

NAME
Name 0 / 50

HARDWARE: Arduino
CONNECTION TYPE: WiFi

DESCRIPTION
Description 0 / 128

Cancel Done

Figura 33 Configuración básica de la plantilla (Template)

Una vez hecho, se ingresó automáticamente a la interfaz de edición y se siguió los pasos que se detallan dentro de la plantilla. En la Figura 34 se puede observar los 4 pasos necesarios para completar la creación del proyecto o plantilla.

Blynk.Console My organization - 8580ET

Developer Zone

Devices
Users
Organizations
Locations

Monitoreo y control del consumo de energía

Cancel Save

Home

What's next?

- 1 Configure template
- 2 Set Up Datastreams
- 3 Set up the Web Dashboard
- 4 Add first Device

Template settings
Arduino, Ethernet

Firmware configuration
Template ID and Template Name should be declared at the very top of the firmware code.

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID  
'TMPL2WkxwBGS'  
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Monitoreo  
y control del consumo de energía"
```

Figura 34 Pasos para terminar de crear una plantilla

El primer paso corresponde a la configuración básica de la plantilla, ahí se pudo modificar los primeros valores ingresados al crear la plantilla.

El segundo paso corresponde a la creación de los flujos de datos los cuales van a estar vinculados a un pin virtual (V1, V2, V3...). Estos flujos de datos pueden ser de tipo

entero, decimal o cadena de texto. En la Figura 35 se muestra un ejemplo del formulario que se debe rellenar para cada flujo creado. En total se crearon 20 flujos de datos.

Virtual Pin Datastream

NAME	ALIAS		
<input type="text" value="Energia C1"/>	<input type="text" value="E C1"/>		
PIN	DATA TYPE		
<input type="text" value="V4"/>	<input type="text" value="Double"/>		
UNITS			
<input type="text" value="Kilowatts, kW"/>			
MIN	MAX	DECIMALS	DEFAULT VALUE
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="###"/>	<input type="text" value="Default Value"/>

Figura 35 Formulario para crear un flujo de datos (Datastream)

En el paso 3 se diseña el panel de control web o dashboard en la sección que se indica en la Figura 36, aquí se escogieron los widgets en donde se visualiza (monitoreo) o se envía (control) la información correspondiente a través de los flujos de datos.

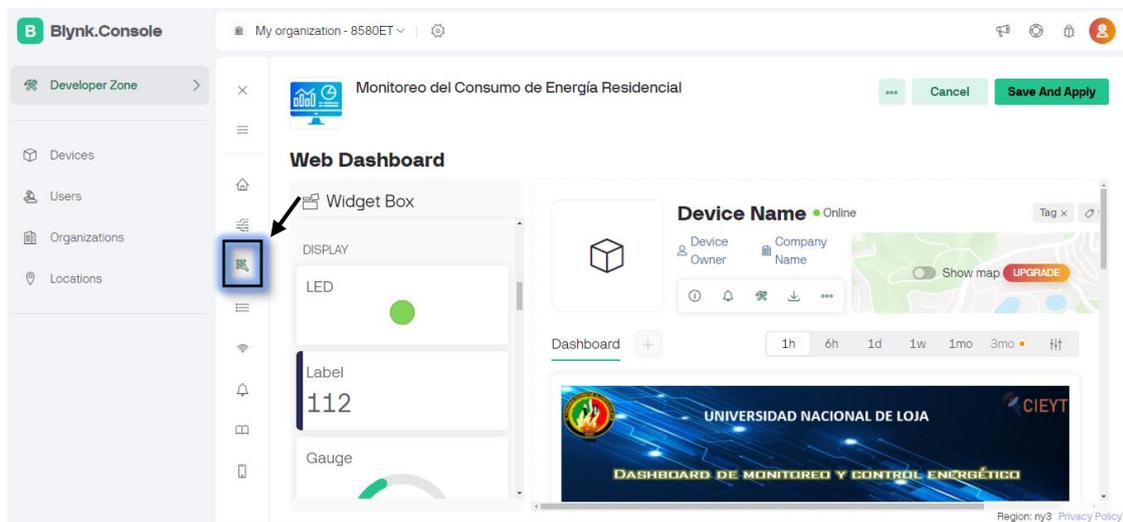


Figura 36 Sección de edición del web dashboard

Finalmente se agregó el dispositivo Arduino UNO al cual se va a acceder desde la plataforma y se podrá interactuar con ayuda del dashboard diseñado. Hay que considerar que cada dispositivo posee un identificador único denominado Auth Token esta especie de firma se utiliza para inicializar la conexión del dispositivo en concreto con los servicios

Blynk. En la Figura 37 se puede observar que el nombre del dispositivo puede ser asignado para hacer referencia a todo el sistema de monitoreo y control.

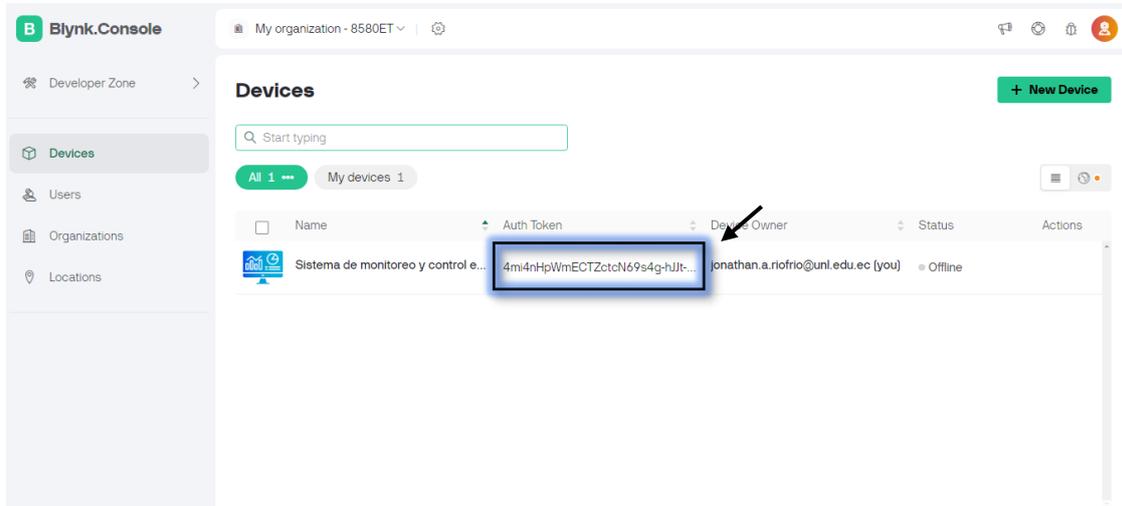


Figura 37 Sección de dispositivos agregados a la cuenta de usuario

El diseño final del dashboard se presenta de la siguiente manera:

En la parte superior del dashboard que se muestra en la Figura 38 tenemos la sección de voltaje y frecuencia de la red eléctrica residencial, y un indicador del estado del ventilador del sistema.



Figura 38 Sección de voltaje y frecuencia del Web Dashboard

Desplazándonos hacia abajo se encuentra la sección de monitoreo de la intensidad de corriente por circuito a través de widgets de etiqueta (widgets Label).



Figura 39 Sección de intensidad de corriente del Web Dashboard

Le sigue una sección en donde se puede visualizar la potencia aparente en VA, la energía acumulada que se ha estado midiendo desde que se inicializó el sistema y se puede controlar los circuitos a través de los widgets switch disponibles. Cabe recalcar que al apagar un circuito en específico se desconectarán todas las cargas pertenecientes al mismo. La figura 40 muestra la distribución de los widgets.

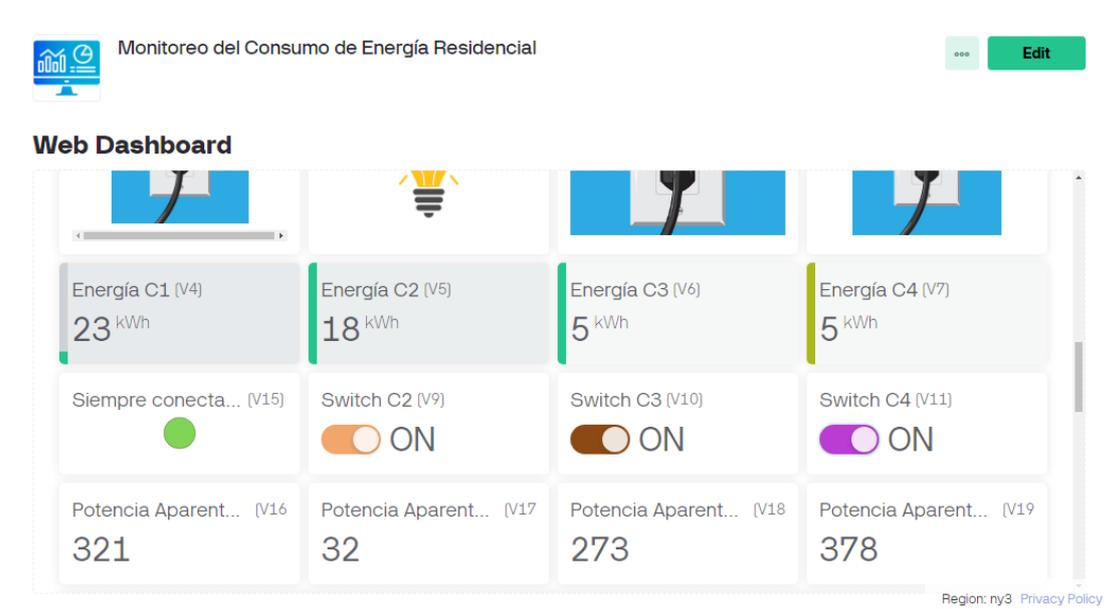


Figura 40 Sección de energía, potencia aparente y panel de switches

Finalmente, tenemos una sección de historial de consumo de corriente (Amperios) Figura 41, potencia aparente (VA) Figura 42 y energía activa (KWh) Figura 43. En donde

podemos observar los patrones de cambio que han surgido en el consumo eléctrico con tan solo pasar el ratón sobre el periodo de tiempo, en otras palabras, permite observar los picos de consumo en función del tiempo transcurrido.

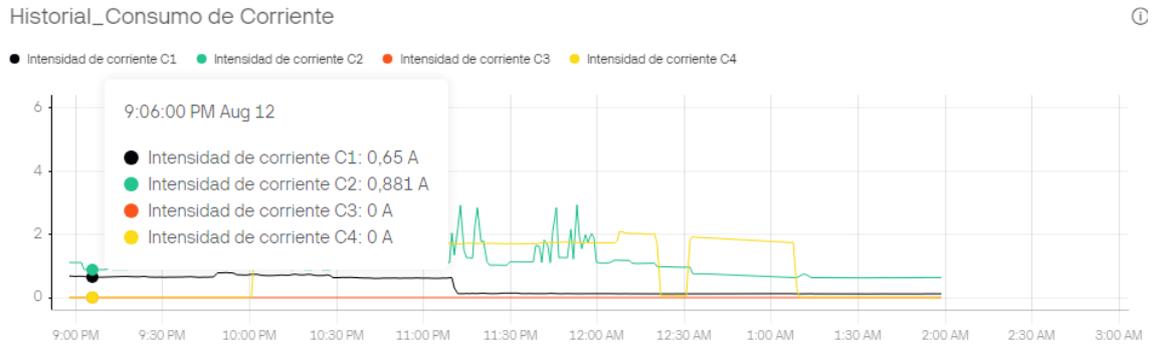


Figura 41 Historial del consumo de corriente

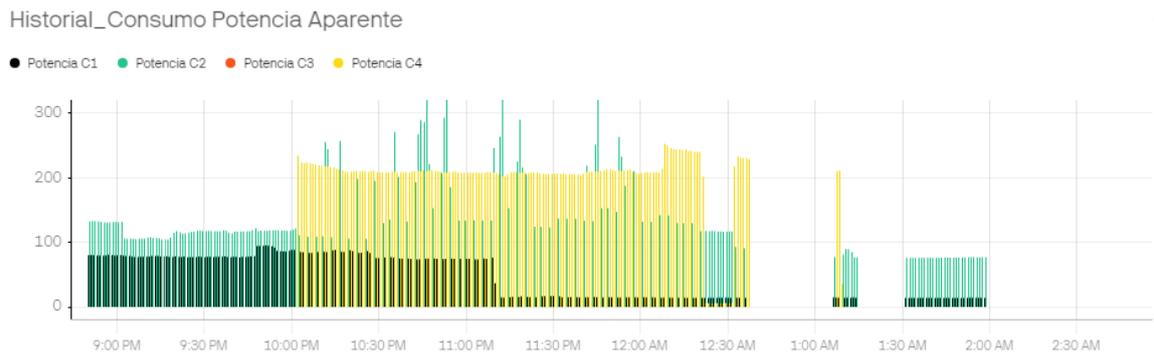


Figura 42 Historial de consumo de potencia aparente

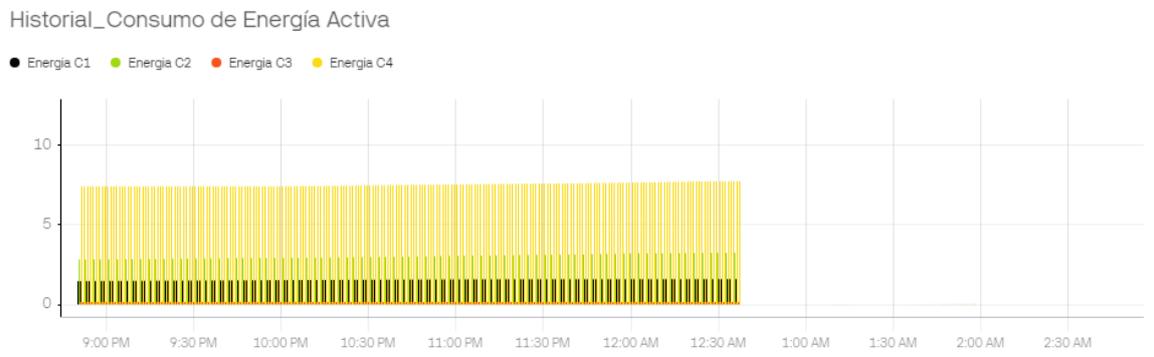


Figura 43 Historial de consumo de energía activa

6.2.1 Construcción e instalación del tablero de anclaje a la red eléctrica

6.2.1.1 Materiales

Los materiales que se utilizaron para la construcción del tablero de anclaje se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 Materiales para la construcción y ensamblaje del tablero de anclaje a la red eléctrica

Material	Cantidad	Medidas y números	Principal Utilidad
Caja de paso metálica con tapa.	1	30x30 cm	Soporte para ensamblar el hardware y organizar el cableado de AC.
Ventilador D80SM-12	1	80x80x25mm	Sistema de ventilación
Lámina de cartón compacto (duro o rígido).	1	26x26 cm	Aísla las conexiones y los elementos de hardware del tablero metálico (fondo).
Taladro	1	s/n	Realizar los agujeros para ensamblar los componentes
Brocas	2	4mm ² y 10mm ²	Realizar los agujeros para ensamblar los componentes.
Barra de neutros	1	6 polos	Empalmar o conectar los cables de neutro.
Toma corrientes	2	Tomas dobles(x2)	Tomas de alimentación.
Bornera 12 polos 20A	1	Calibre 14-12	Empalmar los cables de fase.
Pernos y tornillos	20 y 4	3mm ² y 8mm ²	Ensamblar e instalar.

6.2.1.2 Procedimiento

- Primero, se colocó la lámina de cartón compacto en el fondo de la caja de paso.
- Posteriormente, se realizó un hueco con el taladro en las 4 esquinas del fondo de la caja, los cuales servirán para instalar la caja en la pared, luego se agregaron el resto de agujeros que permiten ensamblar el hardware y los terminales eléctricos según como se distribuyen en el Anexo 1.
- Se ensambló en la caja:
 - Módulos PZEM-004T con ayuda de amarres plásticos.

- Los sensores, actuadores, placas de cómputo (integradas en la PCB), tomacorrientes y borneras con ayuda de los pernos con sus tuercas.
- Se realizó las conexiones conforme se muestra en el diagrama de conexiones del hardware Figura 29 y el diagrama de conexiones de la parte de CA Figura 31.
- Se colocaron los transformadores de corriente no invasivos en los cables de fase que alimentan las cargas de la red eléctrica residencial.
- Se instaló la caja en la pared utilizando tornillos.
- Se realizaron agujeros de ventilación en la tapa y se empernó el ventilador.
- Se conectó el ventilador al canal 4 del módulo relé en configuración normalmente abierto (NA).
- Se colocó la tapa y se la aseguró utilizando los tornillos incluidos en la caja metálica.

Después de haber completado el procedimiento de construcción, ensamblaje e instalación, el tablero quedó tal como se revela en la Figura 44.

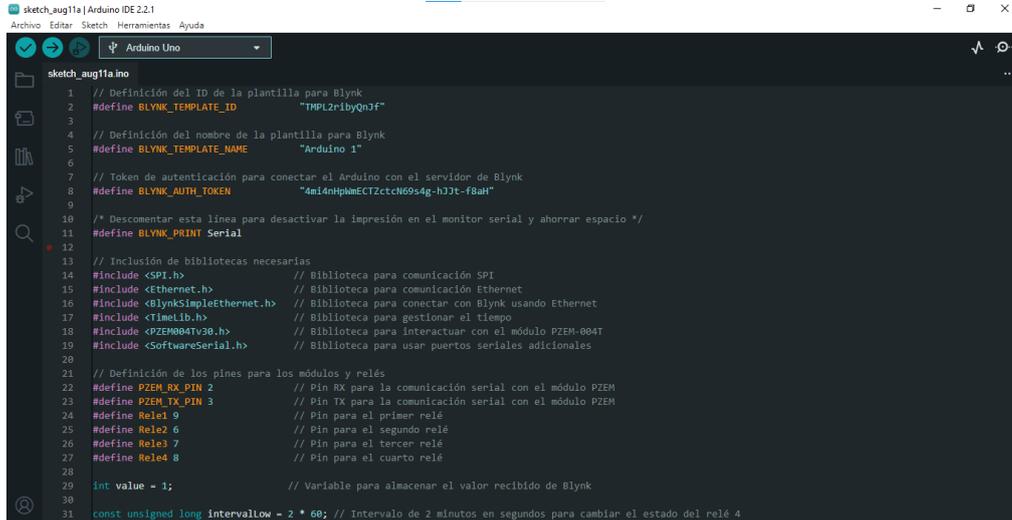


Figura 44 Tablero de anclaje a la red eléctrica construido, ensamblado e instalado

6.2.2 *Desarrollo del código de funcionamiento*

Este código es el Firmware que se cargará en la memoria de la placa Arduino UNO y dará lugar al monitoreo y control del consumo energético residencial a través de la

plataforma Blynk. Asimismo, gestiona el estado de los relés y las lecturas de los sensores. Para el desarrollo de esta sección se ha utilizado el IDE de Arduino cuya interfaz principal se muestra en la Figura 45.



```
sketch_aug11a.ino
1 // Definición del ID de la plantilla para Blynk
2 #define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL2r1byQn3f"
3
4 // Definición del nombre de la plantilla para Blynk
5 #define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Arduino 1"
6
7 // Token de autenticación para conectar el Arduino con el servidor de Blynk
8 #define BLYNK_AUTH_TOKEN "Am14nHpwMECTZctcN69s4g-h3Jt-f8aH"
9
10 // Descomentar esta línea para desactivar la impresión en el monitor serial y ahorrar espacio */
11 #define BLYNK_PRINT Serial
12
13 // Inclusión de bibliotecas necesarias
14 #include <SPI.h> // Biblioteca para comunicación SPI
15 #include <Ethernet.h> // Biblioteca para comunicación Ethernet
16 #include <BlynkSimpleEthernet.h> // Biblioteca para conectar con Blynk usando Ethernet
17 #include <TimeLib.h> // Biblioteca para gestionar el tiempo
18 #include <PZEM004TV38.h> // Biblioteca para interactuar con el módulo PZEM-004T
19 #include <SoftwareSerial.h> // Biblioteca para usar puertos seriales adicionales
20
21 // Definición de los pines para los módulos y relés
22 #define PZEM_RX_PIN 2 // Pin RX para la comunicación serial con el módulo PZEM
23 #define PZEM_TX_PIN 3 // Pin TX para la comunicación serial con el módulo PZEM
24 #define Relé1 9 // Pin para el primer relé
25 #define Relé2 6 // Pin para el segundo relé
26 #define Relé3 7 // Pin para el tercer relé
27 #define Relé4 8 // Pin para el cuarto relé
28
29 int value = 1; // Variable para almacenar el valor recibido de Blynk
30
31 const unsigned long intervallow = 2 * 60; // Intervalo de 2 minutos en segundos para cambiar el estado del relé 4
```

Figura 45 Entorno de desarrollo integrado Arduino

En el Anexo 4 se expone el código completo y comentado con la finalidad de facilitar el entendimiento. A continuación, se muestra una explicación general:

Primero, se definió los identificadores y el token de Blynk, se incluyen bibliotecas necesarias para Ethernet, Blynk, gestión del tiempo y comunicación serial con los módulos PZEM-004T.

Segundo, se configuró los pines para los módulos PZEM y los relés, y se definen variables para manejar el tiempo y el estado del sistema.

Tercero, Se definen las funciones BLYNK_WRITE(V9), BLYNK_WRITE(V10), y BLYNK_WRITE(V11) para manejar las actualizaciones de los pines virtuales en la plataforma Blynk y controlar los relés.

Cuarto, La función myTimerEvent se ejecuta cada 10 segundos, lee datos de los módulos PZEM-004T, calcula valores de potencia y actualiza el estado de un relé (para el ventilador) basado en intervalos y duraciones predefinidas. Los datos se envían a la plataforma Blynk.

En setup(), se configura la comunicación serial, se establece la hora, se inicializan los pines de los relés, se restablece la energía de los módulos PZEM, y se configura la conexión Ethernet y Blynk. Se configura un temporizador para llamar a myTimerEvent cada 10 segundos.

En loop(), se manejan las funciones de Blynk y el temporizador. Es importante evitar usar la función delay() para no bloquear la ejecución del código.

6.2.3 Pruebas de funcionamiento del monitoreo de circuitos

Los valores que determinan el consumo energético son principalmente aquellos que varían según se vayan utilizando o conectando cargas a la red eléctrica residencial, en este caso al ser un circuito derivado (se extiende desde los últimos termo magnéticos hasta las cargas que alimenta), el valor de intensidad de corriente fluctúa entre todas las cargas y entre circuitos independientes.

Para realizar las pruebas de funcionamiento se seleccionan 5 dispositivos de uso común en el hogar y se han comparado los valores de corriente que llegan a los widgets de etiqueta del dashboard con un valor de corriente de referencia obtenido utilizando un multímetro profesional de la marca Klein Tools CL110.

Las mediciones se muestran en las siguientes figuras: una refrigeradora (Circuito 4, C4) Figura 46 y 47, una licuadora (Circuito 3, C3) Figura 48 y 49, cuatro focos (Circuito 2, C2) Figura 50 y 51, y 2 dispositivos para el acceso a internet (Circuito 1, C1) Figura 52 y 53.



Figura 47 Valor del multímetro en prueba 1 C3

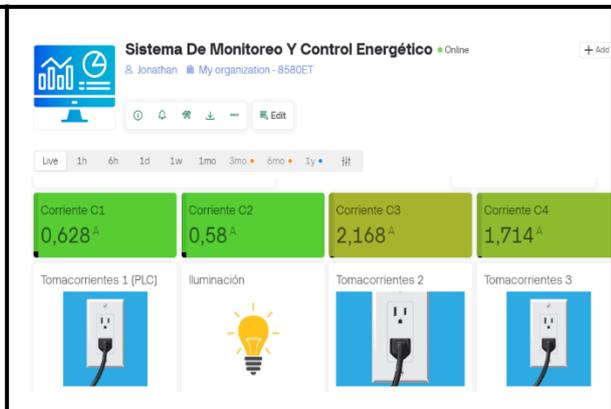


Figura 46 Valor del widget de etiqueta en prueba 1 C3



Figura 49 Valor del multímetro en prueba 2 C4

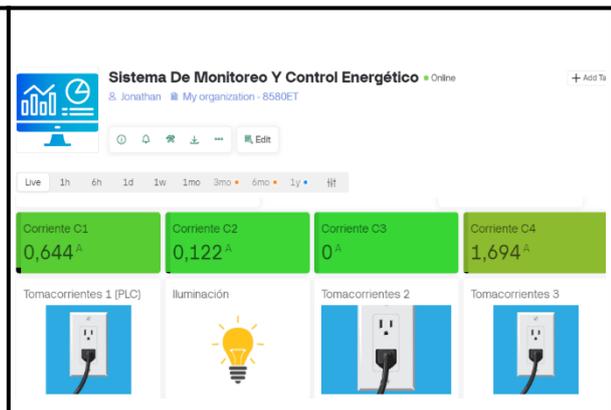


Figura 48 Valor del widget de etiqueta en prueba 2 C4



Figura 51 Valor del multímetro en prueba 3 C2



Figura 50 Valor del widget de etiqueta en prueba 3 C2



Figura 53 Valor del multímetro en prueba 4 C1



Figura 52 Valor del widget de etiqueta en prueba 4 C1

En la Tabla 14 se detallan los valores de medición obtenidos con el multímetro y los valores del sistema de monitoreo construido durante el desarrollo de este trabajo. Cabe recalcar que las pruebas se hicieron considerando condiciones normales de funcionamiento de las cargas de una residencia y que la precisión del multímetro incluye las milésimas (0.000) solo para valores inferiores a 2A, en cambio para valores superiores los decimales se adaptan a las centésimas.

En estas primeras pruebas se observó que los valores del multímetro y del sistema propuesto difieren poco de una manera no lineal, es decir, para compensar la diferencia en una escala milimétrica se tendría que considerar distintos rangos de corriente cada uno con un factor de calibración diferente, por esa razón, fue necesario realizar una

recopilación más detallada que permita determinar lo que sucede en un periodo de tiempo de media hora tomando muestras cada 5 minutos.

Tabla 14 Comparación de los valores medidos con el multímetro Klein Tools y con el sistema de monitoreo

Carga	Multímetro			Sistema de monitoreo		
	V(v)	I(A)	S(VA)	V(v)	I(A)	S(VA)
Licuadora	120.500	2.090	251.845	119.10	2.168	258.208
Refrigeradora	120.200	1.658	199.2916	118.90	1.694	201.416
Focos	121.400	1.010	122.614	119.40	1.016	121.310
Router + Adaptador PLC	120.000	0.089	10.680	118.90	0.096	11.414

Nota. Los valores V(v), I(A) y S(VA) corresponden al voltaje en voltios, la intensidad de corriente en amperios y la potencia aparente en voltios por amperio respectivamente.

En el Anexo 5, se presentan los valores correspondientes a las mediciones del multímetro y al sistema de monitoreo. El propósito es analizar hasta qué punto se pueden acercar los valores del sistema de monitoreo a los valores medidos con el multímetro utilizando un único factor de calibración. En la Tabla 15 se presentan los valores promedio de las mediciones que permitieron calcular el factor de calibración. Es importante destacar que el valor de voltaje puede ser una constante promediada, ya que los circuitos se encuentran distribuidos en paralelo, esto facilita los cálculos permitiendo así la obtención de un factor de calibración específico para los valores de corriente. Los valores de voltaje oscilan alrededor de los 120 voltios, por lo que este puede ser considerado el valor nominal de la red eléctrica residencial.

Tabla 15 Tabla de valores promedio de las muestras de corriente tomadas cada 5 minutos

Carga	Multímetro			Sistema de monitoreo			F.C
	V (v)	Im(A)	S(VA)	V(v)	Is(A)	S(VA)	Im/Is
Licuadora	120.0	2.085	250.200	120.0	2.172	260.640	0.959
Refrigeradora	120.0	1.655	198.600	120.0	1.700	203.760	0.973
Focos	120.0	1.010	121.200	120.0	1.017	122.040	0.993
Router+PLC	120.0	0.088	10.560	120.0	0.096	11.520	0.916

Nota. Las variables Im(A) e Is(A) corresponden a los valores de intensidad de corriente medida con el multímetro e intensidad de corriente medida con el sistema de monitoreo respectivamente.

La calibración se puede realizar probando cómo se comporta el sistema para cada factor de corrección ($mediciones \times F.C$). Sin embargo, por simple inspección se puede apreciar que los valores de corriente correspondientes a los focos son los que menos distan con los valores del multímetro, para ser exactos la diferencia es de 0.007. Esto quiere decir que el resto de valores se pueden corregir considerando un factor de corrección límite entre 0.993 (correspondiente a los focos) y 0.973 (valores de la refrigeradora son los siguiente en diferir menos) para evitar descompensar demasiado las variables que poseen una mayor cercanía entre valores.

Si se considerara una calibración lineal se obtendría una corrección excesiva para algunos valores, puesto que la distancia entre valores no tiene la misma proporcionalidad en todo el rango de medición del sensor.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m = \frac{2.172 - 0.096}{2.085 - 0.088}$$

$$m = 1.039$$

Este factor de escala indicaría que los valores medidos con el multímetro son menores que los valores medidos a través del sistema de monitoreo. Si se utiliza este factor el error se distribuye de una forma más uniforme a costa de incrementar el error para los valores de lectura más precisos.

$$b = y_1 - m \times x_1$$

$$b = 0.004568$$

Entonces la fórmula que se tendría que aplicar a cada lectura sería la siguiente:

$$I \text{ corregida} = \frac{\text{Lectura} - 0.004568}{1.039}$$

Esta fórmula debería ser recalculada considerando distintos rangos de corriente, lo que resultaría en al menos 3 o 4 factores de escala distintos. Sin embargo, realizar este proceso sería factible si se obtienen valores de referencia de un instrumento de medición cuya precisión sea superior a la del PZEM-004T.

En la Tabla 16 se muestran los valores respectivos aplicando un único factor de calibración de 0.983 y se detallan los errores absolutos y relativos correspondientes a los valores corregidos. Además, se puede remarcar que los valores de error relativo a una escala milimétrica son mucho más significativos.

Tabla 16 Factor de calibración aplicado a los valores medidos con el sistema de monitoreo

Im(A)	Is(A)	Fc	Ic(A) = Is × Fc	EA	ER
2.085	2.172	0.983	2.135	0.050	2.40%
1.655	1.700	0.983	1.671	0.016	0.96%
1.010	1.017	0.983	1.000	0.010	0.99%
0.088	0.096	0.983	0.094	0.006	6.8%

Nota. Las variables Fc, Ic(A), EA, ER corresponden a los valores de factor de calibración, intensidad de corriente corregida, error absoluto y error relativo.

El error relativo de los valores corregidos (valor aproximado) se ha calculado de la siguiente manera:

$$\text{Error Absoluto} = |\text{Valor Exacto} - \text{Valor Aproximado}| = EA$$

$$\text{Error relativo} = \frac{EA}{V_{\text{Exacto}}} = ER$$

A pesar de que se ha utilizado un multímetro profesional para realizar el análisis y comparación de las pruebas realizadas. Es importante considerar que el error del multímetro afectará la precisión final de la calibración. Mientras que el PZEM-004T puede tener un error de $\pm 0.5\%$, si el multímetro tiene un error del $\pm 2\%$, la calibración no será más precisa que el error del multímetro utilizado. En el Anexo 6 se detallan las especificaciones técnicas del multímetro Klein Tools CL 110 utilizado.

6.2.4 Validación del sistema de monitoreo

Una vez implementados los cambios de calibración se procedió a realizar mediciones aleatorias en un determinado instante de tiempo para compararlas simultáneamente con el valor de una pinza amperimétrica comercial de la marca ANENG, los valores se registran en la Tabla 17. Es importante destacar que este modelo proporciona valores de medición hasta las centésimas (00.00) y el error especificado en el documento técnico es de $\pm 2.5\%$. En este caso consideramos un valor promedio de 119.5V.

Tabla 17 Comparación de los valores medidos con el multímetro ANENG y con el sistema de monitoreo

N.C	Pinza ANENG			Sistema de monitoreo		
	Im(W)	Vm(v)	S(VA)	Is(W)	Vs(v)	S(VA)
1	0.12	119.5	14.34	0.12	119.5	14.34
2	0.81	119.5	96.79	0.80	119.5	95.60
3	0.08	119.5	9.56	0.08	119.5	9.56
4	1.68	119.5	200.76	1.72	119.5	205.54

Las imágenes de la ejecución de las mediciones se pueden apreciar en el Anexo 7, mientras que los valores de error obtenidos se pueden verificar en la Tabla 18.

Estos valores tienen la precisión suficiente para calcular los consumos de energía correspondientes en KWh. Sin embargo, para obtener la energía real es necesario multiplicar el valor de potencia aparente por el factor de potencia según la carga conectada a los circuitos, y por el tiempo de consumo transcurrido.

Tabla 18 Cálculo del error existente entre los valores de potencia aparente

Nº	Valor Pinza(S)	Valor Sistema(S)	EA	ER
1	14.34	14.34	0	0%
2	96.79	95.60	1.19	1.23%
3	9.56	9.56	0	0%
4	200.76	205.54	4.78	2.38%

Este factor de potencia se mide internamente en el PZEM-004T y puede ser imprimido en el monitor serial del IDE de Arduino utilizando la función `pzems[#].pf()`. La precisión de este factor de potencia según las especificaciones del módulo detalladas en el Anexo 8, es del $\pm 1\%$. Esto quiere decir que si obtenemos un factor de potencia de 0.9 la lectura real podría ser de 0.891 o 0.909.

6.2.5 Monitoreo del consumo eléctrico residencial

La potencia eléctrica se puede ver como un parámetro de consumo instantáneo de las cargas conectadas a la red eléctrica residencial. Esta potencia es directamente proporcional al voltaje y a la intensidad de corriente que circula por un circuito.

El dashboard que cumple funciones de interfaz de usuario, permite que el usuario interactúe con los datos que atraviesan por la red IoT. En este trabajo, eso implica específicamente acceder a los archivos con los datos almacenados en la nube, visualizar los datos en tiempo real y enviar instrucciones de encendido y apagado de circuitos.

En esta sección se mostrará el historial de datos que se puede observar en distintos periodos de tiempo desde que se inició el sistema.

En primer lugar, tenemos los datos en crudo que se pueden descargar como un reporte en formato .csv desde el botón del panel superior que se puede visualizar en la Figura 54.

Se puede generar un reporte de 24 horas, de 1 semana o de un mes. El tiempo de muestreo que en este caso es 10s es el mismo que se configuró al inicializar la función `timer.setInterval(10000L, myTimerEvent)` correspondiente a la sección setup del código cargado a Arduino(Firmware de dispositivo).

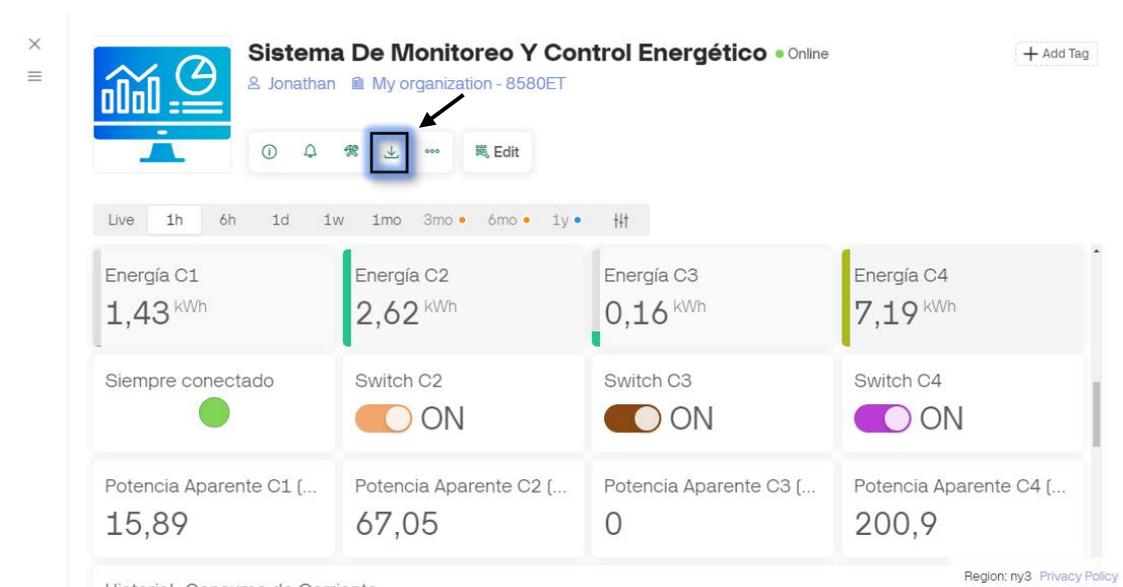


Figura 54 Botón para descargar el reporte de datos en crudo

Una vez generado el reporte, se descarga un archivo zip automáticamente con los datos. En la Figura 55 se muestra la forma en que se presenta el encabezado y las variables del conjunto de datos(dataset) que puede ser analizado y procesado desde otro software en caso de que se requiera.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
988	08/12/24 04:17:12 PM	0.116,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
989	08/12/24 04:17:02 PM	0.116,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
990	08/12/24 04:16:52 PM	0.114,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
991	08/12/24 04:16:42 PM	0.115,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
992	08/12/24 04:16:32 PM	0.114,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,120											
993	08/12/24 04:16:22 PM	0.114,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
994	08/12/24 04:16:12 PM	0.114,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
995	08/12/24 04:16:02 PM	0.116,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
996	08/12/24 04:15:52 PM	0.115,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
997	08/12/24 04:15:42 PM	0.114,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
998	08/12/24 04:15:32 PM	0.115,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
999	08/12/24 04:15:22 PM	0.114,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
1000	08/12/24 04:15:12 PM	0.115,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
1001	08/12/24 04:15:02 PM	0.115,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
1002	08/12/24 04:14:52 PM	0.114,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
1003	08/12/24 04:14:42 PM	0.118000000000000001	0,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119										
1004	08/12/24 04:14:32 PM	0.114,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
1005	08/12/24 04:14:22 PM	0.115,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
1006	08/12/24 04:14:12 PM	0.116,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,118											
1007	08/12/24 04:14:02 PM	0.116,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,118											
1008	08/12/24 04:13:52 PM	0.116,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
1009	08/12/24 04:13:42 PM	0.115,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											
1010	08/12/24 04:13:32 PM	0.114,0,0,0	1.416,2,55,0	159,7,084,119											

Figura 55 Forma de presentación de los datos en crudo

Los datos en el dashboard también se pueden visualizar a través de los widgets (gráficas y etiquetas) diseñados para una visualización rápida que facilite la toma de decisiones.

6.2.6 Resultados del monitoreo energético

En la Figura 56 se presenta la potencia aparente consumida de 7 a 9 AM de un día normal.

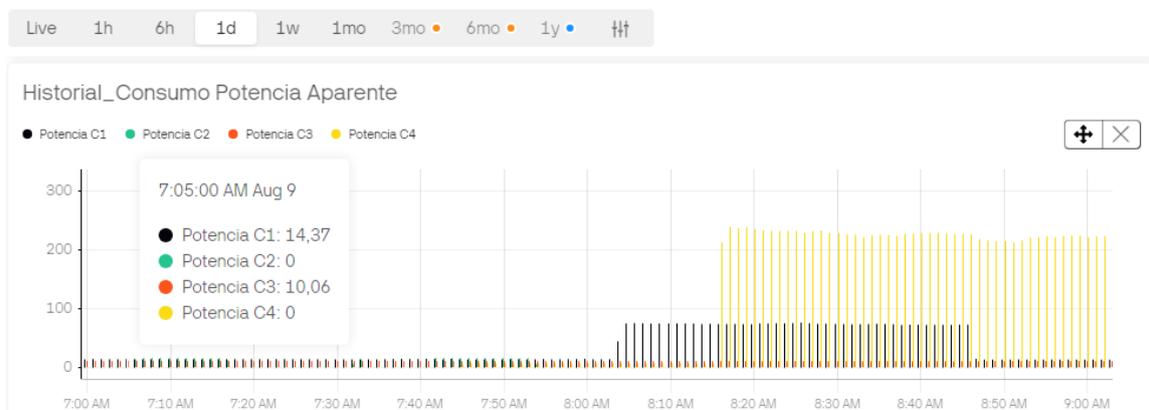


Figura 56 Potencia aparente consumida de 7AM a 9AM

El consumo C1 al principio representa una potencia inferior a los 50 VA. Sin embargo, a partir de las 8 am este valor incrementa y se puede relacionar con el encendido de la TV. Asimismo el circuito C4 que conecta la refrigeradora al principio se encuentra con un valor de 0VA correspondiente al estado de reposo del ciclo de la refrigeradora (la temperatura se mantiene), a partir de las 8:05 el valor supera los 200VA ya que el compresor empieza a funcionar nuevamente (la temperatura desciende).

En la Figura 57 se presenta el consumo de 9 a 10:40 AM, donde se puede visualizar que el consumo de la refrigeradora (C4) aumenta y disminuye cada cierto tiempo según el ciclo en el que se encuentre, las variaciones también se pueden asociar al número de productos refrigerándose y a la apertura de la puerta.



Figura 57 Potencia aparente consumida de 9AM a 10:40AM

En el intervalo de tiempo de 2 a 3:40 PM los consumos son normales y no varían demasiado la mayor parte del tiempo.

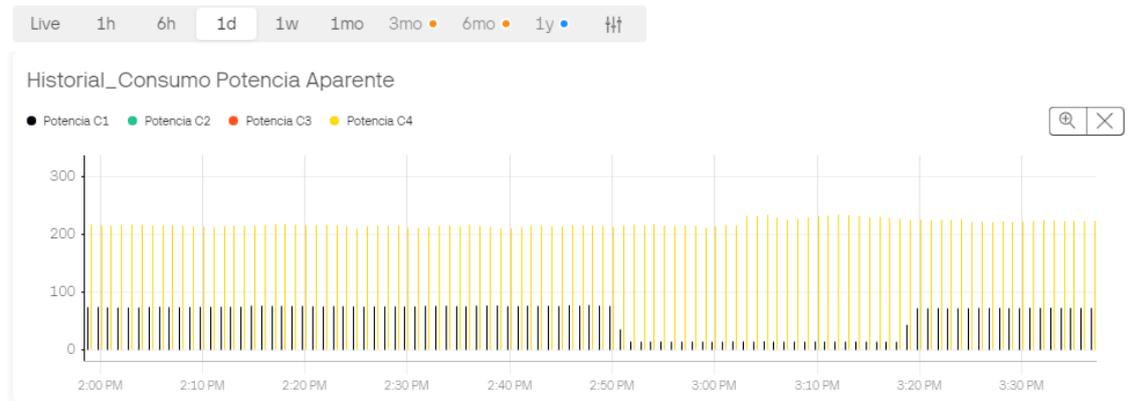


Figura 58 Potencia aparente consumida de 2PM a 3:40PM

En la Figura 59 se expone el consumo de 6:20PM a 10PM. Se puede observar que el consumo de C2 correspondiente a la iluminación ha incrementado y varían en función de cómo se vayan encendiendo y apagando los focos de la residencia que en su mayoría son leds.

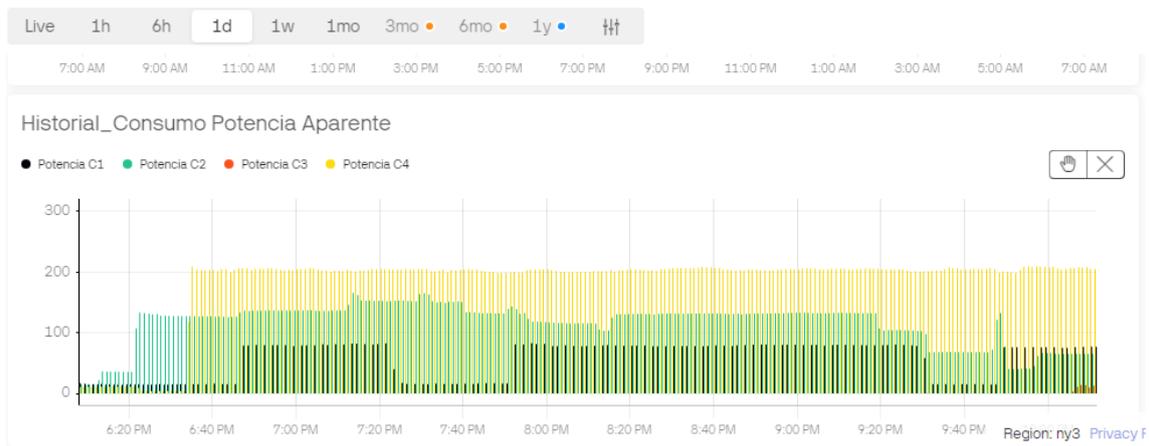


Figura 59 Potencia aparente consumida de 6:20PM a 10PM

Entre las 11PM y las 12:20PM se registraron los consumos que se visualizan en la Figura 60, de donde se puede destacar que el consumo en el C2 llega a exceder los 300W, algo que no es normal al haber muy pocos focos encendidos, este hecho coincidió con el inicio del ciclo de lavado de una lavadora, lo que permitió deducir que la lavadora de la residencia se encuentra conectada en el circuito de iluminación.



Figura 60 Potencia aparente consumida de 11AM Y 12AM

Al revisar los valores del Historial de corrientes de la Figura 61, se comprobó que efectivamente ese circuito tenía un patrón que correspondía al giro del motor. Esta práctica no es correcta ya que puede afectar la calidad de iluminación (caídas de tensión) y exceder la capacidad de protección del interruptor termo magnético.

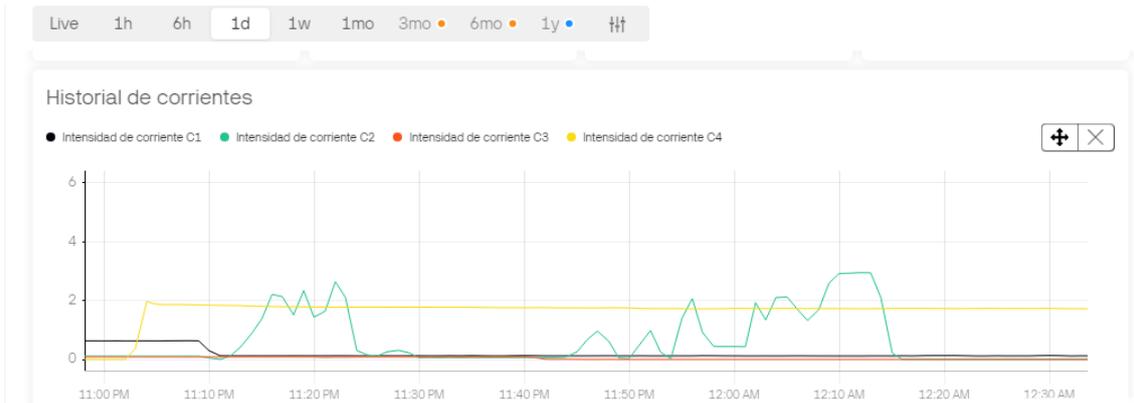


Figura 61 Consumo de intensidad de corriente del ciclo de lavado de una lavadora

La energía activa de un día es acumulativa por lo tanto los valores describen una gráfica en forma de rampa. En la Figura 62 y 63 se muestra el consumo de energía activa de 11:15 AM (11/08/2024) a 11:13(12/08/2024) AM del siguiente día.

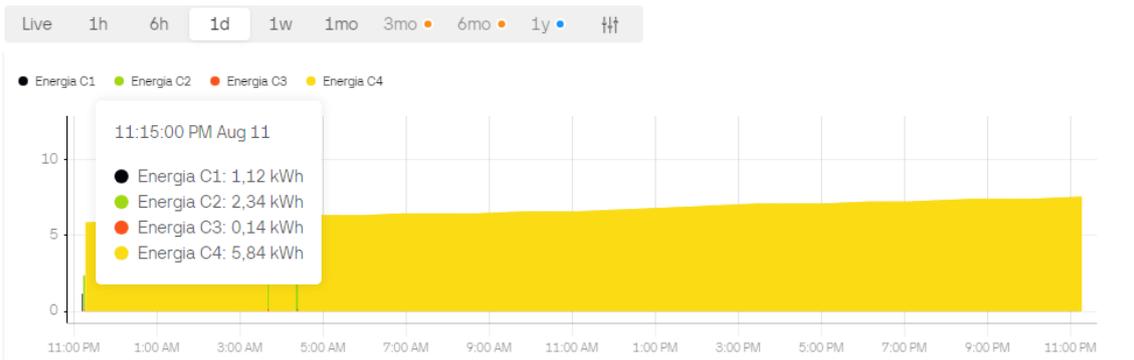


Figura 62 Etiqueta con los valores de energía activa del inicio del periodo de recorte

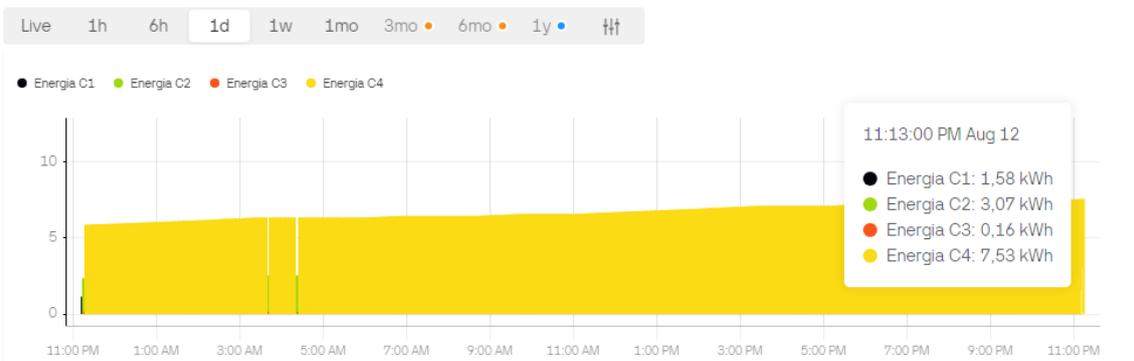


Figura 63 Etiqueta con los valores de energía activa del final del periodo de recorte

Los consumos diarios se pueden interpretar considerando el punto inicial y final del periodo de recorte. Según el tiempo que se requiera considerar se puede ir desplazando y haciendo acercamientos (Zoom) a lo largo de las gráficas para obtener un mayor detalle y distinción de los valores de cada circuito.

El consumo de un día se obtiene de las gráficas anteriores de la siguiente manera:

Energía activa diaria de C1: $1.58KWh - 1.12KWh = 0.46KWh$

Energía activa diaria de C2: $3.07 KWh - 2.34KWh = 0.73KWh$

Energía activa diaria de C3: $0.16KWh - 0.14KWh = 0.02KWh$

Energía activa diaria de C4: $7.53KWh - 5.84KWh = 1.69KWh$

De los valores anteriores se puede deducir el consumo mensual de agosto:

Energía activa mensual de C1: $0.46KWh * 30 = 13.8KWh$

Energía activa mensual de C2: $0.73KWh * 30 = 21.9KWh$

Energía activa mensual de C3: $0.02KWh * 30 = 0.6KWh$

Energía activa mensual de C4: $1.69KWh * 30 = 50.7KWh$

Consumo total mensual: $87KWh$

En el Anexo 9 se detalla la factura con el consumo energético residencial del mes de julio del 2024 (mes anterior a la realización de las pruebas y la recopilación de resultados). El valor total es de $101KWh$ cerca del valor que se estimó para agosto en esta sección, todo depende de los hábitos de consumo de las personas. Sin embargo, si se toman las medidas de ahorro energético adecuadas se puede llegar a reducir el consumo y con ello el costo del servicio eléctrico.

6.2.7 Control de circuitos eléctricos

Mediante el panel de switches del dashboard se puede conectar y desconectar los circuitos correspondientes a los tomacorrientes y a la iluminación.

En este trabajo se segmentó el control en 3 circuitos (C2, C3, C4), dos de tomas y uno de iluminación. El C1 debe estar siempre activo como se muestra en la Figura 64, ya que este es el canal a través de los cuales se envían los datos de monitoreo y las instrucciones de control.

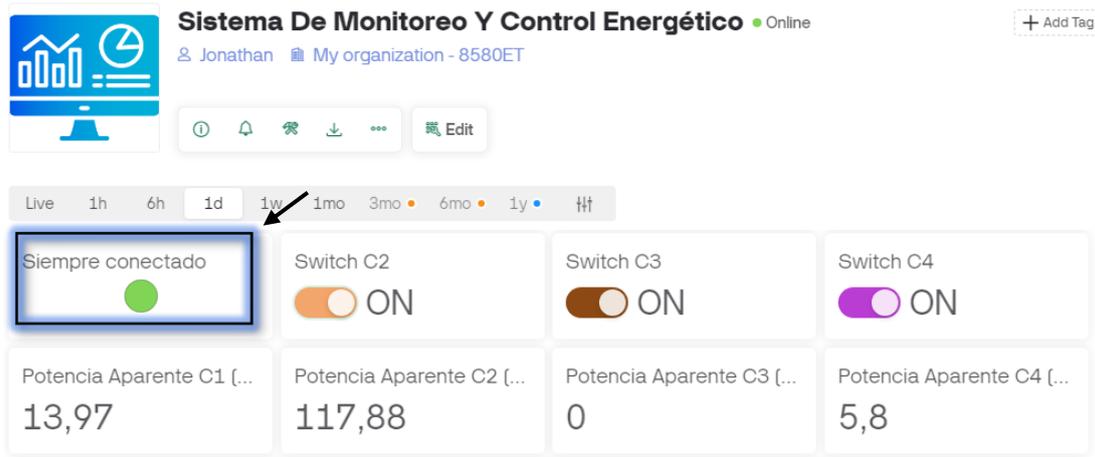


Figura 64 Panel de switches con C1 siempre conectado

Con el propósito de controlar el consumo, es posible desconectar la energía de una zona específica durante el día cuando no se utiliza, o tener circuitos separados para iluminación, tomacorrientes, y electrodomésticos que puedan ser controlados de manera independiente. Al estar conectado el sistema de control a internet es posible controlar a distancia que no exista ningún consumo fuera de lo habitual especialmente cuando el usuario no se encuentre dentro de la residencia. En caso de haber una anomalía se puede desconectar el circuito correspondiente y ahorrar energía hasta verificar que el estado de la red eléctrica se encuentre bien.

La velocidad de la respuesta ante el envío de una orden de desconexión (apagado), se puede verificar haciendo ping desde la plataforma las veces que se requiera. En la Figura 65 se evidencia esto.

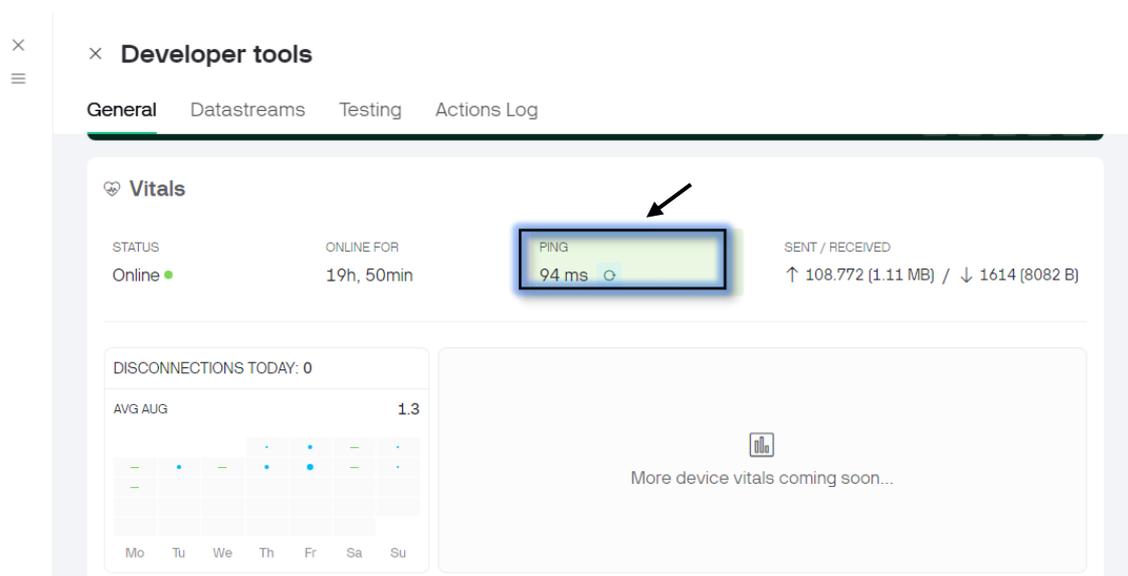


Figura 65 Ping desde la plataforma Blynk hacia el dispositivo maestro Arduino UNO

Un ping de menos de 500 ms es más que suficiente para garantizar una toma rápida de decisiones y una buena experiencia de usuario. Si la desconexión de los circuitos fuera automática y dependiera de un valor de corriente de disparo específico con la finalidad de evitar daños hacia equipos o componentes específicos conectados a la red eléctrica, el sistema sería menos tolerante al retardo.

7 Discusión

El presente trabajo trata el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control energético basado en Internet de las Cosas (IoT). La importancia de este sistema se sustenta en la necesidad de gestionar eficientemente los recursos energéticos, no solo para reducir costos, sino también para mitigar el impacto ambiental. La integración de tecnologías como Power Line Communication (PLC) y la arquitectura IoT de 4 capas ha demostrado ser una solución viable y efectiva para abordar la falta de información y control sobre el consumo energético en los hogares.

Los resultados confirmaron la hipótesis inicial de que tener acceso a datos detallados sobre el consumo energético ayuda a los usuarios a tomar decisiones informadas que favorecen la eficiencia energética. El sistema implementado no solo permite monitorear el consumo eléctrico en tiempo real, sino que también facilita la gestión activa de los circuitos a través del panel de control en línea. Todo esto cobra una importancia especial en el contexto actual de la crisis energética en Ecuador, donde optimizar el consumo eléctrico es fundamental para asegurar la sostenibilidad del sistema eléctrico del país.

El sistema que se ha diseñado, con sensores PZEM-004T para medir parámetros eléctricos y módulos relé para controlar los circuitos divididos en el tablero de distribución, ha demostrado ser muy eficaz. La implementación de la tecnología Modbus RTU sobre UART ha facilitado la gestión de varios módulos de medición al asignarles direcciones específicas, lo que asegura que los datos se recojan con precisión. Además, al usar un Ethernet Shield montado en una placa Arduino UNO y conectarlo a un adaptador PLC, se ha logrado transmitir datos a través de la red eléctrica existente. Esto evita la necesidad de instalar nueva infraestructura y reduce los costos.

Durante el desarrollo del proyecto, surgieron varios desafíos técnicos, como la correcta configuración del protocolo de comunicación Modbus RTU para manejar múltiples módulos de medición conectados a un único canal de transmisión y recepción. Otro aspecto clave fue cómo se gestionó la alimentación de los dispositivos conectados. Aunque se utilizó un puenteo directamente desde la placa Arduino para alimentar los módulos PZEM-004T y el módulo relé de 4 canales, agregar una fuente de alimentación dedicada (para los relés) podría mejorar notablemente el rendimiento y la estabilidad del sistema.

Las limitaciones en cuestión de recursos de protección eléctrica del sistema se definen por la capacidad máxima de intensidad de corriente alterna que son capaces de manejar los dispositivos.

En este caso los módulos PZEM-004T soportan una corriente de hasta 100A, un valor bastante alto en comparación al consumo máximo de un circuito en una vivienda (aprox. 25A), por lo que no habría problema a largo plazo.

En cambio, el modulo relé soporta una corriente de máximo 10A para el contacto NA y 5A para el contacto NC. En una residencia, la mayor parte del tiempo los circuitos se encuentran encendidos, por esa razón, en las conexiones de la parte eléctrica de CA los circuitos se encuentran conectados al contacto COM y NC. En la Figura 66 se observa que el pico de consumo producido al conectar una plancha al circuito C3 supera la capacidad nominal de 5A. No obstante, si el consumo independiente de cada circuito no supera los 10A, no habrá consecuencias graves, pero a largo plazo los contactos de los relés se pueden ir desgastando y el rendimiento del módulo en general puede verse afectado.

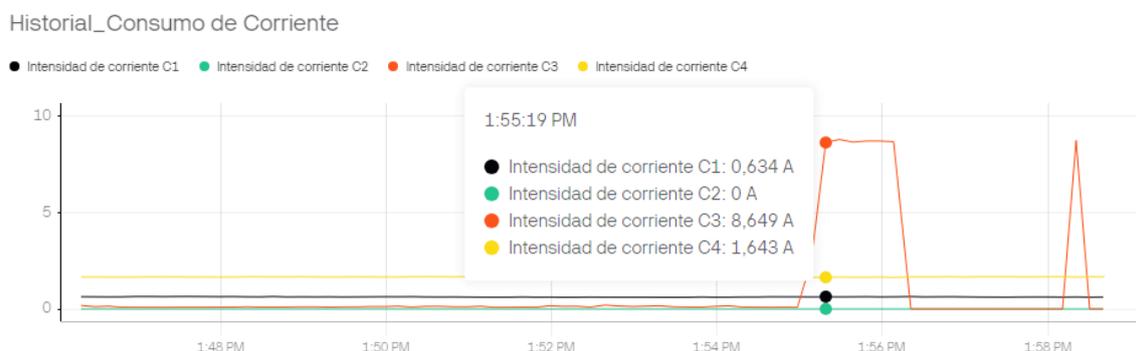


Figura 66 Pico de consumo de una plancha para ropa

Para obtener una conexión eléctrica protegida en residencias donde se estima picos de consumo por circuito de alrededor de 15A. Es necesario asegurarse de que el valor que soporten los dispositivos integrados en el tablero de anclaje a la red eléctrica sea superior al valor de disparo de los breakers o interruptores termo magnéticos. Por ejemplo, en la Tabla 6 se detallan las especificaciones de algunos módulos relés con una capacidad nominal de 30A, para este valor la corriente de disparo del breaker debería estar entre 15A y 30A. Cabe recalcar que los breakers no disparan a la intensidad nominal descrita en la carcasa si no a una mucho mayor según el tipo de curva de disparo que manejan.

El éxito en la implementación de este sistema indica que podría adaptarse fácilmente a entornos más grandes, como edificios residenciales o comerciales. La posibilidad de integrarlo con plataformas de gestión energética basadas en la nube, como Blynk, ofrece oportunidades para realizar análisis de datos más avanzados y optimizar automáticamente el consumo de energía.

Este estudio presenta ciertas limitaciones que deben considerarse. Entre ellas, se encuentra la dependencia de la estabilidad de la red eléctrica para asegurar el correcto funcionamiento del sistema, lo que podría afectar su desempeño en entornos con altas fluctuaciones o interferencias.

Por otro lado, existe un gran potencial para implementar este sistema como un producto comercial. Esto requeriría optimizar su diseño y evaluar aspectos como la durabilidad, la interfaz de usuario, la seguridad y la integración con otros dispositivos inteligentes.

En cuanto al futuro de estas tecnologías, se prevé un crecimiento significativo en la adopción de sistemas IoT para la gestión energética. Las aplicaciones basadas en IoT, como el monitoreo de energía y el control remoto de dispositivos, se integrarán cada vez más en las redes inteligentes (Smart Grids), potenciando la eficiencia energética y reduciendo costos. Asimismo, la evolución de las tecnologías de comunicación, como la computación en el borde y la niebla, permitirá un procesamiento de datos más rápido y localizado.

8 Conclusiones

- La combinación de tecnologías PLC con IoT en el hogar ha demostrado ser una solución eficaz para supervisar y controlar el consumo de energía, facilitando una gestión más eficiente. El sistema implementado no solo ofrece monitoreo en tiempo real del consumo energético, sino que también ayuda a reducir costos operativos al utilizar la infraestructura eléctrica existente en lugar de utilizar un cableado adicional para la comunicación.
- La estructura del sistema es flexible y permite futuras ampliaciones para incluir más dispositivos o servicios, lo cual es ideal para hogares más grandes o complejos. No obstante, se debe considerar la incorporación de placas de cómputo y protocolos de comunicación más robustos en función del dimensionamiento de la red.
- La seguridad del sistema propuesto se centra en la configuración de una red PLC privada con el método criptográfico AES-128 (propia del adaptador PLC utilizado), para evitar que intrusos espíen las líneas eléctricas usando adaptadores compatibles. Por otro lado, el gateway residencial (punto de acceso) ofrece seguridad inalámbrica a través del modo de configuración WPA2-PSK[AES].
- Este sistema ofrece un gran potencial para futuras integraciones de IoT y PLC en aplicaciones tanto residenciales como comerciales, abriendo la puerta a nuevas oportunidades para la automatización y la gestión inteligente de la energía.

9 Recomendaciones

- Para aplicaciones en entornos de mayor dimensión o de tipo industrial es importante que el hardware seleccionado esté diseñado para soportar posibles expansiones. Esto implica elegir dispositivos con capacidad de procesamiento adecuada, interfaces de comunicación robustas, y sistemas de alimentación que puedan manejar tanto picos de carga como operaciones continuas en condiciones normales.
- Para comunicar varios módulos PZEM-004T a través de un bus RS485, generalmente es necesario utilizar un transceptor RS485 que convierte las señales UART TTL del PZEM-004T en señales RS485. Esto permite la comunicación en red con múltiples dispositivos en un bus RS485, aprovechando una mayor robustez y capacidad para largas distancias en comparación con UART.
- Para futuros trabajos en los que se requiera tener un control seguro y garantizado sobre la red eléctrica es necesario establecer y gestionar vías de comunicación y alimentación redundantes, y que los componentes eléctricos de protección soporten el nivel de corriente y voltaje que se está manejando. Estos criterios son clave en la selección de equipos para asegurar la continuidad del servicio, incluso en situaciones adversas.
- En aplicaciones embebidas, es esencial asegurarse de que los dispositivos utilizados sean compatibles con el protocolo TLS, el cual es ampliamente soportado por plataformas de servicios en la nube. Esta compatibilidad refuerza la seguridad del sistema al garantizar una comunicación segura entre los dispositivos embebidos y los servicios en la nube, protegiendo así los datos durante la transmisión y asegurando la integridad y confidencialidad de la información.

10 Bibliografía

- A. Sendin, P. L.-S.-R.-M. (2024). *Broadband Over Power Line Communication Prototype Development for Next Generation Smart Meters: Validation in Access Electric Power Distribution Networks*. Obtenido de IEEE Access: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3367987>
- A.Eberle. (2024). *¿Qué es la compensación de potencia reactiva?* Obtenido de <https://www.a-eberle.de/es/conocimiento/rendimiento-ciego/#:~:text=En%20resumen%3A%20La%20potencia%20activa,las%20cargas%20inductivas%20y%20capacitivas>.
- Alain Richard Ndjiongue, H. C. (Julio de 2019). *ResearchGate*. Obtenido de Power Line Communications (PLC) Technology: More Than 20 Years of Intense Research: https://www.researchgate.net/publication/330485829_Power_Line_Communications_PLC_Technology_More_Than_20_Years_of_Intense_Research
- Apostolos Gerodimos, L. M. (2023). *IoT: Communication protocols and security threats*. Obtenido de Internet of Things and Cyber-Physical Systems: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2022.12.003>
- AV Electronics. (2024). *Módulo Relé 4 Canales*. Obtenido de <https://avelectronics.cc/producto/modulo-rele-4-canales/>
- AWS. (2023). *¿Qué es MQTT?* Obtenido de Amazon Web Services: <https://aws.amazon.com/es/what-is/mqtt/>
- Blynk. (2023). *Blynk Documentation*. Obtenido de Blynk Protocol: <https://docs.blynk.io/en/blynk-library-firmware-api/blynk-protocol>
- Blynk. (2024). *Blynk.Documentation*. Obtenido de Introduction: https://docs.blynk.io/en/?_gl=1*iwkon5*_ga*MjA3Njc0NzMzOC4xNzIxNzkxMTQz*_ga_J0GP1NPNB7*MTcyMjI5MzUyMy42LjEuMTcyMjI5MzY4MC4wLjAuMA..*_ga_E376ZQ635Y*MTcyMjI5MzUyMy42LjEuMTcyMjI5MzY4MC4wLjAuMA..
- CENACE. (11 de Abril de 2023). La demanda de electricidad crece 8,6%, pero la oferta va más lento. (PRIMICIAS, Entrevistador)
- CENACE. (30 de Abril de 2024). *Operador Nacional de Electricidad*. Obtenido de Información operativa : <https://www.cenace.gob.ec/informacionOperativa/InformacionOperativa.htm>

- DigiKey. (2013). *Texas Instruments*. Obtenido de Soluciones de comunicación por línea eléctrica (PLC): <https://www.digikey.kr/ko/product-highlight/t/texas-instruments/power-line-communication-plc-solution>
- Eckner Chaljub, B. T. (2022). *Repositorio Universidad de la Costa*. Obtenido de SISTEMA DE MONITOREO DE CONSUMO DE ENERGÍA (KWH) Y CONTROL: <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/9128/Sistema%20de%20monitoreo%20de%20consumo%20de%20energ%C3%ADa%20%28KWH%29%20y%20control%20remoto%20a%20trav%C3%A9s%20de%20aplicaciones%20de%20mensajer%C3%ADa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Edwin Peláez, P. J. (2018). *Diseño de un Sistema de Medición y Monitoreo del Consumo de Energía por Circuitos en el Hogar, Mediante Tecnología de Comunicación por Línea de Potencia*. Obtenido de Repositorio de la Universidad del Azuay: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/7930>
- Eyhab Al-Masri, K. R. (2020). *Investigating Messaging Protocols for the Internet of Things (IoT)*. Obtenido de IEEE Access: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993363>
- F. Ayadi, I. C. (2019). *Interoperability in Smart Grid*. Obtenido de 2019 7th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid): <https://doi.org/10.1109/icSmartGrid48354.2019.8990680>
- Guinea Mobile. (2022). *¿Qué es la arquitectura IoT?* Obtenido de <https://guinea.pe/blog/arquitectura-iot/>: <https://guinea.pe/blog/arquitectura-iot/>
- HomePlug. (2005). *HomePlug AV White Paper*. Obtenido de HomePlug Green Phy for Electric Vehicles: <https://content.codico.com/fileadmin/media/download/datasheets/powerline-communication/homeplug-av-av2/homeplug-av-whitepaper.pdf>
- HomePlug. (s.f.). *HomePlug™ AV2 Technology*. Obtenido de Raising the Bar for Sustained High-Throughput Performance: <https://content.codico.com/fileadmin/media/download/datasheets/powerline-communication/homeplug-av-av2/homeplug-av2-whitepaper.pdf>
- HQ Al-Shammari, A. L.-G. (2019). *Service Embedding in IoT Networks*. Obtenido de IEEE Access: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2962271>
- InnovatorsGuru. (2019). *PZEM-004T V3*. Obtenido de <https://innovatorsguru.com/wp-content/uploads/2019/06/PZEM-004T-V3.0-Datasheet-User-Manual.pdf>

- ITEC. (s.f). *Repositorio Institucional del Tecnológico de Monterrey* . Obtenido de Energía eléctrica: conceptos y principios básicos: https://repositorio.tec.mx/ortec/bitstream/handle/11285/631223/13_t5s2_c5_pdf_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- ITU. (2021). *Technical Paper ITU-T GSTP-OVHN* . Obtenido de Overview of ITU-T G.hn technology : https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/tut/T-TUT-HOME-2021-3-PDF-E.pdf
- ITU. (2023). *Recommendation ITU-T G.9960* . Obtenido de Unified high-speed wireline-based home networking transceivers – System architecture and physical layer specification: <https://handle.itu.int/>
- J. A. Cortés, F. J. (2023). *Channel estimation for OFDM-based indoor broadband power line communication systems*. Obtenido de Journal of Communications and Networks: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10070444>
- J. Pan, R. J. (2015). *An Internet of Things Framework for Smart Energy in Buildings: Designs, Prototype, and Experiments*. Obtenido de IEEE Internet of Things Journal: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2413397>
- Jon González Ramos, A. G. (2023). *A review on the empirical characterization of the low voltage distribution grid as a communication channel for power line communications*. Obtenido de Sustainable Energy, Grids and Networks: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101217>
- Kember Buenaventura, W. V. (2022). *dspace ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL*. Obtenido de Sistema de monitoreo de consumo de energía eléctrica en tiempo real de: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/57060/1/T-112962%20BUENAVENTURA%20-%20VILLAMAR.pdf>
- Kenta Ikeda, H. M. (2016). *idm-instrumentos.es*. Obtenido de Tecnología en Sensores de Corriente altamente estables, Alta Precisión y Banda Ancha: <https://idm-instrumentos.es/wp-content/uploads/2016/02/Tecnolog%C3%ADa-en-Sensores-de-Corriente.pdf>
- L. N. S. Varanasi, A. R. (2024). *Smart Edge Device Utilizing Power Line Communication for Energy Management and Control of Electrical Appliances*. Obtenido de IEEE Access: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3373009>

- Larry Yonge, J. A. (2013). *An Overview of the HomePlug AV2 Technology*. Obtenido de Journal of Electrical and Computer Engineering: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/892628>
- Lars Thorsten Berger, A. S. (2014). *Current Power Line Communication Systems*. Obtenido de <https://hal.science/hal-01066411/document>
- M. Bouzidi, N. G. (2022). *A Novel Architectural Framework on IoT Ecosystem, Security Aspects and Mechanisms: A Comprehensive Survey*. Obtenido de IEEE Access: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3207472>
- Md. Ohirul Qays, I. A.-S. (2023). *Key communication technologies, applications, protocols and future guides for IoT-assisted smart grid systems: A review*. Obtenido de Energy Reports: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.085>
- Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Balance Energético Nacional 2022*. Obtenido de Recursos y Energía: <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/wp-1692740456472.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). *EERSA*. Obtenido de <https://www.eerssa.gob.ec/campana-de-ahorro-reduce-los-rationamientos-de-energia-electrica-hasta-el-proximo-ano/>
- Ministerio del Ambiente. (2023). *Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/ministerio-del-ambiente-promueve-campana-dirigida-a-funcionarios-publicos-para-el-ahorro-de-energia/>
- MU Saleem, M. U. (2022). *Diseño, implementación y evaluación del rendimiento de un sistema de gestión de energía inteligente basado en IoT para la gestión del lado de la demanda en redes inteligentes*. Obtenido de IEEE Access: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3147484>
- Muhammad Umair, M. A. (2023). *Energy management of smart homes over fog-based IoT architecture*. Obtenido de Sustainable Computing: Informatics and Systems: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100898>
- MundoPosgrado. (2023). *¿Qué es el control de la Gestión Energética?* Obtenido de <https://www.mundoposgrado.com/control-de-la-gestion-energetica/>
- NovatronicEc. (2020). *Arduino UNO R3 SMD Versión CH340*. Obtenido de <https://novatronicec.com/index.php/product/arduino-uno-r3-smd-version-ch340/>
- ONU-Agua. (2019). *Informe de políticas de ONU-AGUA*. Obtenido de https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf

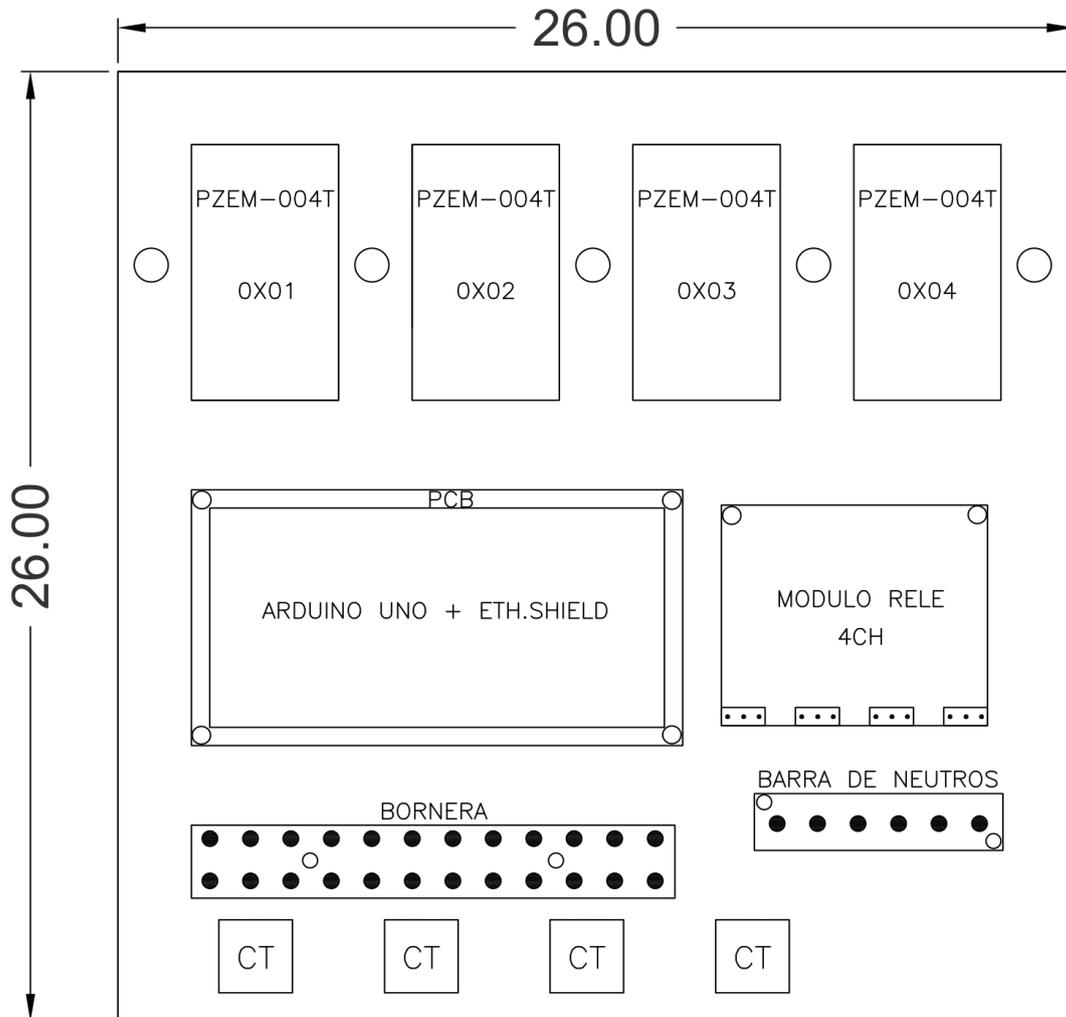
- Open Group. (s.f.). *The SOA Source Book*. Obtenido de The Open Group: https://www.opengroup.org/soa/source-book/soa_refarch/p12.htm
- PepeEnergy. (2023). *¿Qué es el consumo eléctrico?* Obtenido de <https://www.pepeenergy.com/blog/glosario/definicion-consumo-electrico/>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2020). *UNDP*. Obtenido de Retos y oportunidades para el sector energético del Ecuador en el marco de la pandemia: <https://www.undp.org/es/ecuador/blog/retos-y-oportunidades-para-el-sector-energ%C3%A9tico-del-ecuador-en-el-marco-de-la-pandemia>
- RS Bhadoria, H. Z. (2022). *Modelo de cono en el aprovisionamiento de recursos para sistemas de arquitectura orientados a servicios: una gestión de red eficaz para Internet de las cosas*. Obtenido de IEEE Access: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3181546>
- S. Narasimha Swamy, S. R. (2020). *IEEE Xplore*. Obtenido de An Empirical Study on System Level Aspects of Internet of Things (IoT): <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9218916>
- Scott Foster, D. E. (s.f). *ONU*. Obtenido de El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible: <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>
- Sergio Daniel Saade, M. d. (2018). *IoT Architecture Prototype*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/331273158_IoT_Architecture_Prototype#pf1
- Serna, V. H. (Marzo de 2011). *Redeweb*. Obtenido de Comunicaciones a través de la red eléctrica: https://www.redeweb.com/_txt/676/62.pdf
- SMAA Abir, A. A. (2021). *Red de energía inteligente habilitada para IoT: aplicaciones y desafíos*. Obtenido de IEEE Access : <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3067331>
- Smruti R. Sarangi, P. S. (2017). *Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications*. Obtenido de Journal of Electrical and Computer Engineering: <https://doi.org/10.1155/2017/9324035>
- TP-Link. (2024). *TL-PA4010 KIT*. Obtenido de Adaptador Nano Powerline AV500 Kit de Inicio: <https://www.tp-link.com/ec/home-networking/powerline/tl-pa4010-kit/#overview>

Wi-SUN Alliance. (2007). *HomePlug AV Specification Version 1.1*. Obtenido de ETSI
docbox: <https://docbox.etsi.org/Reference>

Wi-SUN Alliance. (2014). *HomePlug AV Specification Version 2.1*. Obtenido de ETSI
docbox: <https://docbox.etsi.org/Reference>

11 Anexos

Anexo 1 Distribución de los componentes del tablero de anclaje a la red eléctrica



Anexo 2 Parámetros de configuración para la red powerline privada

Se descargó e instaló la utilidad powerline(software) en un computador desde la página donde se expone el producto Nano Adaptador Powerline AV500 TL-PA4010(en la sección de soporte). Se debe conectar el computador con cada adaptador a través de un cable Ethernet.

Luego, se establece el mismo nombre de la red para ambos adaptadores. Otro adaptador compatible no podrá emparejarse si no conoce el nombre de la red powerline.

Adaptador powerline 1

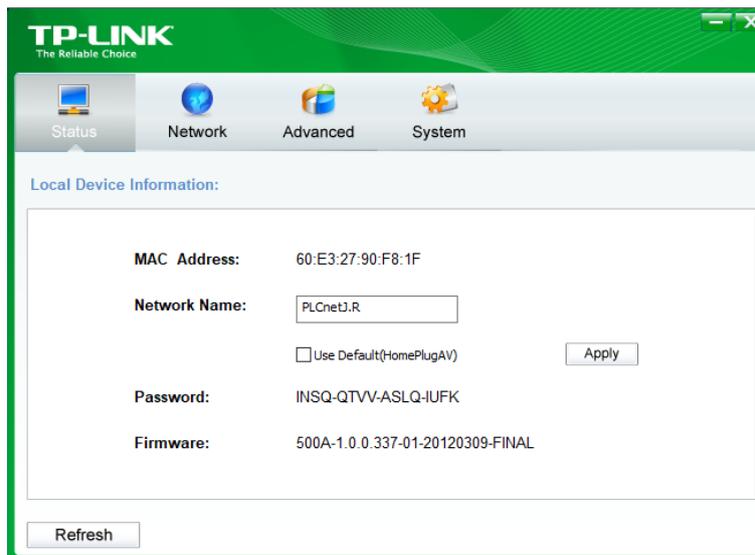


Figura 67 Establecimiento del nombre de la red-adaptador powerline 1

Adaptador powerline 2

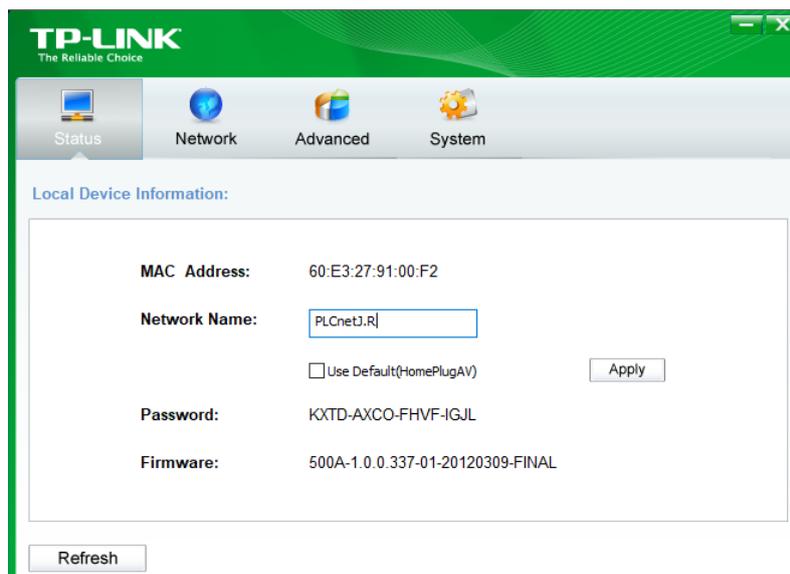


Figura 68 Establecimiento del nombre de la red-adaptador powerline 2

Anexo 4 Código de programación o firmware cargado en el dispositivo Arduino UNO

```
// Definición del ID de la plantilla para Blynk
#define BLYNK_TEMPLATE_ID          "TMPL2ribyQnJf"

// Definición del nombre de la plantilla para Blynk
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME        "Arduino 1"

// Token de autenticación para conectar el Arduino con el servidor de
// Blynk
#define BLYNK_AUTH_TOKEN           "4mi4nHpWmECTZctcN69s4g-hJJt-f8aH"

/* Descomentar esta línea para desactivar la impresión en el monitor
serial y ahorrar espacio */
#define BLYNK_PRINT Serial

// Inclusión de bibliotecas necesarias
#include <SPI.h>                    // Biblioteca para comunicación SPI
#include <BlynkSimpleEthernet.h>    // Biblioteca para conectar con Blynk
usando Ethernet

#include <TimeLib.h>                // Biblioteca para gestionar el tiempo
#include <PZEM004Tv30.h>            // Biblioteca para interactuar con el
módulo PZEM-004T
#include <SoftwareSerial.h>         // Biblioteca para usar puertos
seriales adicionales

// Definición de los pines para los módulos y relés
#define PZEM_RX_PIN 2              // Pin RX para la comunicación serial
con el módulo PZEM
#define PZEM_TX_PIN 3              // Pin TX para la comunicación serial
con el módulo PZEM
#define Rele1 9                    // Pin para el primer relé
#define Rele2 6                    // Pin para el segundo relé
#define Rele3 7                    // Pin para el tercer relé
#define Rele4 8                    // Pin para el cuarto relé

int value = 1;                     // Variable para almacenar el valor
recibido de Blynk

const unsigned long intervalLow = 2 * 60; // Intervalo de 2 minutos en
segundos para cambiar el estado del relé 4
const unsigned long durationHigh = 10 * 60; // Duración de 10 minutos en
segundos para mantener el relé 4 encendido

unsigned long previousTime = 0; // Almacena el último tiempo en el que se
realizó un cambio
```

```

unsigned long stateStartTime = 0; // Almacena el tiempo en el que comenzó
el estado actual
bool state = LOW; // Estado del relé 4, comienza en LOW
int estadoVent = 0; // Variable para almacenar el estado del ventilador

// Definición de los pines para la comunicación serial
SoftwareSerial pzemSerial(PZEM_RX_PIN, PZEM_TX_PIN);

// Direcciones únicas para cada módulo PZEM
#define NUM_PZEMS 4 // Número de módulos PZEM-004T
uint8_t pzemAddresses[NUM_PZEMS] = {0x01, 0x02, 0x03, 0x04}; //
Direcciones únicas para cada módulo PZEM

// Creación de una instancia de PZEM004Tv30 para cada módulo, con su
dirección respectiva
PZEM004Tv30 pzems[NUM_PZEMS] = {
    PZEM004Tv30(pzemSerial, pzemAddresses[0]), // Módulo con dirección
0x01
    PZEM004Tv30(pzemSerial, pzemAddresses[1]), // Módulo con dirección
0x02
    PZEM004Tv30(pzemSerial, pzemAddresses[2]), // Módulo con dirección
0x03
    PZEM004Tv30(pzemSerial, pzemAddresses[3]) // Módulo con dirección
0x04
};

// Crear un temporizador para llamar a funciones en intervalos regulares
BlynkTimer timer;

// Función que se ejecuta cuando se recibe una escritura en el pin
virtual V9 de Blynk
BLYNK_WRITE(V9)
{
    // Asignar el valor entrante del pin V9 a una variable
    value = param.asInt();

    // Controlar el primer relé en función del valor recibido
    if (value == 0) {
        digitalWrite(Rele1, LOW); // Apagar el relé si el valor es 0
    } else {
        digitalWrite(Rele1, HIGH); // Encender el relé si el valor es
diferente de 0
    }
}

// Función que se ejecuta cuando se recibe una escritura en el pin
virtual V10 de Blynk
BLYNK_WRITE(V10)
{

```

```

// Asignar el valor entrante del pin V10 a una variable
value = param.asInt();

// Controlar el segundo relé en función del valor recibido
if (value == 0) {
    digitalWrite(Rele2, LOW); // Apagar el relé si el valor es 0
} else {
    digitalWrite(Rele2, HIGH); // Encender el relé si el valor es
diferente de 0
}
}

// Función que se ejecuta cuando se recibe una escritura en el pin
virtual V11 de Blynk
BLYNK_WRITE(V11)
{
    // Asignar el valor entrante del pin V11 a una variable
    value = param.asInt();

    // Controlar el tercer relé en función del valor recibido
    if (value == 0) {
        digitalWrite(Rele3, LOW); // Apagar el relé si el valor es 0
    } else {
        digitalWrite(Rele3, HIGH); // Encender el relé si el valor es
diferente de 0
    }
}

// Función que se ejecuta en intervalos regulares
void myTimerEvent()
{
    float FC = 0.983; // Factor de corrección para la corriente

    // Leer datos del primer módulo PZEM-004T
    float voltage1 = pzems[0].voltage(); // Leer voltaje
    float current1 = pzems[0].current(); // Leer corriente
    current1 = current1 * FC; // Aplicar el factor de corrección
    float PotenciaAp1 = current1 * voltage1; // Calcular potencia
    float energy1 = pzems[0].energy(); // Leer energía
    float frequency1 = pzems[0].frequency(); // Leer frecuencia
    delay(100); // Retardo de 100 ms

    // Leer datos del segundo módulo PZEM-004T
    float current2 = pzems[1].current(); // Leer corriente
    current2 = current2 * FC; // Aplicar el factor de corrección
    float PotenciaAp2 = current2 * voltage1; // Calcular potencia
    float energy2 = pzems[1].energy(); // Leer energía
    delay(100); // Retardo de 100 ms
}

```

```

// Leer datos del tercer módulo PZEM-004T
float current3 = pzems[2].current(); // Leer corriente
current3 = current3 * FC; // Aplicar el factor de corrección
float PotenciaAp3 = current3 * voltage1; // Calcular potencia
float energy3 = pzems[2].energy(); // Leer energía
delay(100); // Retardo de 100 ms

// Leer datos del cuarto módulo PZEM-004T
float current4 = pzems[3].current(); // Leer corriente
current4 = current4 * FC; // Aplicar el factor de corrección
float PotenciaAp4 = current4 * voltage1; // Calcular potencia
float energy4 = pzems[3].energy(); // Leer energía
delay(100); // Retardo de 100 ms

unsigned long currentTime = now(); // Obtiene el tiempo actual en
segundos desde la época

if (state == LOW) {
    // Si el estado es LOW, comprueba si han pasado el intervalo de 2
    minutos
    if (currentTime - stateStartTime >= intervaLow) {
        state = HIGH; // Cambia el estado a HIGH
        digitalWrite(Rele4, HIGH); // Enciende el relé 4
        stateStartTime = currentTime; // Reinicia el tiempo de inicio
        del estado
        estadoVent = 0; // Actualiza el estado del ventilador para
        enviar a Blynk
    }
} else if (state == HIGH) {
    // Si el estado es HIGH, comprueba si han pasado 10 minutos
    if (currentTime - stateStartTime >= durationHigh) {
        state = LOW; // Cambia el estado a LOW
        digitalWrite(Rele4, LOW); // Apaga el relé 4
        stateStartTime = currentTime; // Reinicia el tiempo de inicio
        del estado
        estadoVent = 1; // Actualiza el estado del ventilador para
        enviar a Blynk
    }
}

// Enviar datos a la aplicación Blynk
Blynk.virtualWrite(V12, voltage1); // Enviar voltaje al pin virtual
V12
Blynk.virtualWrite(V14, frequency1); // Enviar frecuencia al pin
virtual V14
Blynk.virtualWrite(V0, current1); // Enviar corriente al pin virtual
V0
Blynk.virtualWrite(V4, energy1); // Enviar energía al pin virtual V4

```

```

    Blynk.virtualWrite(V16, PotenciaAp1); // Enviar potencia al pin
virtual V16

    Blynk.virtualWrite(V1, current2); // Enviar corriente al pin virtual
V1
    Blynk.virtualWrite(V5, energy2); // Enviar energía al pin virtual V5
    Blynk.virtualWrite(V17, PotenciaAp2); // Enviar potencia al pin
virtual V17

    Blynk.virtualWrite(V2, current3); // Enviar corriente al pin virtual
V2
    Blynk.virtualWrite(V6, energy3); // Enviar energía al pin virtual V6
    Blynk.virtualWrite(V18, PotenciaAp3); // Enviar potencia al pin
virtual V18

    Blynk.virtualWrite(V3, current4); // Enviar corriente al pin virtual
V3
    Blynk.virtualWrite(V7, energy4); // Enviar energía al pin virtual V7
    Blynk.virtualWrite(V19, PotenciaAp4); // Enviar potencia al pin
virtual V19
    Blynk.virtualWrite(V8, estadoVent); // Enviar estado del ventilador
al pin virtual V8
}

void setup() {
    // Inicializar la comunicación serial para depuración
    Serial.begin(9600);
    setTime(0, 0, 0, 1, 1, 2024); // Establecer la hora, minuto, segundo,
día, mes, año
    previousTime = now(); // Inicializa el tiempo actual
    stateStartTime = previousTime; // Inicializa el tiempo de inicio del
estado

    // Configurar los pines de los relés como salidas
    pinMode(Rele1, OUTPUT);
    pinMode(Rele2, OUTPUT);
    pinMode(Rele3, OUTPUT);
    pinMode(Rele4, OUTPUT);

    // Apagar todos los relés inicialmente
    digitalWrite(Rele1, HIGH);
    digitalWrite(Rele2, HIGH);
    digitalWrite(Rele3, HIGH);
    digitalWrite(Rele4, HIGH);

    // Restablecer la energía de los módulos PZEM-004T
    pzems[0].resetEnergy();
    pzems[1].resetEnergy();
    pzems[2].resetEnergy();

```

```

pzems[3].resetEnergy();

// Configuración de la red Ethernet

// Iniciar la conexión con Blynk usando el token de autenticación
Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN);
// También puedes especificar el servidor:
// Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, "blynk.cloud", 80);
// Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, IPAddress(192,168,100,1), 8080);

// Configurar una función que se llame cada 10 segundos
timer.setInterval(10000L, myTimerEvent);
}

void loop() {
  // Ejecutar la función principal de Blynk para manejar la
  comunicación
  Blynk.run();
  // Ejecutar el temporizador para llamar a funciones en intervalos
  regulares
  timer.run();

  // evitar usar la función delay() aquí.
}

```

Anexo 5 Valores medidos con el multímetro CL110 y el sistema de monitoreo

Recopilación de datos de medición con el multímetro.

Fecha	Hora	Carga conectada	Voltaje de la red (V)	Corriente (A)	Potencia S (VA)
06/08/2024	15:00	Licuadaora	120.70	2.080	251.056
06/08/2024	15:00	Refrigeradora	120.40	1.657	199.502
06/08/2024	15:00	Focos	120.60	1.008	121.564
06/08/2024	15:00	Router+PLC	120.50	0.087	10.483
06/08/2024	15:05	Licuadaora	121.10	2.090	253.099
06/08/2024	15:05	Refrigeradora	120.40	1.650	198.660
06/08/2024	15:05	Focos	120.30	1.010	121.503
06/08/2024	15:05	Router+PLC	120.50	0.088	10.604
06/08/2024	15:10	Licuadaora	120.40	2.090	251.636
06/08/2024	15:10	Refrigeradora	121.00	1.660	200.860
06/08/2024	15:10	Focos	120.90	1.011	122.229
06/08/2024	15:10	Router+PLC	120.90	0.088	10.639
06/08/2024	15:15	Licuadaora	120.80	2.080	251.264
06/08/2024	15:15	Refrigeradora	120.80	1.672	201.977
06/08/2024	15:15	Focos	120.90	1.013	122.471
06/08/2024	15:15	Router+PLC	121.00	0.087	10.527
06/08/2024	15:20	Licuadaora	121.00	2.090	252.890
06/08/2024	15:20	Refrigeradora	120.90	1.649	199.364
06/08/2024	15:20	Focos	120.90	1.011	122.229
06/08/2024	15:20	Router+PLC	121.00	0.089	10.769
06/08/2024	15:25	Licuadaora	120.40	2.090	251.636
06/08/2024	15:25	Refrigeradora	120.60	1.647	198.628
06/08/2024	15:25	Focos	120.70	1.010	121.907
06/08/2024	15:25	Router+PLC	120.70	0.089	10.742
06/08/2024	15:30	Licuadaora	120.30	2.080	250.224
06/08/2024	15:30	Refrigeradora	120.20	1.651	198.450
06/08/2024	15:30	Focos	121.50	1.009	122.593
06/08/2024	15:30	Router+PLC	121.60	0.090	10.944

Recopilación de datos de medición con el sistema de monitoreo propuesto.

Fecha	Hora	Carga conectada	Voltaje de la red (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
06/08/2024	15:00	Licuadaora	120.10	2.170	260.617
06/08/2024	15:00	Refrigeradora	120.00	1.699	203.880
06/08/2024	15:00	Focos	120.20	1.015	122.003
06/08/2024	15:00	Router+PLC	120.00	0.096	11.520
06/08/2024	15:05	Licuadaora	119.90	2.174	260.662
06/08/2024	15:05	Refrigeradora	120.20	1.696	203.859
06/08/2024	15:05	Focos	120.10	1.017	122.141
06/08/2024	15:05	Router+PLC	120.40	0.096	11.558
06/08/2024	15:10	Licuadaora	120.00	2.173	260.760
06/08/2024	15:10	Refrigeradora	120.40	1.700	204.680
06/08/2024	15:10	Focos	120.10	1.018	122.261
06/08/2024	15:10	Router+PLC	120.60	0.095	11.457
06/08/2024	15:15	Licuadaora	120.50	2.168	261.244
06/08/2024	15:15	Refrigeradora	120.20	1.710	205.542
06/08/2024	15:15	Focos	120.10	1.020	122.502
06/08/2024	15:15	Router+PLC	120.00	0.096	11.520
06/08/2024	15:20	Licuadaora	119.80	2.172	260.205
06/08/2024	15:20	Refrigeradora	120.00	1.693	203.160
06/08/2024	15:20	Focos	120.30	1.017	122.345
06/08/2024	15:20	Router+PLC	120.10	0.096	11.529
06/08/2024	15:25	Licuadaora	119.70	2.175	260.347
06/08/2024	15:25	Refrigeradora	119.80	1.690	202.462
06/08/2024	15:25	Focos	119.70	1.016	121.615
06/08/2024	15:25	Router+PLC	119.30	0.097	11.572
06/08/2024	15:30	Licuadaora	119.70	2.171	259.868
06/08/2024	15:30	Refrigeradora	120.30	1.698	204.269
06/08/2024	15:30	Focos	120.10	1.016	122.021
06/08/2024	15:30	Router+PLC	120.20	0.097	11.659

Anexo 6 Especificaciones técnicas del multímetro Klein Tools CL110

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Function	Range	Resolution	Accuracy
AC Voltage (V AC)	200.0mV	0.1mV	±(2.5% + 10 digits)
	2.000V	1mV	±(2.0% + 5 digits)
	20.00V	10mV	
	200.0V	100mV	
	600V	1V	
DC Voltage (V DC)	200.0mV	0.1mV	±(1.0% + 8 digits)
	2.000V	1mV	±(1.0% + 3 digits)
	20.00V	10mV	
	200.0V	100mV	
	600V	1V	

Input Impedance: 10M Ω

Frequency Range: 45 to 400Hz

Maximum Input: 600V AC RMS or 600V DC

AC Current (A AC)	2.000A	1mA	±(2.5% + 30 digits)
	20.00A	10mA	±(2.0% + 10 digits)
	200.0A	100mA	
	400A	1A	

Frequency Range: 50 to 60Hz

Resistance	200.0 Ω	0.1 Ω	±(1.2% + 5 digits)
	2.000K Ω	1 Ω	±(1.2% + 3 digits)
	20.00k Ω	10 Ω	
	200.0k Ω	100 Ω	
	2.000M Ω	1k Ω	
	20.00M Ω	10k Ω	±(2.0% + 5 digits)

Maximum Input: 600V AC RMS or 600V DC

OTHER MEASUREMENT APPLICATIONS

Maximum Input: 600V DC or 600V AC RMS

- **Continuity Check:** Audible signal <10 Ω , max current 1.5mA
- **Sampling Frequency:** Approx. 3 samples per second
- **Auto Power off:** After ~15 minutes of inactivity
- **Overload:** "OL" indicated on display
- **Polarity:** "-" on display indicates negative polarity
- **Display:** 3 ½ digit, 2000 Count LCD

Anexo 7 Comparación de los valores medidos con la pinza amperimétrica de la marca ANENG y el sistema de monitoreo



Figura 69 Intensidad de corriente C1 medida con la pinza amperimétrica ANENG



Figura 70 Intensidad de corriente C1 medida con el sistema de monitoreo



Figura 71 Intensidad de corriente C2 medida con la pinza amperimétrica ANENG



Figura 72 Intensidad de corriente C2 medida con el sistema de monitoreo



Figura 73 Intensidad de corriente C3 medida con la pinza amperimétrica ANENG



Figura 74 Intensidad de corriente C3 medida con el sistema de monitoreo



Figura 76 Intensidad de corriente C4 medida con la pinza amperimétrica ANENG



Figura 75 Intensidad de corriente C4 medida con el sistema de monitoreo

Anexo 8 Especificaciones técnicas del módulo PZEM-004T

1. Function description

1.1 Voltage

- 1.1.1 Measuring range: 80~260V
- 1.1.2 Resolution: 0.1V
- 1.1.3 Measurement accuracy: 0.5%

1.2 Current

- 1.2.1 Measuring range: 0~10A (PZEM-004T-10A) ; 0~100A (PZEM-004T-100A)
- 1.2.2 Starting measure current: 0.01A (PZEM-004T-10A) ; 0.02A (PZEM-004T-100A)
- 1.2.3 Resolution: 0.001A
- 1.2.4 Measurement accuracy: 0.5%

1.3 Active power

- 1.3.1 Measuring range: 0~2.3kW (PZEM-004T-10A) ; 0~23kW (PZEM-004T-100A)
- 1.3.2 Starting measure power: 0.4W
- 1.3.3 Resolution: 0.1W
- 1.3.4 Display format:
 - <1000W, it display one decimal, such as: 999.9W
 - ≥1000W, it display only integer, such as: 1000W
- 1.3.5 Measurement accuracy: 0.5%

1.4 Power factor

- 1.4.1 Measuring range: 0.00~1.00
- 1.4.2 Resolution: 0.01
- 1.4.3 Measurement accuracy: 1%

1.5 Frequency

- 1.5.1 Measuring range: 45Hz~65Hz
- 1.5.2 Resolution: 0.1Hz
- 1.5.3 Measurement accuracy: 0.5%

1.6 Active energy

- 1.6.1 Measuring range: 0~9999.99kWh
- 1.6.2 Resolution: 1Wh
- 1.6.3 Measurement accuracy: 0.5%
- 1.6.4 Display format:
 - <10kWh, the display unit is Wh(1kWh=1000Wh), such as: 9999Wh
 - ≥10kWh, the display unit is kWh, such as: 9999.99kWh
- 1.6.5 Reset energy: use software to reset.

Anexo 9 Factura del consumo de servicio eléctrico residencial - julio 2024



EMPRESA ELECTRICA REGIONAL DEL SUR S A EERSSA
 Matriz: Rocafuerte 182-26 y Olmedo
 RUC: 1190005646001
 Contribuyente especial, resolución No. 209
 OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD



K200026066338

Nro. Factura 001-003-008173225
 Nro. doc. interno 003021899625
 Fecha de emisión 06-08-2024
 Fecha de vencimiento 21-08-2024
 Número de autorización 0608202401119000564600120010030081732250194999618

Información del Consumidor

VALOR TOTAL \$8.68

CUENTA CONTRATO 200026066338 Código Único 1800653370
 Nombre Cliente IRENE ROBALINO ZOILA MARIANA
 Cédula 1102823554 Tipo de tarifa Arconel Geocódigo BTCRSD01 - BT Residencial Unidad de Lectura 1804M025
 Dirección del servicio JUAN MONTALVO 18 DE NOVIEMBRE / CATAMAYO - CATAMAYO

1. Información Servicio Eléctrico y Alumbrado Público

Número de medidor 18-210829
 Tipo consumo leído
 Fecha desde 05-07-2024 Días facturados 33
 Fecha hasta 06-08-2024

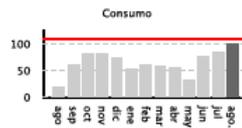
Descripción	Fecha Hasta	Lectura Actual	Lectura Anterior	Diferencia Consumo	Consumo Subtotal	Consumo Int. Transfer.	Consumo Total	Unidad Medida	Monto (\$)
Energía activa total	06-08-2024	984.00	883.00	0.00	101.00	0.00	101.00	KWH	9.30

2. Valores pendientes

VALORES PENDIENTES (2) 0.00

3. Planes de Financiamiento Autorizados por el Consumidor

PLANES DE FINANCIAMIENTO (3) 0.00



Limite Tarifa Dignidad	Servicio Eléctrico y Alumbrado Público	Valor
	Valor Consumo	9.30
	Comercialización	1.41
	Subsidio Tarifa Dignidad Comer.	0.71
	Subsidio Tarifa Dignidad Ener.	5.28
	Subtotal Servicio Eléctrico (SE)	4.74
	Servicio Alumbrado Público	1.60

Loja, 29 de enero del 2025

Lic. Samanta Mishell Cosio Irene

LICENCIADA EN PEDAGOGÍA DEL IDIOMA INGLÉS

CERTIFICO:

Que el “Abstract” del Trabajo de Integración Curricular denominado **Diseño y construcción de un sistema basado en IoT para la monitorización y el control del consumo energético residencial a través de power line communications (PLC)**, autoría de **Jonathan Andrés Riofrio Irene**, es fiel traducción del idioma español al idioma inglés de la sección “Resumen”.

Particular que comunico en honor a la verdad para los fines académicos pertinentes, facultando al portador del presente documento hacer el uso que estime conveniente.

Atentamente,



Lic. Samanta Mishell Cosio Irene

LICENCIADA EN PEDAGOGÍA DEL IDIOMA INGLÉS

C.I. 1106037938

REGISTRO SENESCYT N°: 1031-2024-2977475