Desarrollo sistema IoT para monitoreo de alumbrado público

Danko M. Tymcziszyn*; Gonzalo N. Tessari

[a] *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*
FI-UNaM.
Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina
e-mails: dankotym@gmail.com, gonzalotessari7@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema para el monitoreo automatizado del alumbrado público en la ciudad de Posadas, Misiones. El objetivo principal es detectar fallas en las luminarias, tales como luminarias encendidas y/o apagadas, en horarios inadecuados o desperfectos que afecten la continuidad del servicio. Para ello, se desarrolla un dispositivo basado en una placa ESP32 de la empresa Heltec, la cual, por medio de adquisidores de tensión y corriente, permite registrar el encendido de cuatro circuitos diferentes de luminarias. Estos datos son procesados localmente y transmitidos mediante el protocolo de comunicación LoRa. El diseño priorizó la simplicidad, robustez, el bajo consumo energético y la reducción del espacio físico requerido, mediante el uso de adquisidores no invasivos y circuitos analógicos compactos.

Como resultados, se caracterizó el transformador de intensidad RSCT2-2000/G y RSCT2-1000/G, obteniéndose un factor de conversión aproximado y alta linealidad en el rango ensayado. Asimismo, se verificaron en ensayos de laboratorio las etapas de detección de tensión y corriente: las salidas quedaron dentro de niveles adecuados para su interpretación por la Heltec, habilitando la detección confiable de encendido/apagado en los cuatro canales. Se integró el bloque transmisor en una única PCB de 15 cm × 16,5 cm.

Los resultados preliminares confirman la factibilidad de un sistema compacto, modular y de bajo costo para el monitoreo del alumbrado público, con capacidad de escalarse e integrarse a sistemas de notificación. Aún resta avanzar en el desarrollo del bloque receptor y del servidor central para completar la solución integral.

Este sistema se perfila como una herramienta de gran utilidad para la gestión eficiente del alumbrado público, con potencial de integración en plataformas IoT de mayor alcance.

Palabras Clave *–Acondicionamiento de señal, Alumbrado público, Automatización, ESP32, IoT, LoRa, Monitoreo eléctrico, Red eléctrica, Sensor no invasivo, Transformador de intensidad (TI).*

1 Introducción

El presente proyecto se enfoca en el desarrollo de un sistema para la medición y monitoreo automatizado de los parámetros eléctricos de una red destinada al alumbrado público en la ciudad de Posadas, específicamente en la zona de la costanera. El objetivo principal es registrar valores de tensión y corriente en cuatro puntos estratégicos del sistema, a fin de detectar posibles fallas o anomalías operativas, como luminarias encendidas en horarios inadecuados, apagadas cuando deberían estar en funcionamiento o con desperfectos que afecten la continuidad del servicio.

Existen diversas soluciones comerciales para el monitoreo y la telegestión del alumbrado público, generalmente basadas en sistemas de comunicación GSM/3G/4G o en tecnologías PLC (Power Line Communication). Estas alternativas suelen ofrecer una amplia gama de funciones, como la programación horaria, el control individual de luminarias y la integración con plataformas

*Autor en correspondencia.

de gestión municipal, aunque presentan limitaciones en cuanto a costos de implementación, complejidad de instalación y dependencia de infraestructuras específicas.

En comparación, la propuesta aquí presentada se centra en una solución de bajo costo, de fácil instalación y mantenimiento, que emplea sensores no invasivos para la detección de corriente y un módulo de comunicación LoRa [1]. Este enfoque prioriza la simplicidad y la eficiencia energética, lo que lo convierte en una alternativa viable para municipios que requieren ampliar sus capacidades de monitoreo sin incurrir en inversiones significativas ni depender de redes celulares de alta capacidad.

El artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección de **Diseño del sistema** se detallan los objetivos, requisitos y metodología aplicada en el desarrollo del prototipo. Luego, se presentan los bloques principales del sistema, acompañados de una descripción de los mismos. A continuación, en la sección de **Resultados preliminares**, se describen los ensayos realizados sobre los sensores y los prototipos de circuito, junto con las primeras pruebas de integración. Finalmente, en **Conclusiones**, se discuten las ventajas del sistema, las posibilidades de escalabilidad y los próximos pasos para completar la solución integral.

2 Metodología

2.1 *Diseño del sistema*

La estrategia de trabajo empleada en este proyecto se centró en el diseño de un circuito de baja complejidad, robusto y de dimensiones reducidas, capaz de realizar mediciones en los cuatro puntos de interés sin interferir en el funcionamiento normal de la red eléctrica.

Es importante destacar que todos los puntos de medición se encuentran localizados dentro de un tablero central, desde el cual se distribuye la red. Dado que existe la posibilidad de que la demanda eléctrica aumente en períodos breves, ya sea por la realización de eventos o por futuras expansiones, el sistema fue concebido con un enfoque versátil y escalable, permitiendo su adaptación a nuevas aplicaciones sin requerir rediseños significativos.

Existen ciertos requisitos o condiciones impuestas por el entorno en el que deberá implementarse el proyecto. Estos se pueden dividir en requisitos de hardware y de software.

Requisitos de hardware:

- El sistema debe tener un soporte encastrable para riel DIN, para ubicarse apropiadamente en el tablero.
- Debe poder alimentarse con una tensión de 220 VAC (con posibilidad de fuente externa).
- Debe contar con comunicación 4G/3G/GSM para el envío de información.
- Debe poder medirse la tensión en los 4 circuitos.
- El sistema debe poseer control sobre 2 salidas de relé.
- La medición de corriente debe realizarse mediante un sensor no invasivo.

- El sistema no debe superar las dimensiones de 20 cm x 20 cm x 20 cm.

Requisitos de software:

- Debe poder informarse el estado de cada uno de los 4 circuitos del tablero.
- Se deben poder comandar las 2 salidas de relé.
- Debe informarse sobre novedades (por ejemplo, sectores apagados en horario de funcionamiento).
- Como requisito tentativo, se plantea la incorporación de un bot de Telegram para notificar novedades.

Se implementaron circuitos compactos para adaptarse a las limitaciones de espacio del tablero, y se seleccionó el protocolo LoRa en lugar de alternativas como 3G o GSM, dado que la información a transmitir es de baja complejidad y no requiere un gran ancho de banda.

A continuación, se muestra un diagrama de bloques del sistema.

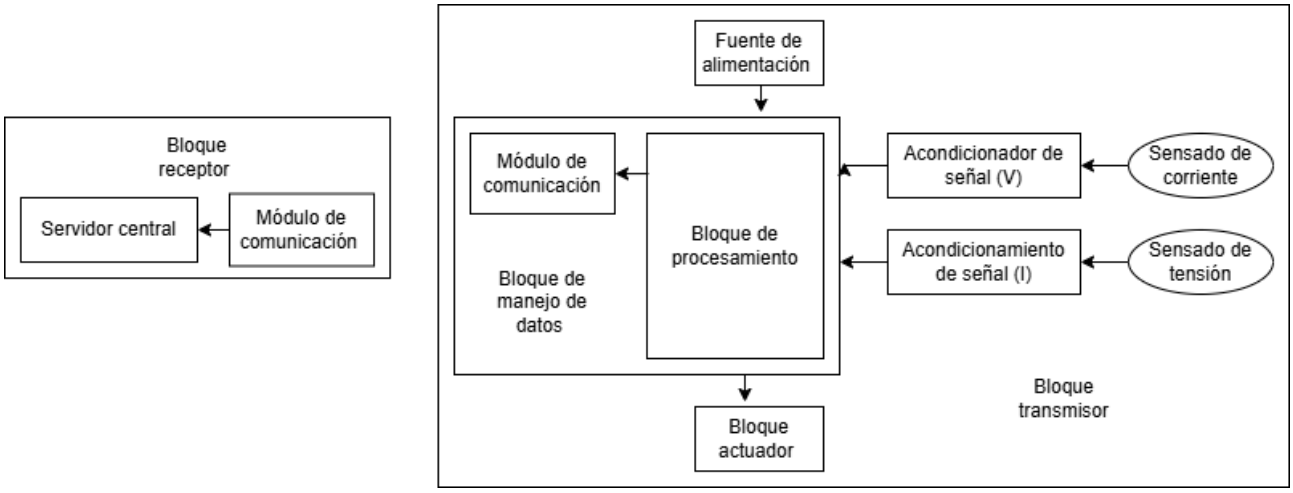

Fig. 1. Diagrama de bloques del proyecto.

A grandes rasgos, el sistema se divide en dos secciones, una encargada de la medición de la variable, su procesamiento y envío (bloque transmisor), y otra encargada de la recepción, interfaz y notificación de irregularidades (bloque receptor).

2.2 Detección de corriente

Esta etapa está conformada por sensores de corriente no invasivos. Se utilizaron transformadores de intensidad (TI) [5]. Se optó por este tipo de dispositivo ya que, debíamos poder detectar la circulación de corriente sin interferir en las líneas de alimentación de las luminarias en cuestión (adquisición no invasiva).

Los TI empleados en el sistema son del modelo RSCT2-2000/G. Estos son transformadores de corriente, proporcionan un nivel de tensión en sus secundarios en función de la corriente que circula por el primario.

Fig. 2. Transformadores de intensidad RSCT2-2000/G.

Estos sensores fueron proporcionados por la cátedra, obtenidos del reciclaje de equipos en desuso. No se logró encontrar información sobre las características de estos dispositivos, por lo que se procedió a determinarlas de manera experimental.

Los ensayos se realizaron haciendo circular una corriente alterna a través de un conductor que, a su vez, pasa por el sensor, utilizando un osciloscopio para medir la tensión en los terminales de salida. La intensidad de la corriente se controló mediante un autotransformador, aislado por medio de un transformador adicional. Cabe aclarar que, por cuestiones de integridad de los dispositivos, solo se pudo alcanzar una corriente máxima de $5\,A$ en el conductor. Para valores mayores al mencionado, se hizo pasar el conductor múltiples veces a través del sensor.

A continuación se pueden observar los resultados obtenidos.

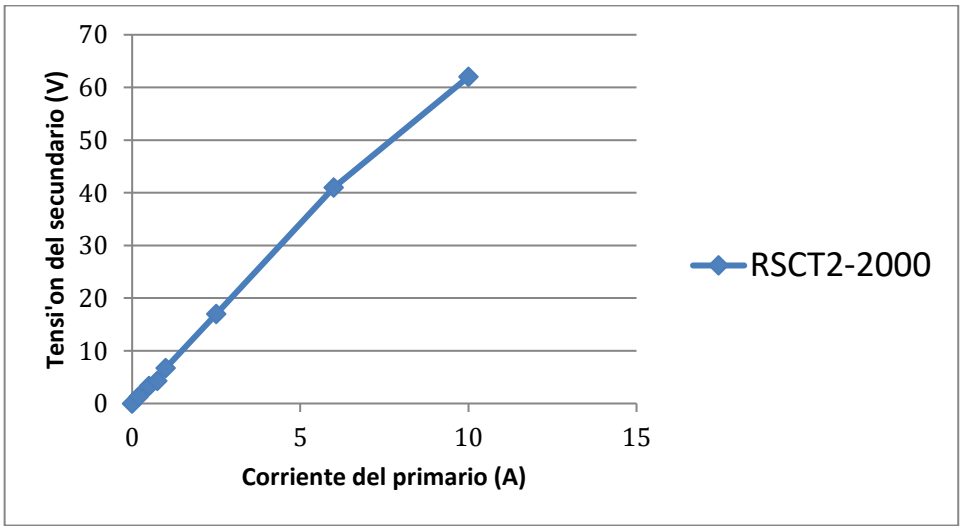

Fig. 3. Gráfico de los datos obtenidos de los ensayos.

Se estableció que poseen un factor de conversión de $1:2$; por cada ampere (medición del valor eficaz) se obtuvo una tensión de $6{,}5\ V$ (medición del valor pico) en el secundario.

El sensor presenta una linealidad considerablemente buena, obteniéndose un coeficiente de determinación (R^2) de $0{,}997$, con una tolerancia aproximada de $\pm 5\%$ en el rango de los ensayos. No se logró determinar la corriente máxima medible. Por este motivo, en el trabajo se establece como criterio de uso la detección de corrientes de hasta $10\ A$ eficaces por circuito, rango que resulta suficiente para identificar el encendido o apagado de los tramos de luminarias considerados o alguna falla relacionada con sobrecarga.

2.3 Acondicionamiento de señal (I)

Este bloque tiene la tarea de ajustar el rango de los valores proporcionados por los sensores a una señal adecuada para los bloques posteriores. Está conformado por circuitos analógicos simples, con el objetivo de evitar un uso excesivo de espacio. A continuación, se muestra un diagrama del circuito:

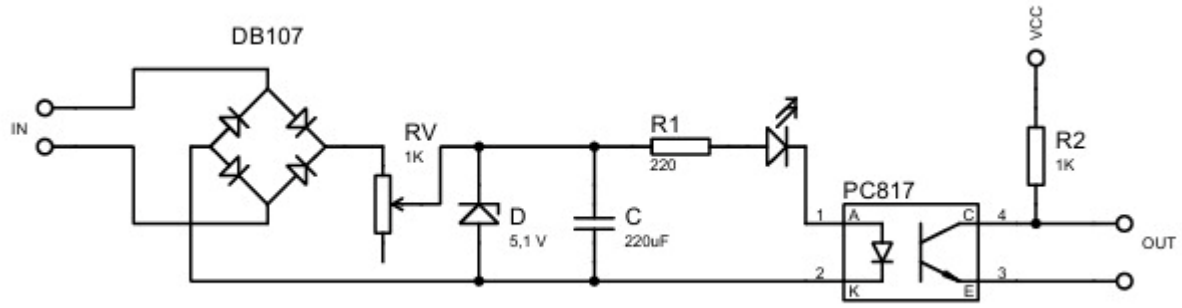

Fig. 4. Circuito adaptador de señal de corriente.

Como puede verse en la Fig. 4, el circuito consta de una etapa de rectificación y regulación, seguida de un optoacoplador. La señal entrante desde el transformador de corriente es rectificada y su valor es regulado por un diodo Zener. Esta señal activa o desactiva el optoacoplador, generando una salida en nivel bajo o alto respectivamente. Cabe aclarar que se incorporó una resistencia variable en el sistema para regular su sensibilidad, y el optoacoplador proporciona un segundo nivel de aislamiento entre la etapa de entrada y el módulo ESP 32 [*2*].

Otro dato no menor, es que este circuito y su sensor (modelo RSCT2-2000) se replican en los cuatro puntos de medición, al igual que en el caso de la medición de tensión.

Para el diseño de este circuito y sabiendo que la corriente que circularía por el mismo sería de unos pocos miliamperes, se tuvo el criterio de elegir un puente de diodos que cumpla con la condición de ser pequeño físicamente y de baja caída de tensión, además, para garantizar la integridad del mismo, se definió un mínimo de $100\ mA$ como la corriente que debería tolerar este componente. En cuanto a la elección del Zener, se realiza por protección del LED testigo y del optoacoplador, estableciendo un valor de $5{,}1\ V$ para el calculo de los siguientes componentes. Para calcular la resistencia R_1 se plantea (1) considerando que, una corriente suficiente para garantizar la

saturación del LED y del optoacoplador, sería de entre 5 y $10\ mA$, con lo que se adopta el valor de $R_1 = 220\ \Omega$, quedando una corriente de $8{,}6\ mA$.

$$R_1 = \frac{V_z - V_{LED} - V_{Opto}}{I} \tag{1}$$

$$R_{1(5mA)} = \frac{(5{,}1 - 2 - 1{,}2)V}{5\ mA} = 380\ \Omega \tag{2}$$

$$R_{1(10mA)} = \frac{(5{,}1 - 2 - 1{,}2)V}{10\ mA} = 190\ \Omega \tag{3}$$

Para la potencia del resistor, se sigue (4), con lo cual se adopta P_{R_1} =1/4 W.

$$P_{R_1} = F_s \cdot I^2 \cdot R_1 \Longrightarrow 1{,}1 \cdot (8{,}6\ mA)^2 \cdot 220\ \Omega = 17{,}9\ mW \tag{4}$$

En cuanto al capacitor para filtro de ripple, se sigue (5) y se decide adoptar un valor de capacitor de $220\ \mu F$, sabiendo que debe superar los $5{,}1\ V$ de tensión.

$$C = \frac{I_{máx}}{2\sqrt{2} \cdot f \cdot V_{máx} \cdot F_R} \Longrightarrow \frac{8{,}6\ mA}{2\sqrt{2} \cdot 100Hz \cdot 5{,}1V \cdot 5\%} = 119\ \mu F \tag{5}$$

En cuanto al resistor de *pull-up* [*6*], se eligió un valor típico utilizado para dicha función, sin realizar cálculos, quedándonos con un resistor de $R_{PU} = 1\ k\Omega$ y ¼ W de potencia. El valor de la resistencia variable utilizada para el ajuste de sensibilidad del circuito fue hallada experimentalmente, por lo cual, tampoco se realizaron cálculos para determinar su valor.

2.4 Detección de tensión

En esta etapa no se empleó un sensor comercial específico, solo se conectó en paralelo con la línea de tensión. Dado que el objetivo del proyecto es únicamente detectar la presencia o ausencia de tensión, y no medir su valor exacto, no fue necesario recurrir a un sensor no invasivo en esta instancia. Es decir, esta etapa simplemente conecta la etapa de acoplamiento de señal (V) a la red eléctrica.

2.5 Acondicionamiento de señal (V)

Al igual que en la etapa de acoplamiento de corriente, se busca ajustar el rango de valores de la variable medida para que pueda ser interpretada apropiadamente por las etapas siguientes, enfocándose en la simplicidad y el ahorro de espacio. El circuito es el siguiente:

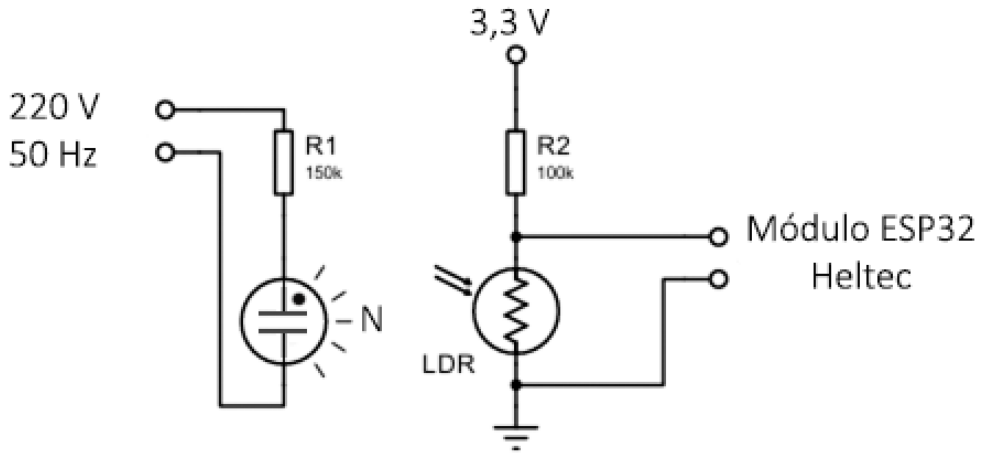

Fig. 5. Circuito adaptador de señal de tensión.

Para este caso, se utiliza un sistema basado en la interacción entre una lámpara de neón y un LDR. En caso de existir un nivel de tensión próximo a los $60\ V$ en la red, esta activará la lámpara, la cual a su vez provocará una variación en los valores resistivos del LDR [7]. Para aprovechar esta variación, se emplea un divisor resistivo, de manera que la tensión en la salida se modifique en consecuencia, permitiéndonos así, detectar un estado alto o bajo de tensión, el cual el módulo ESP interpreta como el encendido o apagado del circuito.

La principal razón detrás de la elección de este circuito radica en su capacidad para detectar niveles mínimos de tensión. En las pruebas realizadas, los circuitos basados en optoacopladores reaccionaban ante valores demasiado bajos, generando interpretaciones erróneas. Una alternativa habría sido incorporar diodos Zener para elevar el umbral de conducción de los optoacopladores; sin embargo, en la cátedra no se disponía de diodos con valores adecuados. Además, el circuito adoptado presenta ventajas adicionales: ocupa menos espacio, es más simple y requiere una menor cantidad de componentes. Por otro lado, no fue posible conseguir transformadores de tensión con dimensiones apropiadas. La lámpara utilizada emite una cantidad de luz perceptible recién a partir de los $60\ V$, evitando que el sistema interprete valores inferiores y reduciendo así la sensibilidad al ruido o a posibles defectos en la red

Los principales inconvenientes detectados fueron la dispersión de luz y la proximidad entre las lámparas. Esto se solucionó envolviendo la lámpara y el LDR en una sección de tubo termocontraíble, cubriendo los espacios con silicona y aplicando tinta negra para oscurecerla.

La resistencia limitadora utilizada para saturar el neón se halla siguiendo (6) y (7), adoptando el valor de $R_N = 150\ k\Omega$ y ¼ W.

$$R_N = \frac{V_{línea} - V_{neón}}{I_{neón}} \approx \frac{(220-60)V}{1\ mA} = 160\ k\Omega \qquad (6)$$

$$P_{R_N} = 1{,}1 \cdot (1mA)^2 \cdot 150k\Omega \approx 165\ \text{mW} \qquad (7)$$

2.6 Bloque de manejo de datos

Fig. 6. Placa Heltec-ESP32.

Este bloque posee dos subbloques en su interior. Esta particularidad se debe a que se utiliza una placa Heltec [*4*], modelo Wireless Stick [*8*] una placa prediseñada que cuenta con un microprocesador más una sección destinada a la comunicación. Es decir, con esta herramienta se realiza el trabajo de dos bloques en forma conjunta dentro de un mismo dispositivo.

2.6.1 Bloque de procesamiento.

Aquí es donde se realiza el análisis de los datos recibidos por las etapas anteriores. El microprocesador presente en esta placa Heltec es un ESP32, el cual puede interpretar valores recibidos, para posteriormente procesarlos en una variable que será enviada a través del bloque de comunicación.

2.6.2 Módulo de comunicación (Bloque transmisor)

Una vez procesada la información recibida de los sensores, esta debe ser comunicada al bloque receptor. Esto se realiza mediante un módulo de comunicación. La placa utilizada cuenta con un módulo de comunicación *LoRa* incorporado, lo cual fue una de las principales razones para su elección.

Cabe aclarar que se optó por este tipo de protocolo en lugar de 4G/3G/GSM, ya que no se requiere transmitir grandes volúmenes de información. Además, *LoRa* es un protocolo más accesible y sencillo de implementar que los anteriormente mencionados.

2.7 Fuente de alimentación

La finalidad de este bloque es adaptar la tensión proveniente de la red para que sus características sean compatibles con los requerimientos del sistema.

El circuito es el siguiente:

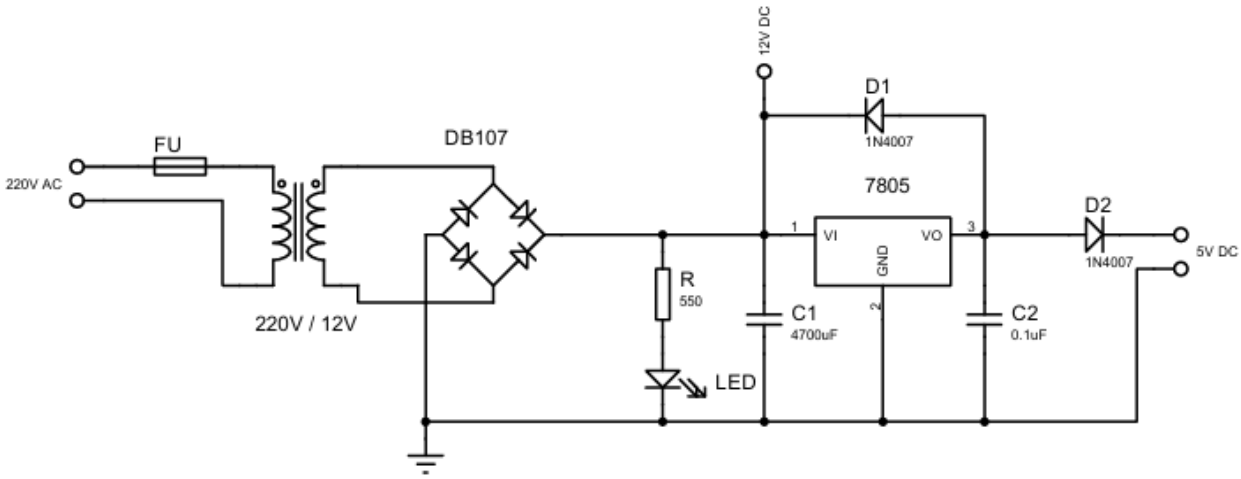

Fig. 7. Fuente de alimentación.

Se implementó un circuito simple, compuesto por un transformador de baja potencia, seguido por un puente de diodos como etapa rectificadora, y un capacitor para estabilizar la señal. Luego, se incluye un regulador de tensión integrado para alimentar el módulo Heltec con la tensión correspondiente, junto con sus diodos de protección y un LED testigo.

En su mayoría los componentes utilizados en el circuito de la **Fig. 7**, son valores de circuitos típicos del regulador LM7805 [*9*], teniéndose que calcular únicamente los valores del resistor para el LED testigo, los cuales siguen las ecuaciones (8) y (9), con lo cual se decide adoptar R_{led} de $560\ \Omega$ y ¼ W.

$$R_{led} = \frac{(12-2)V}{20\ mA} \approx 500\ \Omega \qquad (8)$$

$$P_{R_{led}} = 1{,}1 \cdot (17{,}8mA)^2 \cdot 560\Omega \approx 196{,}4\ \text{mW} \qquad (9)$$

2.8 Bloque actuador

Este bloque está conformado por dos relés y el conjunto de componentes adecuados para garantizar su correcto funcionamiento. Si bien en el proyecto no se especifica explícitamente su función, se intuye que estos tienen como finalidad influir en la actividad de la red. De todas formas, como la corriente que se comande, circulará a través de parte del circuito impreso (PCB [*3*]), debemos mencionar que no aconsejamos superar los $5\ A$, teniéndose que utilizar un contactor aparte si fuera necesario superar dicho valor de corriente, en cuyo caso, los relés servirán para comandar la bobina del contactor.

El circuito es el siguiente:

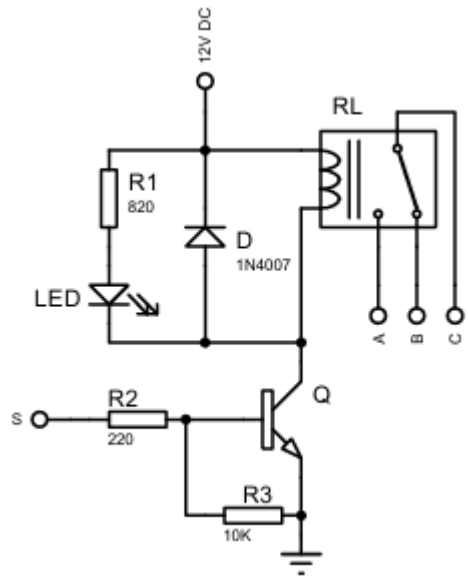

Fig. 8. Circuito del bloque de actuación.

Como se observa en la imagen anterior, el circuito es bastante simple. Consta de un transistor cuya base es excitada mediante una salida del módulo ESP - Heltec. Se incorporó un LED testigo, así como un diodo de volante para protección.

Los relés utilizados para este trabajo presentan un consumo próximo a los $70\ mA$, a lo cual se le suma un consumo de $10\ mA$ considerado para el LED testigo, obteniendo una corriente de $80\ mA$ como corriente de colector para realizar los cálculos del transistor BJT. Con los resultados de la ecuación (10) y (11), se decide adoptar una resistencia de $R_{led} = 820\ \Omega$ y ¼ W.

$$R_{led} = \frac{V_{CC} - V_{LED} - V_{CE(sat)}}{I_{LED}} \approx \frac{(12 - 2 - 0{,}7)V}{10\ mA} = 930\ \Omega \qquad (10)$$

$$P_{R_{led}} = 1{,}1 \cdot (11{,}3mA)^2 \cdot 820\Omega = 116\ mW \qquad (11)$$

Para el corte y saturación del transistor BJT, se halla un resistor de base siguiendo la ecuación (12) y (13), además de adoptar un resistor de valor típico $10\ k\Omega$ entre base y emisor, para garantizar el corte de dicho transistor. El resistor adoptado para la base del transistor es de $R_B = 820\ \Omega$ y ¼ W.

$$R_B = \frac{V_{ESP} - V_{BE}}{I_B} \Longrightarrow \frac{(3{,}3 - 1{,}2)V}{\left(\frac{80mA}{150}\right)} = 840\ \Omega \qquad (12)$$

$$P_{R_B} = 1{,}1 \cdot (2{,}56\ mA)^2 \cdot 820\ \Omega \approx 5{,}91\ \text{mW} \qquad (13)$$

2.9 *Módulo de comunicación (bloque receptor)*

Para esta sección se utilizarán los Gateway [10] *LoRa* disponibles en la ciudad de Posadas. Actualmente existen dos, y se pretende utilizar el más cercano al dispositivo emisor.

2.10 *Servidor central*

Este bloque es el encargado de notificar cualquier irregularidad pertinente en la red, basándose en la información recibida por el bloque transmisor. Para su diseño, se planea utilizar alguna interfaz web como Grafana [11] para presentar los datos recibidos del módulo de adquisición.

Cabe aclarar que no se ha avanzado mucho en las etapas relacionadas con el bloque receptor, por lo que solo es posible comentarlas de manera general.

3 Resultados preliminares

Hasta el momento se han verificado satisfactoriamente todos los circuitos asociados a la medición de tensión y corriente del dispositivo transmisor. Las mediciones realizadas en las salidas de cada circuito confirmaron que los niveles de señal se encuentran dentro de los rangos adecuados para ser interpretados correctamente por la placa Heltec.

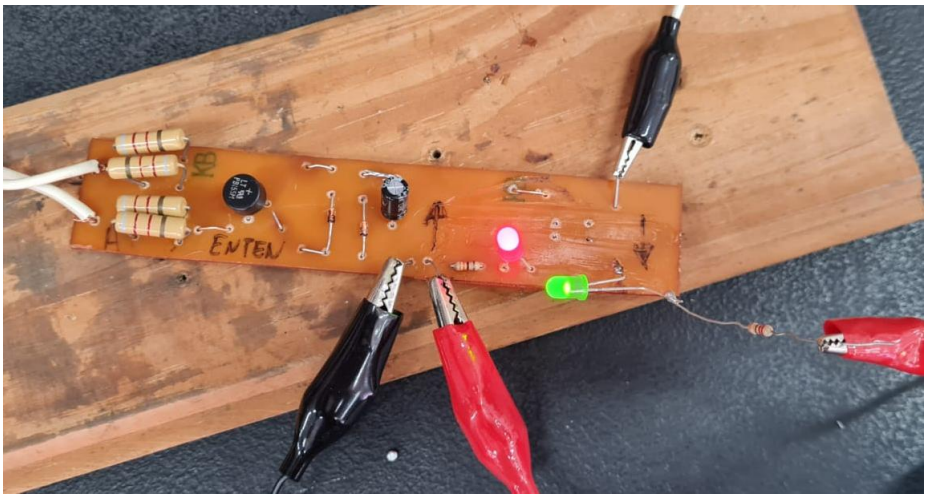

Fig. 9. Circuito de ensayo, adaptador de señal de corriente.

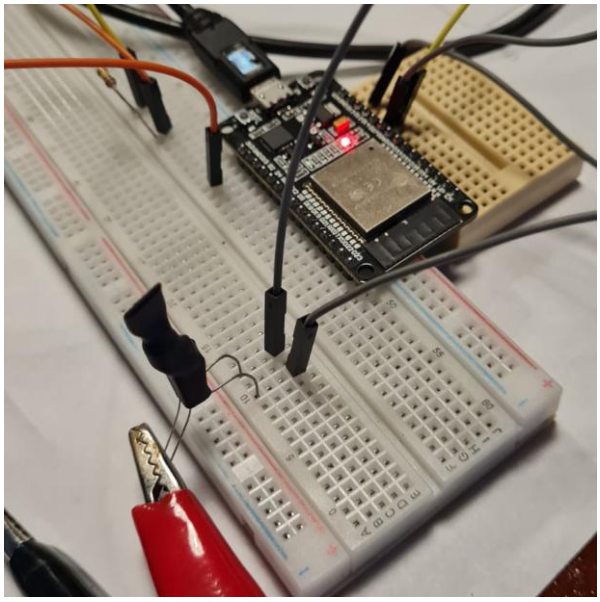

Fig. 10. Circuito de ensayo; adaptador de señal de tensión.

En la Fig. 9 se muestra el circuito adaptador de corriente. En su entrada se conecta el sensor modelo RSCT2-2000, mientras que en su salida se encuentra la conexión hacia la placa de control. Para este ensayo se empleó una resistencia de valor fijo en lugar de un potenciómetro, a modo provisional.

En la Fig. 10 se presenta el adaptador de tensión. El componente negro visible en la imagen corresponde al conjunto formado por la lámpara y el LDR, ambos contenidos dentro de un tubo termocontraíble.

Cabe aclarar que las pruebas se llevaron a cabo utilizando circuitos prototipo, los cuales no representan aún la forma final del sistema. Todo el conjunto transmisor fue diseñado para integrarse en una sola placa de 15 cm x 16,5 cm. El diseño de la PCB ya se encuentra finalizado y actualmente se está avanzando con la etapa de montaje del circuito.

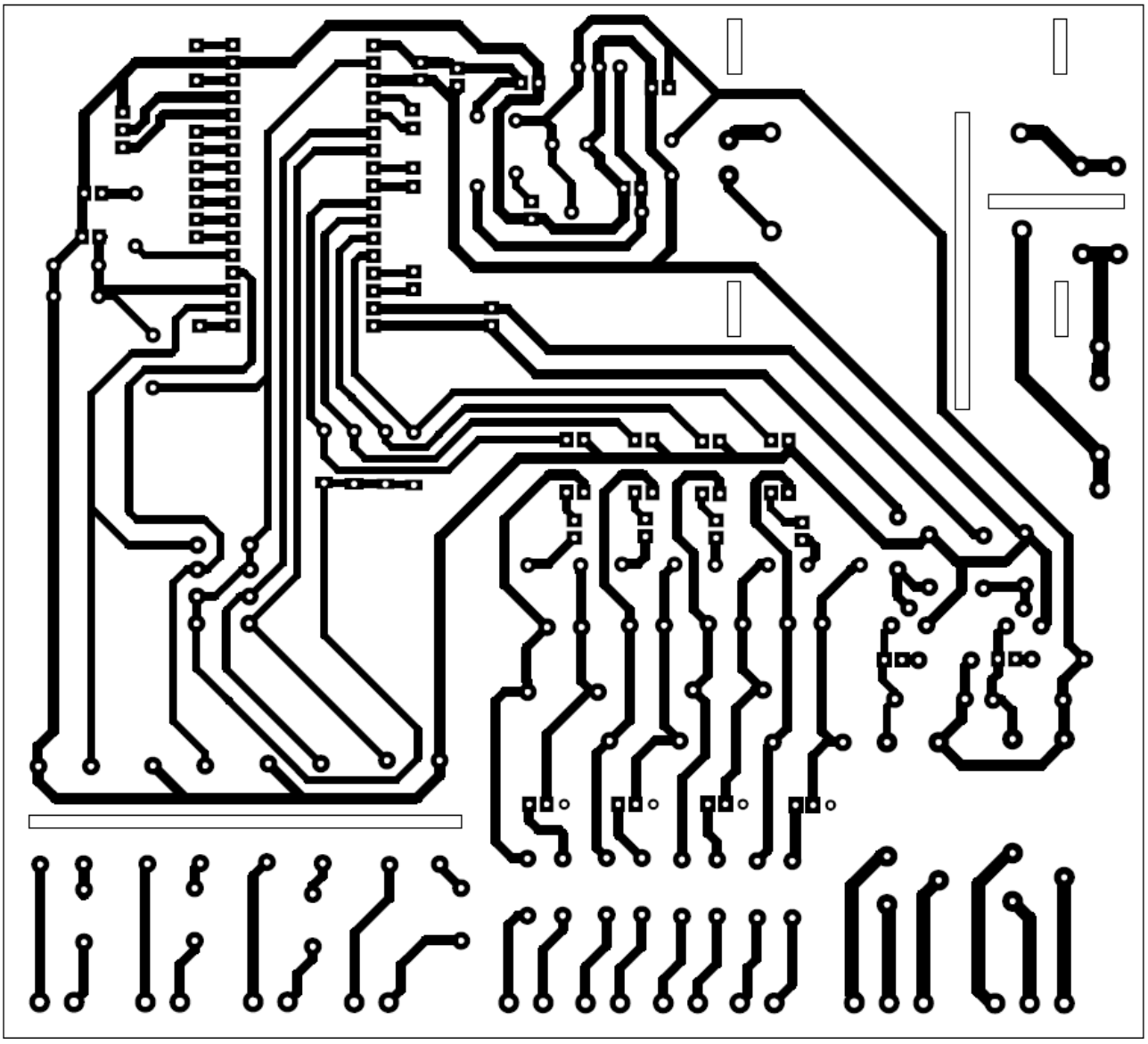

Fig. 11. Diseño PCB de la placa.

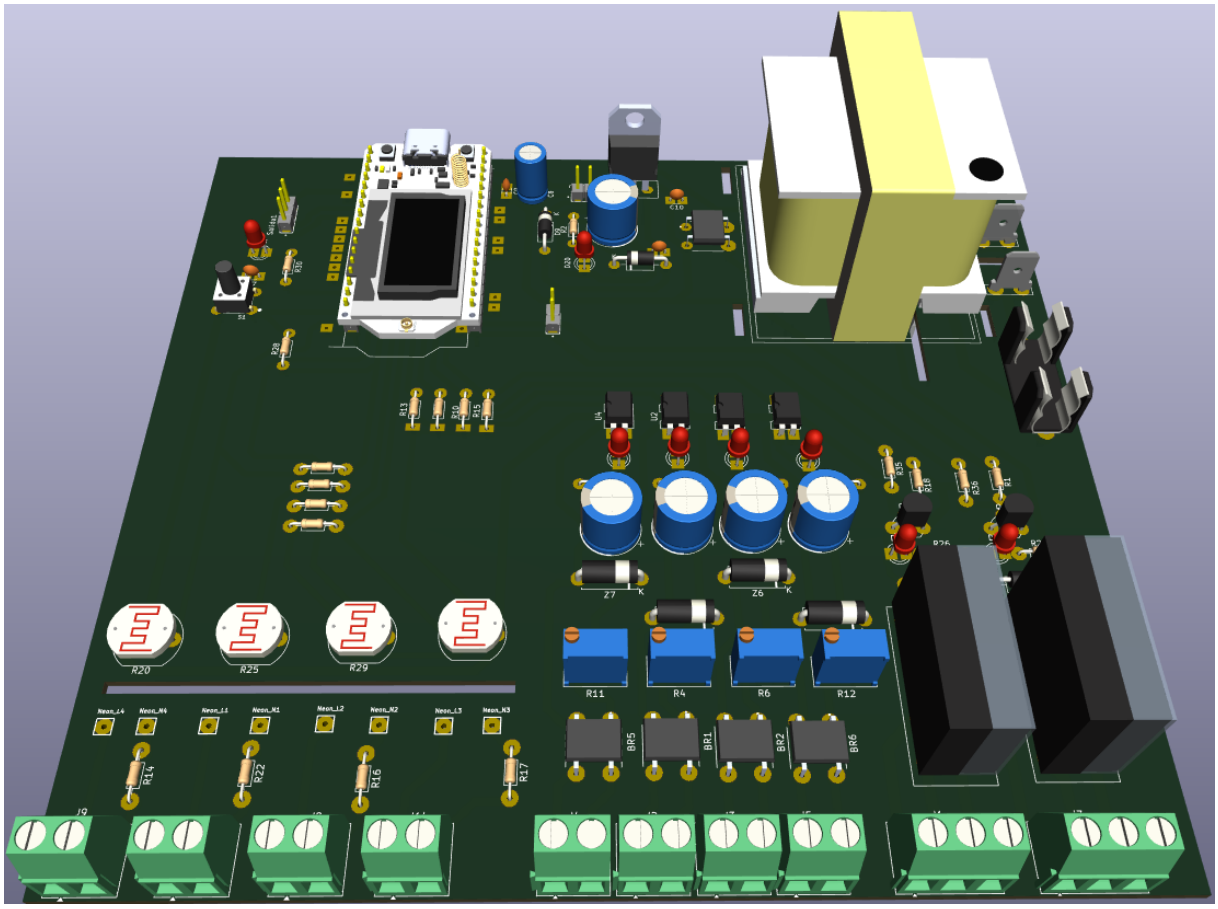

Fig. 12. Modelo 3D del PCB.

4 Conclusiones

El sistema desarrollado permite el monitoreo periódico del estado operativo del alumbrado público mediante un diseño compacto, modular y de bajo costo. La validación experimental de los bloques de detección de corriente y tensión demostró que las señales obtenidas se mantienen dentro de los rangos adecuados para su procesamiento. Estas pruebas confirman la capacidad del prototipo para identificar de manera confiable el encendido y apagado de cada circuito, así como posibles anomalías operativas.

El diseño en PCB integra todos los bloques de adquisición y transmisión en un único dispositivo, lo que evidencia la viabilidad de una solución compacta y escalable. Además, la elección del protocolo LoRa, en combinación con sensores no invasivos, redujo la complejidad de instalación y favoreció el bajo consumo energético.

Si bien los bloques de recepción y el servidor central aún requieren desarrollo, los resultados alcanzados validan el correcto funcionamiento del prototipo transmisor, logrando una medición de tensión y corriente estable dentro del rango requerido. El sistema constituye, por lo tanto, un avance concreto hacia la modernización de la infraestructura de alumbrado público mediante tecnologías IoT de bajo costo, con posibilidad de integración en plataformas municipales de mayor alcance e incluso con herramientas de notificación.

Referencias

[1] https://es.wikipedia.org/wiki/LoRa

[2] https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1148023/ESPRESSIF/ESP32.html

[3]http://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_impreso#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20de%20las%20PCB,el%20formato%20de%20las%20Protoboards.&text=La%20organizaci%C3%B3n%20IPC%20(Institute%20for,Device%20Engineering%20Council%20(JEDEC).

[4] https://heltec.org/

[5] https://es.wikipedia.org/wiki/Transformador_de_corriente

[6] https://eepower.com/resistor-guide/resistor-applications/pull-up-resistor-pull-down-resistor/#

[7] https://www.tecnosalva.com/que-es-y-como-funciona-una-ldr/#:~:text=de%20las%20LDR-,%C2%BFQu%C3%A9%20es%20una%20LDR?,dispositivos%20sensibles%20a%20la%20luz.

[8] https://heltec.org/project/wireless-stick-v3/

[9] https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/82833/FAIRCHILD/LM7805.html

[10] https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/

[11] https://grafana.com/