

Red de Medidores Inteligentes con LoRaWAN

Juan M. López
*Departamento de Ingeniería
Electrónica y Computación - ICyTE
UNMDP*
Mar del Plata, Argentina
juanml@fi.mdp.edu.ar

Marcos Funes
*Departamento de Ingeniería
Electrónica y Computación - ICyTE
UNMDP*
Mar del Plata, Argentina
mfunes@fi.mdp.edu.ar

Esteban A. Zapirain
*Departamento de Ingeniería
Electrónica y Computación - ICyTE
UNMDP*
Mar del Plata, Argentina
estebanzapirain@fi.mdp.edu.ar

Patricio Donato
*Departamento de Ingeniería
Electrónica y Computación - ICyTE
UNMDP*
Mar del Plata, Argentina
donatopg@fi.mdp.edu.ar

Resumen— El crecimiento sostenido de la demanda eléctrica a nivel global ha generado la necesidad de una gestión más eficiente e inteligente de los sistemas de potencia. En este contexto, las Redes Eléctricas Inteligentes (REI) se presentan como un nuevo paradigma que integra tecnologías de información y comunicaciones (TICs), generación distribuida renovable, sistemas de almacenamiento y microrredes. Un componente clave de estas redes es el medidor inteligente, el cual permite realizar lecturas remotas y frecuentes del consumo y habilita la introducción de funcionalidades adicionales. En este marco, se propone el diseño e implementación de una red de medidores eléctricos inteligentes, basada en hardware de bajo costo y protocolos de comunicación estándar, capaz de calcular parámetros de consumo, con escalabilidad geográfica y transmisión de datos hacia un punto central para su visualización, almacenamiento y procesamiento en línea. Se implementó un prototipo de medidor inteligente basado en un microcontrolador ESP32, integrado a una red LoRaWAN para comunicación de largo alcance y bajo consumo. La implementación permitió verificar la medición precisa de parámetros de consumo y calidad de servicio. Se validó la transmisión bidireccional confiable de datos telemétricos y comandos hacia una plataforma central, con almacenamiento y visualización en tiempo real mediante un dashboard web, confirmando la funcionalidad del sistema de monitoreo remoto.

Keywords— *redes eléctricas inteligentes, medidor inteligente, calidad de energía, monitorización energética, LoRaWAN*

I. INTRODUCCIÓN

Desde hace más de una década se ha puesto el foco en el consumo racional y la gestión eficiente de la red eléctrica como una estrategia para afrontar la demanda creciente de electricidad a nivel global. Este es el planteo de las Redes Eléctricas Inteligentes (REI), las cuales representan un cambio de paradigma en la gestión y control de las redes eléctricas, con especial énfasis en la relación entre clientes y empresas distribuidoras o cooperativas. Las REI se pueden conceptualizar de manera simple como redes eléctricas que emplean tecnologías de información y comunicaciones (TICs), sistemas de generación distribuida basados en fuentes renovables, sistemas de almacenamiento y microrredes [1]. La integración de estas tecnologías puede modificar el funcionamiento mismo de la red eléctrica en aspectos tan variados como la implementación de estrategias de gestión de la demanda, esquemas de tarifas dinámicas o la reducción de pérdidas de transmisión y distribución, entre otras.

Para convertir una red eléctrica convencional en una REI es necesario incorporar nuevos dispositivos de sensado, procesamiento y control. Entre estos dispositivos hay uno en particular que se destaca y se asocia directamente con las REI: el medidor inteligente. Las redes eléctricas convencionales se caracterizan, en su gran mayoría, por emplear medidores de consumo eléctricos, también denominados contadores, de tipo electromecánico, que registran el consumo acumulado de energía del cliente en cuestión. Este tipo de medidores solo registran esa energía consumida acumulada en el tiempo, y su lectura se hace en forma manual, proceso denominado toma de estado, en el cual un operario revisa en forma presencial cada medidor, con frecuencias mensuales o bimensuales. Es imposible hacer un control, o al menos un seguimiento, del consumo de energía en bandas de tiempo más reducidas, del orden de días, horas o incluso minutos, y mucho menos se pueden monitorear parámetros eléctricos útiles para la gestión de la red, como puede ser el nivel de tensión, frecuencia, desfases, etc.

Los medidores inteligentes, por su parte, son dispositivos enteramente electrónicos que miden la corriente y tensión en cada fase, calculando la energía consumida en forma digital, a través de un microprocesador [2]. La medición de tensión y corriente se hace a través de un sensor, se digitaliza, y se procesa para extraer la información de interés (valores RMS, frecuencia, etc.). Además, el dispositivo cuenta con algún elemento de memoria, que le permite almacenar una cierta cantidad de datos históricos, y un sistema de comunicaciones con el cual reporta la medición a la central o a algún módulo concentrador. De esta forma, se puede hacer la lectura del consumo de energía de los clientes en forma remota por parte de la empresa distribuidora, sin necesidad de desplazar físicamente a ningún operario, con una frecuencia que incluso puede ser de fracciones de hora.

Adicionalmente, en el mismo proceso se pueden evaluar otros parámetros eléctricos además del consumo de energía en sí mismo. Estas mediciones en tiempo real pueden servir para generar políticas de tarifas y consumo, gestionar el flujo de energía y mejorar la calidad del servicio eléctrico en general. De esta forma se puede construir lo que se denomina como una Arquitectura de Medición Avanzada (AMI, del inglés Advanced Metering Infrastructure), o sea, una red que comunica en tiempo real al proveedor y los clientes del servicio eléctrico [3, 4, 5, 6].

II. MOTIVACIÓN

Una vez que se cuenta con una AMI, se generan grandes volúmenes de datos que deben ser procesados. El procesamiento sirve, en un principio, para cuestiones de facturación, que es la primera necesidad que pretende resolver la empresa distribuidora. Sin embargo, esos datos también resultan útiles para otros fines, como la detección de fallos, el mantenimiento preventivo o la identificación de casos de fraude. Desde el ámbito académico, existe un interés especial en desarrollar investigación basada en los datos obtenidos de mediciones eléctricas, especialmente por el auge de la inteligencia artificial (IA) en los últimos años. Como es bien sabido, los algoritmos de IA requieren grandes volúmenes de datos para ser entrenados, y los sistemas AMI son capaces de proveerlos. En el caso de la Universidad Nacional de Mar del Plata, esos datos se recopilan mediante equipos comerciales, tales como analizadores de red y medidores inteligentes. Sin embargo, los puntos de medición disponibles son pocos y, en todos los casos, corresponden a tableros concentradores de los diferentes edificios que componen la institución. Pero si lo que se busca es hacer un seguimiento de los consumos en puntos específicos de la red interna (laboratorios, aulas, etc.), es necesario contar con medidores inteligentes de pequeña escala, que permitan adquirir los datos de tensión y corriente y enviarlos a un concentrador. Es aquí donde surge la necesidad de desarrollar estas unidades de medición de bajo costo y fácil despliegue, que sirvan para caracterizar el consumo de grandes edificios a través de la medición en diferentes puntos de la red interna.

III. DISEÑO GENERAL

Siguiendo esta motivación, se plantea el diseño e implementación de una red de medidores eléctricos inteligentes que cumpla con los requerimientos:

- Utilizar hardware basado en microcontroladores y protocolos de comunicación estándar, de bajo costo y accesibles.
- Ser capaz de calcular e informar características de consumo a través de sus mediciones. Para ello se realiza el sensado de las variables tensión, corriente y diferencia de fase.
- La red debe ser escalable para soportar un gran número de medidores distribuidos geográficamente.
- Los datos deben concentrarse en un punto y comunicarse a través de Internet para su visualización, almacenamiento y procesamiento.

A. Arquitectura de la red

Se implementa una red LoRaWAN [7]. El sistema diseñado está compuesto por un número de nodos medidores de energía, comunicados en forma inalámbrica a un concentrador (gateway), el cual transmite los datos a un servidor de red, monitoreado por un dashboard (Fig. 1). Esta arquitectura es escalable a varios concentradores, conectados a un único servidor.

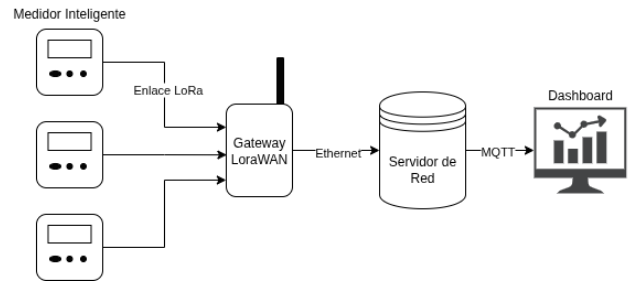


Fig. 1. Esquema general de la red

B. Dispositivo de medición de energía

El nodo medidor de energía se compone de un microcontrolador que digitaliza las señales de tensión y corriente entregada por los sensores (Fig. 2), realiza los cálculos de valores RMS y fase, y envía los datos en formato LoRa a través de un transceptor.

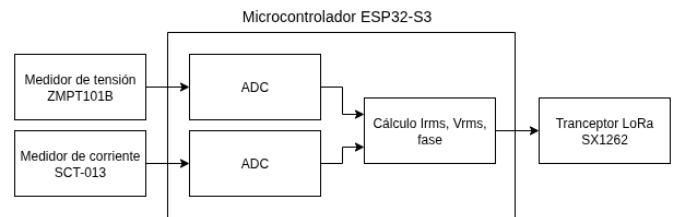


Fig. 2. Diagrama en bloques del medidor inteligente

El prototipo medidor de energía se implementó en una placa de desarrollo Heltec WiFi LoRa 32 V3 (Fig. 3). Este módulo está basado en un microcontrolador Espressif ESP32-S3FN8 y un transceptor LoRa Semtech SX1262. Además, el microcontrolador cuenta con comunicación Bluetooth y WiFi [8, 9, 10].

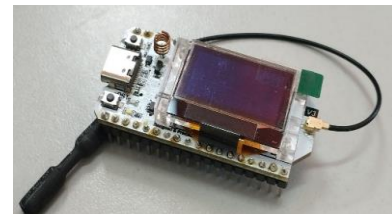


Fig. 3. Placa de desarrollo Heltec WiFi LoRa 32 V3

IV. SENSADO DE ENERGÍA

En esta sección se describe el algoritmo utilizado para la medición y procesamiento de las variables eléctricas en el nodo medidor inteligente.

A. Acondicionamiento de las señales

El sistema monitorea la tensión y la corriente de línea. El sensor de corriente es un transformador modelo SCT013 (Fig. 4). Este sensor está diseñado para operar entre 50Hz y 1kHz, y entrega en su salida (como máximo) una tensión AC de 1Vpp (sin nivel de continua) para una corriente de entrada de 10A [11].



Fig. 4. Sensor de corriente SCT013

Como sensor de voltaje se utiliza un módulo ZMPT101B (Fig. 5), que consta de un transformador y un amplificador operacional, de forma de adaptar los niveles de tensión de línea al Conversor Analógico Digital (ADC) utilizado [12]. El amplificador operacional disponible en el módulo es un LM358, sin embargo, se optó por reemplazarlo por un OPA2322 del tipo Rail-to-Rail, ya que permite una excursión de la señal de salida cercana a la tensión de alimentación, de forma de aprovechar al máximo el rango dinámico del ADC [13].



Fig. 5. Módulo sensor de tensión AC ZMPT101B

Otro parámetro de interés es la diferencia de fase entre tensión y corriente. Para medir esta diferencia, en primer lugar se caracterizaron los sensores con el objetivo de verificar si introducen una diferencia de fase significativa a su salida. En las pruebas realizadas, se detectó que el sensor de tensión avanza 30° en fase (Fig. 6), valor que se utilizará como factor de corrección al momento de realizar los cálculos. En el caso del sensor de corriente, se comparó con una punta de corriente Rigol RP1001C [14], registrándose una diferencia de fase de 6° (Fig. 7). Combinando los dos efectos, se introdujo en el cálculo un factor de corrección de fase de 24° .

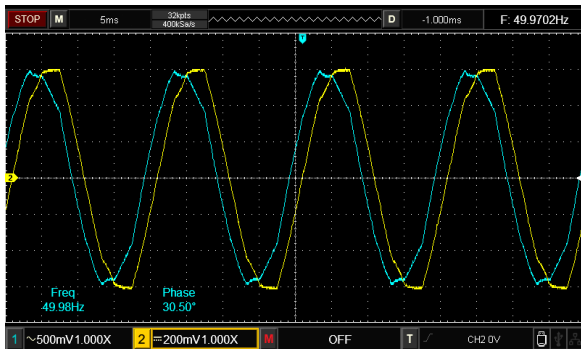


Fig. 6. Diferencia de fase introducida por el sensor de tensión (Amarillo: Punta diferencial Tektronix. Celeste: Módulo ZMPT101B).



Fig. 7. Diferencia de fase introducida por el sensor de corriente (Amarillo: Punta de corriente Rigol. Celeste: Sensor de corriente SCT013).

La medición de diferencia de fase se implementa mediante un comparador Schmitt Trigger CD40106, al cual se ingresa con las señales provenientes del sensor de voltaje y del sensor de corriente. A partir de estas se obtienen señales pulsadas, que ingresan a dos entradas digitales del microcontrolador y se utilizan para calcular el tiempo transcurrido entre ambos flancos y finalmente obtener la diferencia de fase.

Las señales de tensión y corriente son digitalizadas mediante el ADC interno del ESP32-S3. El mismo cuenta con una resolución de 12 bits, es unipolar y del tipo Aproximaciones Sucesivas. El procesador posee 2 ADC independientes, con un total de 7 canales para el ADC1 y 6 canales para el ADC2.

Debido a que el rango del ADC del microcontrolador no comprende tensiones negativas, es necesario acondicionar la señal para sumar un nivel de continua (offset) a la señal de tensión que entrega el sensor de corriente (Fig.8).

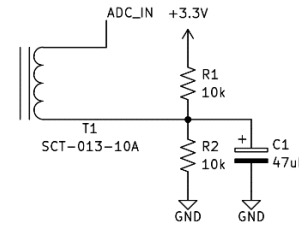


Fig. 8. Circuito de offset para el sensor de corriente

B. Algoritmo de medición

Se busca adquirir 10 ciclos enteros (de acuerdo a la Norma IEC 61000-4-30 [15]) de la señal entregada por cada sensor, de forma de disminuir los errores estadísticos al realizar el cálculo de su valor eficaz (1).

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v^2(n)} \quad (1)$$

Siendo N la cantidad de muestras adquiridas.

Debido a que el circuito de acondicionamiento agrega un nivel de continua a las señales adquiridas, es necesario sustraer el valor medio (2) a cada una para de esta forma obtener el verdadero valor eficaz (3).

$$V_{medio} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v_i \quad (2)$$

$$V_{trms} = \sqrt{(V_{rms})^2 - (V_{medio})^2} \quad (3)$$

A continuación, se detalla el algoritmo de adquisición y cálculo implementado:

- Se establece un umbral de tensión a partir del cual, una vez superado, se inicia la adquisición de los 10 ciclos enteros de la señal. Además, se implementa un método de detección de pendiente (positiva o negativa) para detectar de forma adecuada los ciclos de la señal. Dicho umbral se establece en el nivel de continua de la señal, ya que representa el cruce por cero de la señal original.
- A medida que se adquieren los datos, se realiza la suma acumulada de los puntos muestra (para calcular el valor medio) y de sus cuadrados (para calcular el valor RMS), a la vez que se lleva una cuenta de la cantidad de muestras adquirida.
- Una vez finalizada la adquisición, habiendo acumulado las sumatorias correspondientes, se implementa el cálculo del verdadero valor eficaz (4).

$$V_{trms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v_i^2 - \left[\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v_i \right]^2} \quad (4)$$

Otro parámetro calculado de la señal es su período. El método aplicado consiste en contar cuántas muestras adquiridas entran en 10 ciclos enteros. En este caso, el tiempo entre muestras está dado por el período de muestreo y la ventana de tiempo es la cantidad de ciclos enteros adquiridos. Al multiplicar el período de muestreo por la cantidad de muestras obtenemos la duración temporal de todos los ciclos adquiridos. Luego, este valor se divide por dicha cantidad de ciclos y se obtiene el período de la señal.

En principio se considera que la tensión de entrada tiene una frecuencia de 50Hz. Al actualizar la medición del periodo de la señal, se ajusta la frecuencia de muestreo para comprender 10 ciclos enteros.

También es de interés el cálculo de la diferencia de fase entre las señales de tensión y corriente. Esto se implementa midiendo la diferencia de tiempos entre los flancos de dichas señales, corrigiendo por el factor de fase introducido por el sensor de voltaje.

V. IMPLEMENTACIÓN DE LA RED LORAWAN

A. Comunicación nodo-concentrador

La comunicación entre los nodos y el concentrador se implementa a través del protocolo LoRa (Long Range), por medio del chip SX1262 integrado en el módulo Heltec WiFi LoRa 32 V3. Periódicamente el medidor envía los datos de la tensión, corriente y diferencia de fase al gateway, en formato numérico entero de 16 bits sin signo.

Se seleccionó LoRa como tecnología de comunicación, debido a sus características de bajo consumo y largo alcance con alta resistencia a interferencias. Opera en bandas de frecuencia libres (como 868 y 915 MHz), con velocidades bajas de transmisión (0.3 a 50 kbps), lo que la hace adecuada para aplicaciones de medición de consumo y calidad de

energía, en las cuales se necesita transmitir pequeñas cantidades de datos esporádicamente.

El gateway utilizado es un SenseCAP LoRaWAN Outdoor Gateway, desarrollado por Seeed Studio (Fig. 9). Integra un transceptor con 8 canales de recepción y 1 de transmisión, con potencia de salida máxima hasta 27 dBm. Cuenta con conectividad de red mediante Ethernet y 4G, lo que facilita su instalación en zonas remotas sin cobertura cableada. Tiene un alcance estimado de hasta 10 km en campo abierto y cerca de 2 km en entornos urbanos [16].



Fig. 9. SenseCAP LoRaWAN Outdoor Gateway

B. LoRaWAN: del concentrador a la nube

Un factor clave en las tecnologías orientadas a redes eléctricas inteligentes es la escalabilidad del sistema, de forma de soportar miles de usuarios conectados distribuidos en una zona geográfica amplia e irregular.

LoRaWAN es un protocolo de comunicación de capa superior diseñado para gestionar redes LoRa. Define cómo se comunican los dispositivos finales (nodos) con los gateways y cómo estos gateways envían la información a un servidor central [17].

Está optimizado para bajo consumo, larga distancia y baja tasa de datos, y permite conectar miles de dispositivos distribuidos en grandes áreas. Además, incorpora seguridad de extremo a extremo mediante cifrado AES de 128 bits.

La red LoRaWAN utiliza la topología estrella, donde los nodos no se comunican entre sí, sino sólo con los gateways.

Estas características hacen que LoRaWAN sea una tecnología idónea para implementar una red de medición de energía eléctrica. Los medidores de energía se configuran como end devices, se conectan a un gateway que esté en el alcance y los gateways se conectan a un Servidor de Red (Fig. 1).

La conexión al servidor de red se realizó mediante la interfaz ethernet, disponible en el gateway. El servidor de red utilizado fue The Things Network (TTN).

TTN es una infraestructura global y abierta que permite desplegar y usar redes LoRaWAN de forma colaborativa. Fue creada con el objetivo de brindar acceso libre y comunitario a redes de comunicación para dispositivos del Internet de las Cosas (IoT).

TTN permite a usuarios, empresas e instituciones conectar sus dispositivos LoRa a Internet sin necesidad de montar una red privada desde cero. Los gateways instalados por la comunidad se conectan a una plataforma en la nube, que gestiona el tráfico de datos de los nodos LoRaWAN y lo redirige a aplicaciones externas mediante protocolos como MQTT, HTTP o Webhooks [18].

C. Configuración en The Things Network

En TTN, una aplicación es una entidad lógica que agrupa y gestiona uno o más dispositivos (nodos LoRaWAN) que envían datos hacia Internet. Es el componente que permite conectar esos datos con servicios externos para su visualización, análisis o actuación.

La arquitectura de una aplicación en The Things Network (TTN) sigue el modelo clásico de una red LoRaWAN, con capas bien definidas que separan los dispositivos físicos del procesamiento de datos en la nube.

Una aplicación en The Things Network (TTN) se basa en una arquitectura en estrella que involucra los Nodos o Dispositivos finales (End Devices), y los Gateways.

Cada End Device debe ser registrado a la red, y se deben especificar sus parámetros de conexión.

Existen dos modos de activación: OTAA (Over-The-Air Activation) y ABP (Activation By Personalization). El modo recomendado es OTAA, en el cual el dispositivo se une a la red mediante un proceso dinámico de autenticación con identificadores únicos de dispositivo (DevEUI) y de conexión (JoinEUI).

En Fig. 10, se puede apreciar el detalle de la configuración de un End Device y sus parámetros.

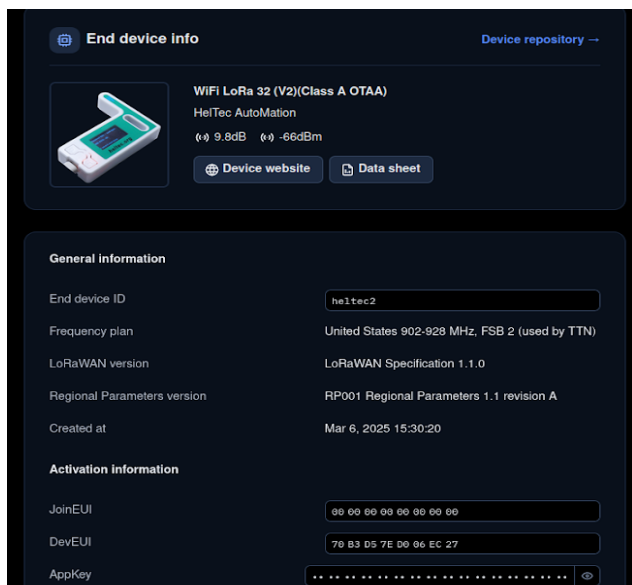


Fig. 10. Configuración del End Device en The Things Network

D. Envío de Datos a través de MQTT

En el ecosistema de Internet de las Cosas (IoT), la transmisión eficiente y confiable de datos entre dispositivos y servidores es fundamental. Una de las tecnologías más utilizadas para este propósito es el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), diseñado para comunicaciones ligeras y en tiempo real [19]. En el marco de TTN, es posible configurar la salida de datos hacia clientes externos mediante MQTT.

El procedimiento consiste en configurar TTN como broker MQTT y recibir datos de sensores LoRaWAN en una aplicación externa (cliente MQTT).

Los clientes MQTT (como aplicaciones en Python, Node-RED o dashboards IoT) se conectan al broker y se suscriben a los topics definidos para recibir los mensajes.

Cada medidor (end device) publica sus datos en un topic distinto, lo que permite su identificación. Se utilizó Node-RED para visualizar los datos provenientes de los distintos medidores.

E. Interfaz en Node-RED

Node-RED es una herramienta de desarrollo de código abierto, basada en flujo, que permite crear aplicaciones para IoT de forma visual y sencilla. Fue desarrollada por IBM y está construida sobre Node.js, lo que le permite ejecutarse en múltiples plataformas, incluyendo computadoras personales, servidores o dispositivos como Raspberry Pi. Utiliza una interfaz gráfica en la que se arrastran y conectan bloques ("nodos") para construir flujos de datos entre sensores, bases de datos, servicios web y APIs [20].

Cada medidor envía sus datos a través de un topic MQTT particular. El Node-RED actúa como cliente de estos topics. Los datos se decodifican de su formato base64, resultando en un número entero de 16 bits correspondiente a cada medición (tensión, corriente o fase).

Con estos datos se construye un dashboard para visualizar las mediciones desde una terminal web (Fig. 11).

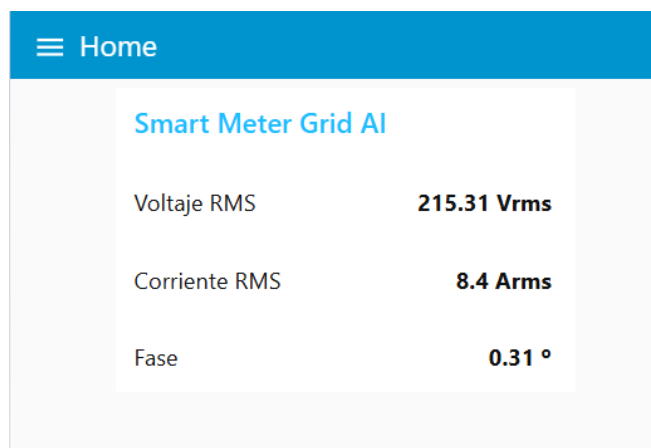


Fig. 11. Visualización web de los datos adquiridos

VI. RESULTADOS

En esta sección se comparan las mediciones obtenidas por el dispositivo con mediciones de referencia realizadas con instrumentos patrón.

Para realizar las pruebas de funcionamiento se utilizó un caloventor con dos niveles de potencia: 1200W (Fig. 12) y 2000W (Fig. 13). El mismo posee una resistencia de calefactora y un motor ventilador, que introduce una leve componente inductiva. Sin embargo, al medir la relación tensión-corriente en el osciloscopio el desfase es prácticamente nulo. Esto se debe a que potencia disipada en la resistencia es mucho mayor que la necesaria para el ventilador.

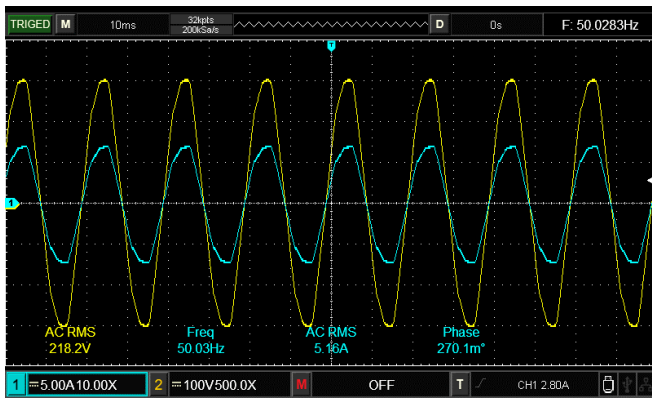


Fig. 12. Desfasaje tensión-corriente en carga de 1200W

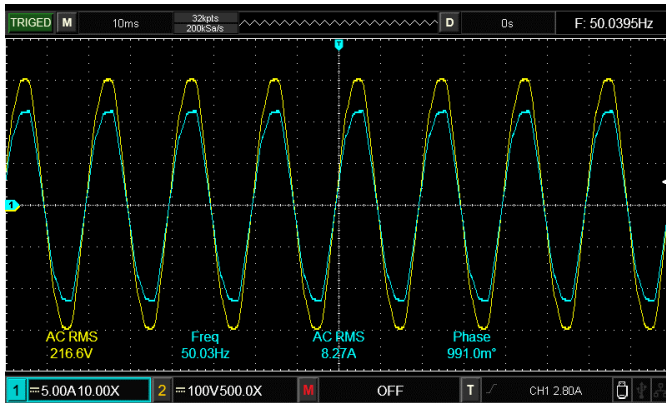


Fig. 13. Desfasaje tensión-corriente en carga de 2000W

A. Corriente RMS

TABLE I. MEDICIONES DE CORRIENTE RMS

Medición obtenida [A]	Medición de referencia [A]	Error relativo %
8.36	8.36	0
8.41	8.36	0.598
8.37	8.31	0.722
5.11	5.06	0.988
5.14	5.05	1.782

Las mediciones de corriente fueron contrastadas con las realizadas con una sonda de corriente Rigol RP1000C, obteniendo un error relativo medio de 0.818%.

B. Tensión RMS

TABLE II. MEDICIONES DE TENSIÓN RMS

Medición obtenida	Medición de referencia	Error relativo
213.0	213.2	0.079
213.4	213.8	0.168
214.5	214.3	0.084
212.2	211.9	0.141
214.5	214.5	0.009

Las mediciones de tensión fueron contrastadas con las realizadas con un multímetro True RMS Hewlett-Packard 974A [21], obteniendo un error relativo medio de 0.097%.

TABLE III. MEDICIONES DE DIFERENCIA DE FASE

Medición obtenida [°]	Medición de referencia [°]	Error absoluto [°]
0.99	0.719	0.271
0.37	1.08	0.71
0.17	0.9	0.73
0.47	0.629	0.159
0	0.72	0.72

TABLE IV. MEDICIONES DE PERÍODO

Medición obtenida [ms]	Medición de referencia [ms]	Error relativo [ms]
19.94	19.98	0.2
19.96	19.99	0.15
19.96	19.98	0.1

Las mediciones de período y fase fueron contrastadas con las realizadas con un osciloscopio Uni-T UTD2052CL+ARG [22]. Al mismo se conectaron la tensión de línea al canal A y la corriente al canal B. La tensión se conectó por medio de una sonda diferencial Tektronix P5200 [23] y la corriente por medio de la sonda Rigol mencionada en las mediciones de corriente. El error medio obtenido es de 0.518° en fase y de 0.15% para el período.

VII. CONCLUSIONES

Se implementó exitosamente un prototipo funcional de un medidor inteligente de bajo costo, integrado a una infraestructura de comunicación LoRaWAN. El sistema demostró ser capaz de medir, transmitir y visualizar los parámetros eléctricos y de calidad de energía designados.

La verificación de las mediciones mediante instrumentos de precisión confirmó la exactitud de los valores obtenidos por el prototipo, validando el diseño del hardware y el firmware de adquisición de datos.

Se concluye que la arquitectura propuesta, basada en hardware abierto y protocolos de comunicación estándar, constituye una solución técnica viable, escalable y de bajo coste para aplicaciones de teledeteción y monitorización remota en el ámbito de las redes eléctricas inteligentes.

Derivado de este desarrollo, se identifican varias líneas de trabajo futuro:

- Construir múltiples medidores para construir un sistema capaz de recibir, procesar y correlacionar datos en diferentes puntos (aulas, laboratorios, oficinas). Este sistema permitiría obtener una visión holística del consumo energético del edificio.
- Rediseñar el prototipo para reducir aún más su tamaño, costo y complejidad de instalación, facilitando su implementación extensiva en numerosos puntos de medición dentro de la infraestructura edilicia.
- Implementar y desplegar algoritmos de aprendizaje automático para aplicaciones avanzadas como detección de patrones de consumo, predicción de demanda, identificación de anomalías o diagnóstico precoz de fallos en electrodomésticos.

REFERENCIAS

- [1] B. Al-Omar, A.R. Al-Ali, R. Ahmed and T. Landolsi, Role of Information and Communication Technologies in the Smart Grid. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, vol. 3, no. 5, pp. 708-716, 2012. Available: https://www.researchgate.net/publication/266226726_Role_of_Information_and_Communication_Technologies_in_the_Smart_Grid
- [2] A. El-Rifaie, B. Neji and I. Nejdawi. Three Phase Enhanced Electrical Energy Metering System. *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 16. pp. 448-453, 2020. 10.37394/232015.2020.16.45. Available: https://www.researchgate.net/publication/341608871_Three_Phase_Enhanced_Electrical_Energy_Metering_System
- [3] "What is advanced metering infrastructure (AMI)?", IBM Think, 2023. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/think/topics/advanced-metering-infrastructure>
- [4] P. Donato, Á. Hernández, M. Funes, R. Nieto, C. Orallo, y L. de Diego, "Pronóstico de consumo de energía en ámbitos institucionales y domésticos," 28° Congreso Argentino de Control Automático, Buenos Aires, Argentina, 16-18 mayo 2023.
- [5] P. G. Donato y M. A. Funes, "Medidores y funciones de las redes eléctricas inteligentes," *Ingeniería Eléctrica*, vol. 389, pp. 1-7, Aug. 2023. ISSN: 1667-5169.
- [6] P. G. Donato y M. A. Funes, "Redes eléctricas inteligentes en contexto," *Ingeniería Eléctrica*, vol. 388, pp. 1-5, Jul. 2023. ISSN: 1667-5169.
- [7] "LoRaWAN®: The Global Standard for Secure, Carrier-Grade IoT LPWAN Connectivity", LoRa Alliance®. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org>
- [8] "Product: WiFi LoRa 32 (V3)", Heltec Automation. [Online]. Available: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32-v3/>
- [9] "ESP32-S3 Series Datasheet", Espressif Systems. [Online]. Available: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-s3>
- [10] "SX1262 860 to 930 MHz, Low Power, Long Range Transceiver Datasheet", Semtech Corporation. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1262>
- [11] "YHDC SCT-013-000 Split Core Current Transformer Datasheet", BC Robotics. [Online]. Available: <https://bc-robotics.com/datasheets/yhdc.pdf>
- [12] "ZMPT101B Voltage Transformer Module Specifications", Micro-Transformer Electronics. [Online]. Available: <https://www.micro-transformer.com/2ma-2ma-voltage-transformer-ZMPT101B.html>
- [13] "OPA2322 Dual, 20-MHz, 1.8-V to 5.5-V, Low-Noise Operational Amplifier Datasheet", Texas Instruments. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/es-mx/OPA2322>
- [14] "DG800 Series Function/Arbitrary Waveform Generator User's Guide", Rigol Technologies, 2021. [Online]. Available: https://supportint.rigol.com/Public/Uploads/uploadfile/files/20210322/20210322121114_605818e20dbf6.pdf
- [15] "Guía de aplicación: Norma IEC 61000-4-30 Clase A para medición de calidad de energía", Chauvin Arnoux. [Online]. Available: <https://www.chauvin-arnoux.es/sites/default/files/documents/wp-lanorma-clasea.pdf>
- [16] "SenseCAP LoRaWAN Outdoor Gateway User Manual", Seeed Studio. [Online]. Available: https://wiki.seeedstudio.com/Network/SenseCAP_Network/SenseCAP_LoRaWAN_Outdoor_Gateway/SenseCAP_LoRaWAN_Outdoor_Gateway_Overview/
- [17] "LoRaWAN® Technology Overview", The Things Network. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>
- [18] "The Things Network: Open LoRaWAN® Platform", The Things Network. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org>
- [19] "MQTT: The Standard for IoT Messaging", OASIS Open. [Online]. Available: <https://mqtt.org>
- [20] "Node-RED: Low-code Programming for Event-Driven Applications", OpenJS Foundation. [Online]. Available: <https://nodered.org>
- [21] "Keysight 974A High-Accuracy Handheld Multimeter Product Overview", Keysight Technologies. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/product/974A/high-accuracy-handheld-multimeter.html>
- [22] "UNI-T UTD2052CL Digital Storage Oscilloscope Product Specifications", UNI-Trend. [Online]. Available: <https://uni-trendus.com/products/utd2052cl-50mhz-2ch-dso-500msa-s-64kpts-memory-7in-screen>
- [23] "TBS1000C Series Digital Storage Oscilloscope User Manual", Tektronix. [Online]. Available: <https://download.tek.com/manual/070901806web.pdf>