



Diseño de un sistema integral LoRa-IoT para el monitoreo de consumo de energía eléctrica en un inmueble

Fernando Ríos Cortés^{1}, Víctor Hugo Pérez Concha¹, Mario Alberto García Martínez¹, Salomón Jorge Hernández Breton¹*

¹TecNM Campus Orizaba

*fernando.rc@orizaba.tecnm.mx

RESUMEN

El presente documento describe el diseño de un sistema integral basado en un conjunto de sensores para la obtención de valores de corriente y voltaje monofásico relacionados al consumo de un dispositivo, una red LoRa (Long Range) para el envío de la información obtenida y una aplicación web donde el usuario puede consultar de forma fácil y certera por medio de un dispositivo de tipo “smart”, las variaciones, gasto específico y total de energía eléctrica en un inmueble. Se destacan la capacidad de LoRa para transmitir datos a larga distancia con bajo consumo de energía, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de monitoreo de energía. Además, se discuten los beneficios de la monitorización en tiempo real y la capacidad de análisis de datos para la gestión eficiente de la energía en el inmueble. En conclusión, se presenta una solución innovadora para el monitoreo de gasto de energía eléctrica en edificios mediante la implementación de tecnologías LoRa-IoT.

Palabras claves: servidor propietario, redes LoRaWAN, datos adaptivos.

ABSTRACT

This document describes the design of a comprehensive system based on a set of sensors to obtain single-phase current and voltage values related to the consumption of a device, a LoRa (Long Range) network for sending the information obtained and an application website where the user can easily and accurately consult, through a “smart” type device, the variations, specific and total expenditure of electrical energy in a property. They highlight LoRa's ability to transmit data over long distances with low power

consumption, making it suitable for energy monitoring applications. Additionally, the benefits of real-time data monitoring and analysis capabilities for efficient property energy management are discussed. In conclusion, an innovative solution is presented for monitoring electrical energy expenditure in buildings through the implementation of LoRa-IoT technologies.

Keywords: proprietary server, LoRaWAN networks, adaptive data.

INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética y la gestión responsable de la energía eléctrica son cuestiones fundamentales en la actualidad, dada la creciente demanda de electricidad y la necesidad de reducir el impacto ambiental. En este contexto, la monitorización del consumo de energía en edificios se ha convertido en una práctica esencial para identificar oportunidades de ahorro, mejorar la sostenibilidad y reducir los costos operativos. En este artículo, presentamos el diseño de un sistema integral basado en la tecnología LoRa (Long-Range) y el Internet de las Cosas (IoT) para abordar este desafío mediante el monitoreo de gasto de energía eléctrica en un inmueble. Debemos mencionar que: “LoRa y LoRaWAN no son lo mismo. LoRa es un esquema de modulación de espectro ensanchado, siendo una capa física de implementación y es independiente de las implementaciones de capa superior. Su principal ventaja radica en la capacidad de largo alcance.” (Moya, 2018, p 6.)

Como antecedentes se tienen los trabajos realizados por Haro, V. (2019) **Implementación de un sistema de monitoreo y control automático de riego para invernaderos mediante tecnología lora con esp32**, donde se exponen la ventaja de la interfaz entre un radio Lora y un dispositivo de tipo SOC(System on Chip), Correles, B. (2021) **Diseño de un módulo de medición inteligente para la lectura del consumo de energía eléctrica mediante tecnología LORA en la fábrica de muebles Jessica**, donde se realiza el monitoreo del gasto de energía por medio de radios LoRa en las maquinarias usadas para la elaboración de muebles, Canchignia, G. (2023) **Implementación de un sistema de telemetría para el monitoreo y gestión de consumo de energía eléctrica para el prototipo shell-eco marathon de la ups sede**

Quito, Campus Sur, donde se aplica el monitoreo remoto de eficiencia energética en los motores de un vehículo por medio de radios LoRa, Bryan, B. (2021), **Sistema de monitoreo inteligente de consumo de energía eléctrica (smart metering) con tecnología lora para hogares en la ciudad de Ambato**, se plantea de igual forma el monitoreo de energía eléctrica en inmuebles, pero no se desarrolla un prototipo ni una red basada en múltiples nodos, por último se puede citar el trabajo de Flores, Richard(2018) **AHORRO ENERGÉTICO EN ALUMBRADO PÚBLICO CON EL DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE TELEGESTIÓN REMOTO PARA LÁMPARAS TIPO LED DE LA EMPRESA ELÉCTRICA EMELNORTE S.A.** donde se diseñó una red de supervisión de gasto de energía mediante radios digitales ZIGBEE, aunque el alcance del mismo fue muy reducido.

El sistema propuesto se distingue por su capacidad para recopilar datos de consumo de energía de manera eficiente y remota, permitiendo a los administradores de edificios y propietarios tener una visión precisa y en tiempo real del consumo eléctrico. La combinación de LoRa, que ofrece comunicaciones a larga distancia con un bajo consumo de energía, y la conectividad IoT, que permite la adquisición y transmisión de datos de sensores de manera automatizada, promete una solución innovadora para el monitoreo de la energía eléctrica.

En las secciones siguientes, detallaremos la arquitectura y el funcionamiento del sistema, así como los beneficios que ofrece en términos de optimización del uso de la energía y la capacidad de análisis de datos para una gestión más efectiva.

METODOLOGÍA

Para dar una idea básica que permita comprender el diseño e implantación del sistema integral que nos permitió el sensado, la transmisión de dos variables (corriente y voltaje monofásico) y la presentación de los resultados en una aplicación WEB se presenta el siguiente diagrama conceptual de este sistema (véase figura 1).

Como puede observarse el diseño está basado en tres servicios o plataformas, los cuales se describen a continuación:

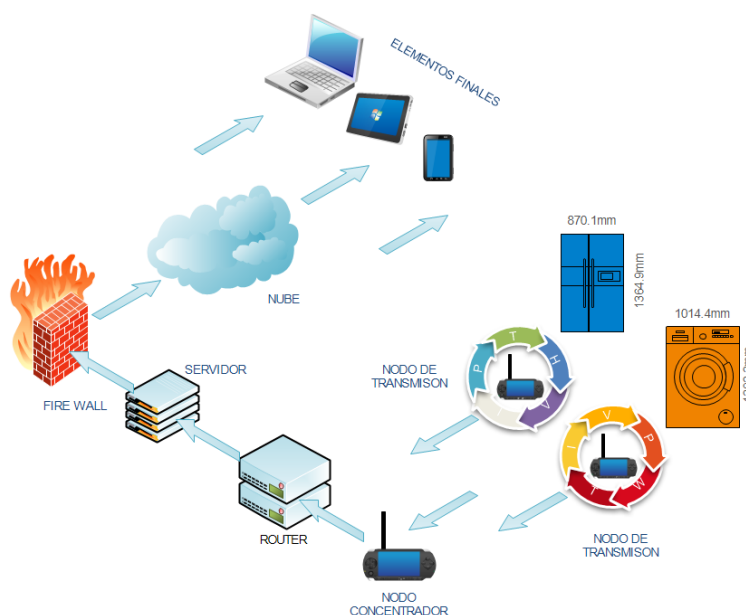


Figura 1. Diseño de la red LoRaWAN multivariable.

- Plataforma primaria o de adquisición de datos:** la cual está conformada por los sensores de corriente y voltaje en C.A. y la primera capa de la red LoRaWAN la cual está conformada por los nodos de transmisión primarios (para esta topología no existen los nodos secundarios), que son los que recolectan la información proveniente de la red de sensores y por los nodos concentradores, los cuales recaban, procesan y normalizan dicha información a cierto nivel. “Una característica importante de LoRa es la flexibilidad que le proporciona tener una Tasa de Datos Adaptativa o Adaptive Data Rate (ADR),” (Gómez, 2017, p13).
- Plataforma secundaria o GATEWAY:** conformado por los dispositivos concentradores los cuales están interconectados en la red local de WIFI, desde las terminales, pasando por los rúters, hasta los servidores los cuales conectaran a los servicios de la nube. Estos realizan la normalización de las variables (corriente y voltaje) y los transmiten al servidor propietario o dedicado los cuales son “ encargados de la recepción y procesamiento de la información que proviene de los dispositivos finales así como de la gestión y configuración de la red y los dispositivosfinales.” (Ordoñez, 2017)

- **Plataforma final o de aplicación IOT:** es el conformado por los elementos finales de tipo Smart, los cuales están conectados a una red remota asociados a una dirección IP.

Como puede observarse la topología de la res LoRaWAN es básica, esto debido a la limitante de radios digitales que se cantaba en ese momento para realizar las pruebas a nivel monofásico.

Los radios lora que se seleccionaron para la realización de las pruebas fueron los de capacidad de enlace a corto y mediano alcance a continuación se muestran algunas de sus características funcionales:

LORA32 V 1.1. y V 2.1

- Tipo de modulación FSK&&CHIRP
- Potencia de transmisión: + 20dBm.
- Frecuencia de desviación: +/- 15 Khz.
- Sensibilidad de recepción por demanda de datos en transmisión bilateral abierta:
 - Límite inferior: -139dBm @ LoRa y 62.5Khz y SF = 12 y 146bps.
 - Límite superior: -118dBm @ LoRa y 125Khz y SF = 6 y 9380bps
- Núcleo de procesamiento: SOC (System on Chip)ESP32 S2.
- Antena con ganancia promedio a 2Dbi e interfaz IPX / IPEX
- Interfaz para carga de baterías litio, corriente máxima de carga: 500 mA.

“LoRa está diseñado para manejar una velocidad de datos variables, permitiendo tolerar factores de dispersión ortogonales. Esto permite al sistema poder controlar la velocidad de datos por el rango o potencia, permitiendo buscar la configuración óptima que se adapte al rendimiento de la red en un ancho de banda constante”. (Mejía, 2021,11).

Por otro lado, los dispositivos para la obtención de corriente y voltaje monofásico a la carga son:

Allegro® ACS712ELECT-5A-T

Allegro ACS712 es un sensor de efecto Hall diseñado para medir corriente eléctrica de forma precisa y con baja resistencia de conducción. El sensor utiliza el efecto Hall para medir el campo magnético generado por la corriente que fluye a través de un conductor, este principio permite una medición precisa y sin contacto de la corriente. Proporciona una salida analógica proporcional a la corriente medida, esto facilita la interfaz con

microcontroladores y otros dispositivos electrónicos para el procesamiento de la señal. Además, el sensor presenta una baja resistencia en el flujo de corriente, minimizando la pérdida de energía y la generación de calor, también incluye características de compensación de temperatura para garantizar mediciones precisas en diversas condiciones ambientales.

El sensor Allegro® ACS712ELECT-5A-T tiene algunas características específicas que pueden ofrecer ventajas en ciertos escenarios en comparación con otros sensores de corriente, se presentan a continuación algunas de las ventajas por las que se eligió este tipo de sensor:

- **Bajo costo:** Los sensores de corriente Allegro ACS712, en general, suelen ser relativamente económicos, lo que los hace atractivos para aplicaciones donde el costo es un factor importante.
- **Protección contra picos de corriente:** Algunos modelos de la serie ACS712 incluyen funciones de protección contra sobre corriente, lo que puede aumentar la durabilidad y la fiabilidad del sensor en entornos donde las corrientes pueden variar y ser impredecibles.
- **Aislamiento galvánico opcional:** Los modelos de la serie ACS712 ofrecen opciones de aislamiento galvánico entre el camino de la corriente y la parte electrónica, lo que puede ser ventajoso en aplicaciones donde se requiere un mayor nivel de seguridad eléctrica.
- **Compensación de temperatura:** La posible presencia de características de compensación de temperatura ayuda a garantizar mediciones precisas en diferentes condiciones ambientales.

ZMPT101B

El sensor de tensión alterna ZMPT101B es un módulo basado en un transformador de tensión reductor que puede medir tensiones de CA de hasta 250V. Para que el módulo sea legible, se utiliza un amplificador operacional montado en el módulo ZMPT101B puede utilizarse para medir la tensión de la red de CA y transmitir la lectura de forma

segura a la entrada del microcontrolador. El módulo contiene un transformador de baja potencia, fabricado por Qingxian Zeming Langxi Electronic. Esencialmente, se necesita una resistencia limitadora en el circuito primario y una resistencia en el circuito secundario para cambiar la tensión alterna, con el que la lectura no se distorsiona, sino que sigue la forma de la señal de tensión alterna. El sensor es seguro ya que está aislado galvánicamente de la entrada de alta tensión. El módulo dispone de una resistencia variable tipo trimmer para calibrar las lecturas.

Los dispositivos aquí referidos ya han sido utilizados en distintos proyectos por separado y actualmente se están implementado en una red para comprobar su capacidad de interacción, se debe hacer notar que el único común denominador además de la modulación CHIRP es su frecuencia central de portadora la cual oscila a 9125Mhz. Sin esta característica en común, no se lograría el enlace para la transmisión de información.

Integración de las estructuras Json para la portabilidad en la red.

Las estructuras JSON son usadas para intercambiar datos y configuraciones entre dispositivos LoRaWAN, gateway y servidores de red LoRaWAN. “LoRaWAN es un protocolo de comunicación MAC (control de acceso a medios), que posee una arquitectura basada en redes LPWAN, esta comunicación es totalmente bidireccional, lo cual permite a los concentradores o gateway recibir varios mensajes a la vez por sus diversos canales.” (Vera,2022, p 21)

JSON es un formato de datos ligero y legible por los usuarios que facilita la transmisión y el procesamiento de información en estos sistemas. Se muestra un ejemplo de una estructura JSON usada específicamente en esta red.

```
{ "device_id": "01",  
  "timestamp": "2023-09-17T10:30:00Z",  
  "data": "000,@,000,#",  
  "port": 80,  
  "rssi": -80,  
  "snr": 10.5,  
  "frame_counter": 001}
```

La estructura anterior puede desglosarse de la siguiente forma:

- **device_id**: El identificador único del dispositivo.
- **timestamp**: La marca de tiempo de cuándo se recibió el mensaje.
- **data**: Los datos codificados en base decimal enviados por el dispositivo.
- **port**: El número de puerto utilizado para la transmisión.
- **rssi**: La potencia de la señal recibida (RSSI).
- **snr**: La relación señal-ruido (SNR).
- **frame_counter**: El contador de tramas, utilizado para evitar duplicación.

En lo que respecta a los datos el esquema inicial multivariable puede entenderse de la siguiente forma (véase figura 2.)

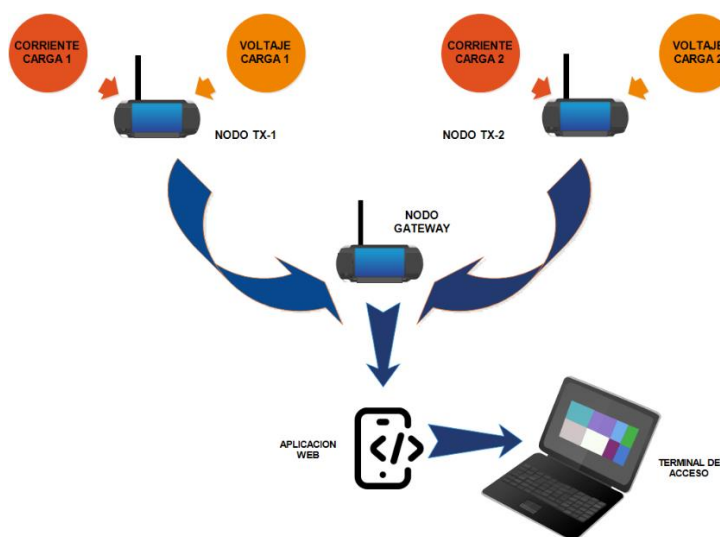


Figura 2. Esquema de la transmisión de las variables en la red LoRa.

RESULTADOS

Para la presentación de los resultados de este trabajo que corresponde a la medición de corriente y voltaje en un sistema monofásico de cargas se diseñó una topología de red básica, aunque se ha podido llegar al nivel 3 de integración. Este diseño de red nos ha permitido el monitoreo de las dos variables antes mencionadas y los resultados han sido óptimos cubriendo distancias de no más de 300 metros con obstáculos (con lo que se refiere a la presencia en línea de vista de edificios de una o dos plantas, jardines con árboles y subestaciones eléctricas), en la siguiente tabla se puede observar los resultados obtenidos con una antena de un cuarto de longitud de onda y una ganancia máxima de 2 dbi en el lóbulo de radiación resultante.

Tabla 2. Obtención de ganancias de recepción, considerando dos corrientes de ionización.

Dispositivo	Distancia	$I_{Tx_{max}}$	RSSI (Promedio)	Eficiencia	Tramas perdidas
NODO TX 1	50m	500mA	-68dBm	47%	Ninguna
NODO TX 1	100m	500mA	-86dBm	33%	Ninguna
NODO TX 1	150m	500mA	-92dBm	29%	Ninguna
NODO TX 1	200m	500mA	-108dBm	17%	20%
NODO TX 1	250m	500mA	-117dBm	10%	60%
NODO TX 1	300m	500mA	-129dBm	0%	90%
NODO TX 2	50m	1A	-37dBm	71%	Ninguna
NODO TX 2	100m	1A	-61dBm	53%	Ninguna
NODO TX 2	150m	1A	-78dBm	40%	Ninguna
NODO TX 2	200m	1A	-86dBm	33%	Ninguna
NODO TX 2	250m	1A	-101dBm	22%	10%
NODO TX 2	300m	1A	-112dBm	13%	40%

Gráficando los resultados expuestos se puede analizar de forma más directa la eficiencia del sistema, en su mayor rango de cobertura posible para la transmisión multivariable (corriente y voltaje). En las figuras 3 y 4 puede observarse la gráfica resultante para determinar la respuesta en función a la eficiencia de transmisión de los dos radios transmisores versus la potencia de transmisión de estos.

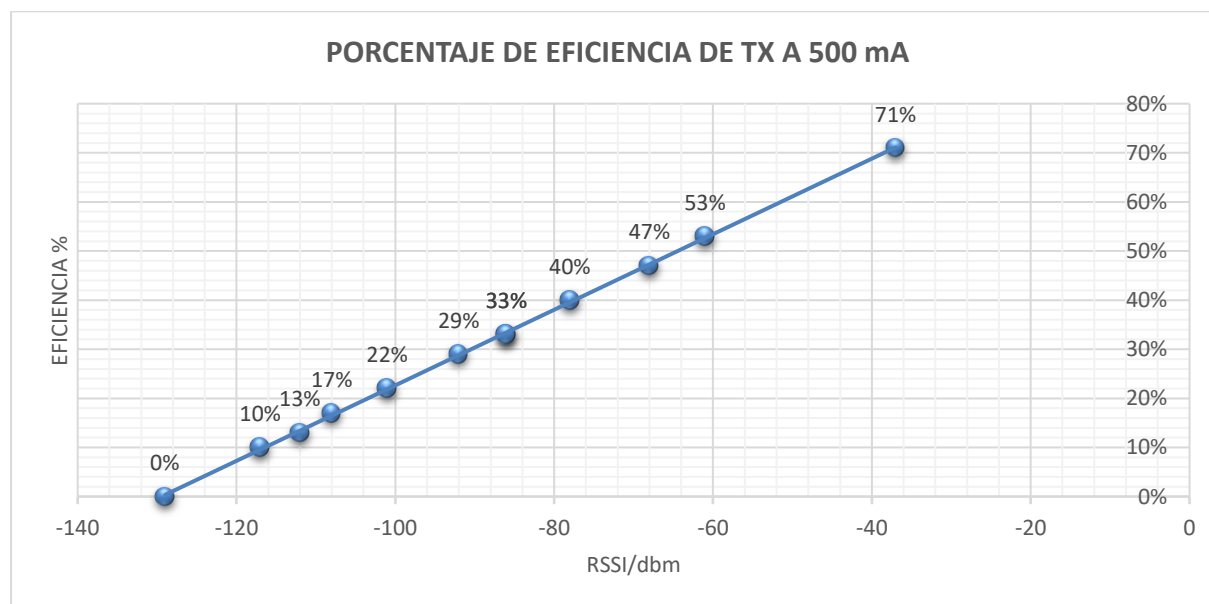


Figura 3. Gráfica de eficiencia de transmisión de datos a 500 mA.

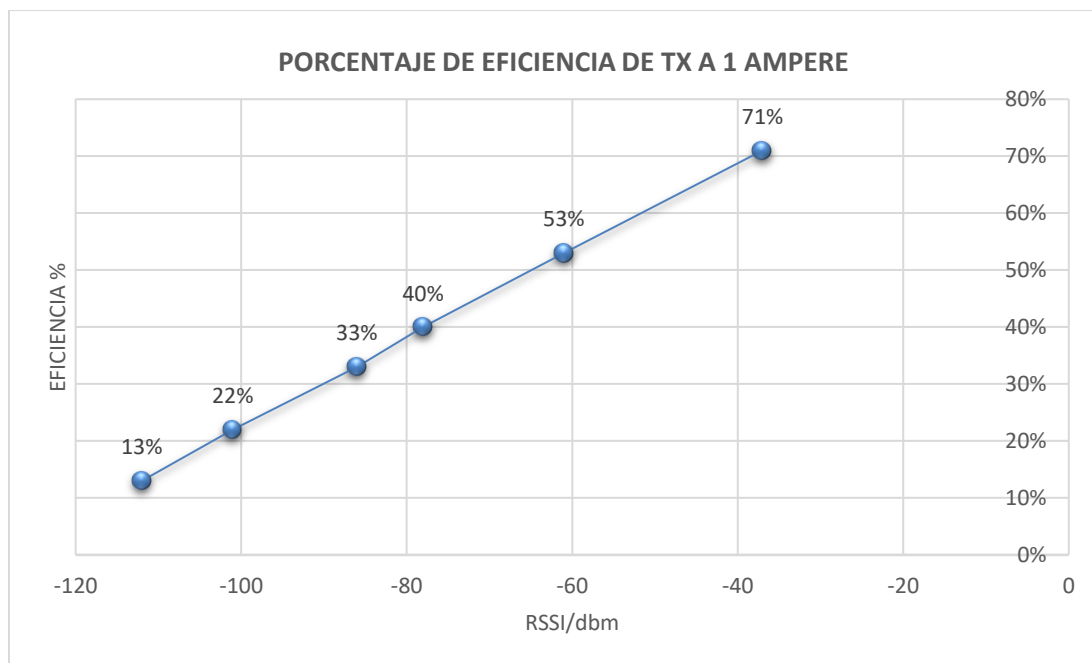


Figura 4. Gráfica de eficiencia de transmisión a 1 Ampere.

A continuación, se presenta la tabla 2, que contiene la información correspondiente a un nodo de transmisión ya inmerso en prueba de campo, con todos los valores de transferencia de datos que se han ido obteniendo, como puede observarse se tiene una eficiencia global promedio del 80%, los valores de 5 volts y 2 amperes corresponde a los parámetros de alimentación no al tipo de trama de información enviada.

Tabla 2. Obtención de parámetros de operación de un nodo primario en operación de campo.

Nodo	V _{Tx}	I _{Tx}	Potencia	B ^a antena	RSSI promedio	TX mts.	Tiempo retardo	Datos perdidos
NODO TX 1	5V	2A	10W	2.5 dB	-96dBm	50m	262us	0
NODO TX 1	5V	2A	10W	2.5 dB	-92dBm	100m	262us	0
NODO TX 1	5V	2A	10W	2.5 dB	-107dBm	150m	260us	0
NODO TX 1	5V	2A	10W	2.5 dB	-113dBm	200m	295us	0
NODO TX 1	5V	2A	10W	2.5 dB	-118dBm	250m	294us	1
NODO TX 1	5V	2A	10W	2.5 dB	-119dBm	300m	295us	2
NODO TX 1	5V	2A	10W	2.5 dB	-120dBm	350m	295us	5

De la interfaz de software para el sistema

Como se expresó anteriormente el proyecto tuvo un nivel de integración 3, lo que corresponde a la realización de una interfaz con características IOT para el fácil y

adecuado manejo de la información. Esta interfaz web se realizó en un formato HTML usando estructuras CSS compatibles al formato JSON, un ejemplo de la interfaz se presenta a continuación. A grandes rasgos el funcionamiento de la interfaz se describen a continuación. El gateway/concentrador envía los datos al servidor (y este a la base de datos) cada vez que los recibe. Debido a las capacidades de PostgreSQL, el sistema gestor de base de datos es posible realizar más de una operación simultáneamente, lo que permite que la información sobre las mediciones se actualice en cuanto llegue al servidor.

Los dos tipos de variables que el concentrador envía (consumo de agua en litros por minuto, L/m, y consumo de energía en watts, W) son desplegadas en la interfaz gráfica de la aplicación web en dos columnas: en cada una se mostrará el consumo particular de los medidores asociados al concentrador, según el tipo de variable que le corresponde. La aplicación web actualiza su contenido cada 0.5 segundos, esto es para evitar la congestión del bucle de eventos de JavaScript (si varias consultas se realizan al mismo tiempo, la interfaz de usuario podría responder de manera más lenta).

Es importante mencionar que, aunque hubiera una gran cantidad de consultas ejecutándose en JavaScript, es muy improbable el agotamiento de memoria; el límite de este recurso disponible depende de varios factores, como la cantidad con la que cuenta el dispositivo en que se está ejecutando el navegador, o las restricciones del propio navegador. Este rango puede estar entre algunos cientos de megabytes y varios gigabytes. No obstante, la gran mayoría de los navegadores están diseñados para gestionar eficientemente los recursos, de modo que el agotamiento de memoria no suele ser un problema grave.

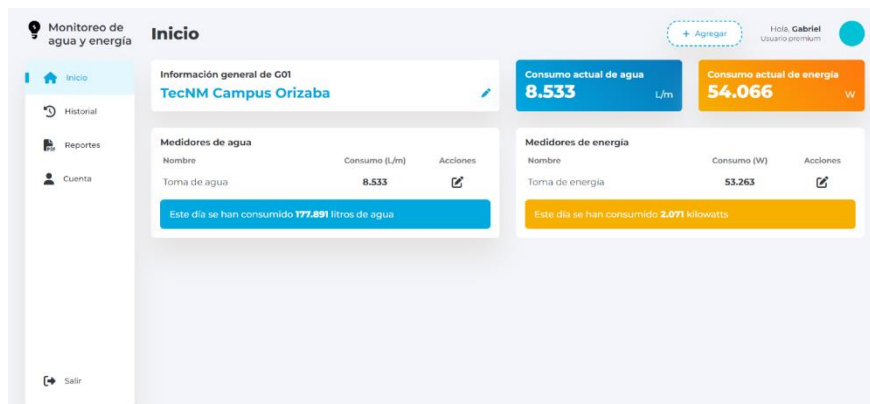


Figura 5. Interfaz IOT para la presentación de resultados obtenidos de la red LoRa.

En caso de que el concentrador deje de enviar información por algún fallo en el sistema, la aplicación web mostrará un mensaje de advertencia si no se ha recibido una actualización en 1 minuto.

Para realizar la concentración de esta información se diseñó un “servidor propietario”. “El servidor propietario tiene dos funciones que podemos distinguir fácilmente. La primera se encarga de la actualización de la base de datos y reenvío en caso de ser mensajes para el grupo de emergencias. La segunda función consiste en el despliegue de un servicio web para la visualización y gestión de la red por parte del administrador de esta.” (Delgado, 2021)

En nuestro caso diariamente a las 12:00 A.M., el “servidor propietario” está diseñado para hacer un promedio por hora de las mediciones registradas en el día de cada medidor, información que se almacena para que pueda consultarse en el apartado de "Historial", que presenta gráficamente el consumo de una fecha determinada. Una vez realizado el promedio, los datos del día anterior son eliminados, con el objeto de optimizar el almacenamiento en la base de datos.

DISCUSIÓN

El sistema integral que se ha desarrollado ha permitido comprender mas afondo los comportamientos de las redes LoRa en cuanto a su potencia de transmisión, alcance efectivo, niveles de atenuación y perdida de datos, escalabilidad y modularidad, de igual forma el desarrollo de la interfaz IOT nos ha permitido lograra un medio eficaz, fácil de usar y económico, pues al ser un desarrollo propio, no se tuvo la necesidad de utilizar paquetes o aplicaciones registradas, por lo que no se requirió adquirir ningún software secundario o licencia. Lo anterior nos pone en una ventaja competitiva sobre otros trabajos realizados por otras universidades. Aunado a los anteriormente citado, existen tres aspectos notorios que es necesario recalcar en el desarrollo de este proyecto:

Uso de tecnologías mixtas (LoRa. MicroElectroMechanical Systems, System on Chip), lo cual además de proporciona una solución de comunicación de larga distancia, también proporciona un bajo consumo de energía, lo que resulta crucial en aplicaciones de monitoreo de energía eléctrica a gran escala. Esto no solo facilita la instalación de sensores en ubicaciones remotas, sino que también reduce la necesidad de

mantenimiento constante, esto debido a que las tecnologías como LoRa y sistemas basados en microelectromecánica (MEMS) a menudo están diseñadas con un enfoque en la eficiencia energética, por otro lado, los SoC integran múltiples funciones en un solo chip, lo que permite construir dispositivos más pequeños y eficientes en términos de energía. Esto facilita la integración en entornos con restricciones de espacio y facilita su despliegue en ubicaciones remotas, ya que estos dispositivos pueden operar con baterías de larga duración o incluso utilizar fuentes de energía alternativas, como paneles solares, lo que reduce la necesidad de realizar mantenimiento frecuente para cambiar las baterías.

Integración de diversas plataformas en la Nube. La utilización de una plataforma de gestión de datos en la nube permite un acceso conveniente a los datos recopilados desde la red LoRaWAN-SOC por medio de los sensores de tipo MEMS. Esto es esencial para la gestión efectiva de múltiples casos de instalación modular o para permitir a los usuarios supervisar y controlar su consumo de energía en tiempo real de forma eficiente.

Análisis de datos específicos, El sistema no solo recopila datos, sino que también ofrece oportunidades para el análisis de datos específicos los cuales pueden incluir la detección de anomalías, la predicción de tendencias de consumo y la generación de recomendaciones para optimizar el uso de energía eléctrica. En resumen, el diseño de un sistema integral LoRa-IoT para el monitoreo de gasto de energía eléctrica en un inmueble representa un paso significativo hacia la gestión eficiente de la energía en el entorno construido

CONCLUSIONES

El diseño de un sistema integral LoRa-IoT para el monitoreo de gasto de energía eléctrica en un inmueble ha demostrado ser una herramienta efectiva para mejorar la eficiencia energética, reducir costos y aumentar la conciencia ambiental. La combinación de tecnologías y la recopilación de datos en tiempo real ofrece una solución efectiva y versátil que beneficia tanto a los propietarios de edificios como al medio ambiente, allanando el camino para un futuro más sostenible y responsable en la gestión de la energía eléctrica.

LITERATURA CITADA

Ordoñez, I. 2017. Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y de los dispositivos LoRa. Openaccess, UOC.

Gómez, G. 2017. Diseño y fabricación de capa de comunicaciones basada en LoRa para plataforma modular de redes de sensores inalámbricas. Universidad Politécnica de Madrid. España.

Moya, M. 2018. Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos. Universidad Politécnica de Valencia. España.

Mejías, D. 2021. Diseño de protocolos de redes Mesh basada en LoRa. Universidad Politécnica de Valencia. España.

Delgado, F. 2021. Arquitectura LoRaWAN para entornos sin cobertura. Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones, Universidad de Granada.

Vera, L. 2022. Diseño de una red LPWAN basada en tecnología LoRa para las estaciones hidrometeorológicas. Escuela superior politécnica del litoral. Ecuador.