

Design and Validation of an Autonomous Sensor Node for Smart Public Lighting

Lautaro Bifano¹, Nicolás Zaniratto¹, and Héctor Hugo Mazzeo¹

CODAPLI – Centro de Codiseño Aplicado, Universidad Tecnológica Nacional,
Facultad Regional La Plata, La Plata, Argentina
`{bifanolautaro, nzaniratto, hugo.maz}@frlp.utn.edu.ar`

Abstract. Public lighting accounts for 20%–40% of municipal energy consumption in Latin America, yet most networks still operate without adaptive control or remote monitoring. This paper presents the design, hardware specification, and preliminary experimental validation of an autonomous sensor node for intelligent urban lighting, developed as part of an applied R&D project at a national technological university. Each node integrates an ESP32 microcontroller, a digital LDR luminosity module, a PIR motion sensor, and an autonomous power subsystem based on a Li-ion 18650 cell, a TP4056 charge controller (USB-C), and an MT3608 boost converter. The firmware, written in MicroPython, supports three operating modes (AUTO, FORCE_ON, FORCE_OFF) switchable in real time via MQTT, and implements a heartbeat mechanism for remote telemetry and fault detection. A supervisory platform built on Django, Mosquitto, PostgreSQL, Redis and a Svelte dashboard provides real-time WebSocket updates and full telemetry history. Results confirm reliable event detection, adequate response latency, stable power chain operation, and correct online/offline fault signalling. The system adopts an open-source, modular architecture targeting small-to-medium Argentine municipalities, and is framed within a broader smart-city strategy aligned with the País Digital programme.

Keywords: public lighting · IoT · embedded control · smart cities · energy efficiency · LoRaWAN

Diseño y Validación de un Nodo Sensor Autónomo para Alumbrado Público Inteligente

Abstract. El alumbrado público representa entre el 20 % y el 40 % del consumo eléctrico municipal en América Latina, y la mayoría de las redes operan aún sin control adaptativo ni monitoreo remoto. Este trabajo presenta el diseño, la especificación de hardware y la validación experimental preliminar de un nodo sensor autónomo para iluminación urbana

inteligente, desarrollado en el marco de un proyecto de I+D de la Universidad Tecnológica Nacional. Cada nodo integra un microcontrolador ESP32, un módulo LDR con salida digital, un sensor PIR de movimiento y un subsistema de alimentación autónoma basado en una celda Li-ion 18650, un módulo cargador TP4056 con entrada USB-C y un convertidor elevador MT3608. El firmware, programado en MicroPython, soporta tres modos de operación (AUTO, FORCE_ON, FORCE_OFF) conmutables en tiempo real vía MQTT, e implementa un mecanismo de heartbeat para telemetría remota y detección de fallos. Una plataforma de supervisión construida sobre Django, Mosquitto, PostgreSQL, Redis y un dashboard en Svelte provee actualizaciones en tiempo real por WebSockets e historial completo de telemetría. Los resultados confirman detección confiable de eventos, latencia adecuada, operación estable de la cadena de alimentación y señalización correcta de estado online/offline. El sistema adopta una arquitectura modular de código abierto orientada a municipios argentinos de escala mediana o pequeña, y se enmarca en una estrategia más amplia de ciudad inteligente alineada con el programa País Digital.

Keywords: alumbrado público · IoT · control embebido · ciudades inteligentes · eficiencia energética · LoRaWAN

1 Introducción

La iluminación pública representa entre el 20 % y el 40 % del consumo eléctrico municipal en América Latina [4], y en Argentina las redes de alumbrado consumen aproximadamente un cuarto de la electricidad del sector público local, operando en su mayoría sin mecanismos adaptativos ni plataformas de supervisión remota [6]. Experiencias piloto en ciudades argentinas muestran reducciones significativas de consumo mediante sistemas de control inteligente [5], y estudios regionales confirman el potencial de estas soluciones para municipios de escala mediana [1]. Esta situación representa una oportunidad concreta para incorporar soluciones tecnológicas de bajo costo y código abierto.

El presente trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación y Desarrollo (PID) “Desarrollo de sistema para ahorro de energía en alumbrado público” (LPENPP668) de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, alineado con el modelo de ciudades inteligentes del programa País Digital [7]. El trabajo contribuye además al desarrollo de una tesis de maestría en curso que profundiza los aspectos de arquitectura, escalabilidad y evaluación de impacto energético del sistema. A diferencia de soluciones comerciales que dependen de infraestructura costosa o propietaria, este proyecto promueve la soberanía tecnológica: cada organismo que lo adopte puede administrarlo de forma integral, sin depender de proveedores externos ni licencias privativas.

Este trabajo extiende una versión preliminar presentada en el CACIC 2025 [2], donde se describió la arquitectura general y resultados iniciales de simulación. Las contribuciones nuevas son: (1) especificación completa del hardware con modelos exactos y descripción del subsistema de alimentación autónoma; (2) descripción del firmware con los tres modos MQTT, heartbeat y detección de fallos por *Last Will*; y (3) detalle del stack de supervisión con resultados de validación en prototipo físico.

2 Descripción del Nodo Sensor-Actuador

2.1 Arquitectura general

El sistema adopta una arquitectura en tres capas: (1) capa sensorial, encargada de la captura de variables ambientales; (2) capa de procesamiento local, donde el microcontrolador ejecuta la lógica de control; y (3) capa de supervisión remota, que centraliza datos históricos y alertas mediante un *dashboard* web. Este trabajo se enfoca en las dos primeras capas, correspondientes al nodo físico.

2.2 Componentes del nodo

La Tabla 1 detalla los componentes seleccionados para el nodo. Los criterios de selección priorizaron disponibilidad en el mercado local, bajo costo, documentación técnica abundante y facilidad de mantenimiento.

Table 1. Componentes del nodo sensor.

Componente	Modelo	Función
Microcontrolador	ESP32-WROOM-32	Procesamiento, Wi-Fi, soporte LoRa
Sensor de luminosidad	LDR + LM393	Umbral de luz, salida digital ajustable
Sensor de movimiento	PIR HC-SR501	Detección de presencia
Celda de energía	Li-ion 18650	Alimentación autónoma
Cargador de batería	TP4056 (HW-373 V1.2.1)	Carga Li-ion vía USB-C
Regulador de tensión	MT3608 (HW-045)	Eleva ~ 3.7 V a 5 V
Actuador	Relé electromecánico 5 V	Control de luminaria LED

2.3 Subsistema de alimentación autónoma

La celda 18650 (tensión nominal 3.7 V) se carga mediante el módulo TP4056 con entrada USB-C, y su salida es elevada a 5 V por el convertidor MT3608 para

alimentar el ESP32 de forma estable. Esta arquitectura permite que el nodo opere sin conexión directa a la red eléctrica del poste, simplificando la instalación en columnas sin acometida accesible. En etapas futuras se prevé integrar un panel solar para recarga continua.

2.4 Firmware y modos de operación

El firmware, en MicroPython, implementa tres modos conmutables en tiempo real vía MQTT: **AUTO** (la luminaria responde al LDR de forma autónoma), **FORCE_ON** y **FORCE_OFF** (control forzado desde la plataforma). El nodo publica un *heartbeat* cada 30 segundos con IP y RSSI. Mediante el mecanismo *Last Will* de MQTT, si el dispositivo pierde conexión el broker publica automáticamente **OFFLINE**, sin polling desde el servidor. La comunicación de largo alcance se implementará mediante LoRaWAN [3], tecnología de bajo consumo y amplia cobertura urbana.

2.5 Plataforma de supervisión

La capa de supervisión se despliega con Docker Compose e integra: **Eclipse Mosquitto** (broker MQTT), **Django + DRF** (API REST), **PostgreSQL** (telemetría histórica), **Redis** (mensajería WebSocket), **Node-RED** (flujos de integración) y una interfaz en **Svelte/Tailwind**. El dashboard actualiza estados en tiempo real vía Django Channels, incluye mapa georreferenciado con Leaflet centrado en La Plata, KPIs por grupo y trazabilidad de comandos (**PENDING** → **SENT** → **ACK/ERROR**).

3 Validación Experimental

3.1 Simulación digital (Wokwi)

Se implementó una maqueta digital en Wokwi configurando el ESP32 con sensores PIR y LDR y un LED como sustituto de la luminaria. El firmware ejecuta un bucle que evalúa el modo activo: en modo **AUTO** activa la luminaria cuando el LDR detecta oscuridad; los modos **FORCE_ON** y **FORCE_OFF** ignoran el sensor y aplican el estado indicado directamente. Los cambios de modo se reciben vía MQTT en tiempo real. Las pruebas se ejecutaron bajo condiciones simuladas de tránsito y ciclos día/noche.

3.2 Prototipo de laboratorio

A partir de los resultados de simulación se avanzó en el ensamblado de un prototipo físico con los componentes de la Tabla 1. Las pruebas de banco realizadas hasta la fecha confirman:

- Detección confiable de movimiento con el PIR HC-SR501 en un rango de hasta 7 m y ángulo de 120°.

- Respuesta correcta del módulo LDR ante variaciones de iluminación ambiental, con umbral ajustable por potenciómetro.
- Operación estable de la cadena de alimentación: el TP4056 carga la 18650 desde USB-C y el MT3608 entrega 5 V estables al ESP32 con la batería entre 3.5 V y 4.2 V.
- Tiempos de respuesta (detección → activación de relé) inferiores a 200 ms en condiciones de laboratorio.
- Conmutación correcta entre los tres modos vía MQTT, con publicación inmediata del nuevo estado al broker.
- Heartbeat cada 30 segundos con IP y RSSI; mecanismo *Last Will* marca OFFLINE ante desconexión abrupta.

Quedan pendientes las pruebas de alcance LoRaWAN en exteriores y la validación de consumo energético en ciclos completos.

4 Conclusiones y Trabajo Futuro

Se presenta el diseño y la validación preliminar de un sistema completo de iluminación pública inteligente, compuesto por un nodo sensor autónomo y una plataforma de supervisión de código abierto. Los resultados confirman la viabilidad técnica: detección confiable de eventos, control por modos MQTT, telemetría por heartbeat, detección de fallos por *Last Will* y actualización en tiempo real del dashboard. El código está disponible en GitLab, promoviendo la replicabilidad y la apropiación tecnológica por municipios e instituciones.

El sistema responde a las dimensiones del modelo de ciudades inteligentes [7]: promueve decisiones basadas en datos (gobernanza), reduce el consumo energético y la contaminación lumínica (ambiente), e impulsa la innovación con tecnologías abiertas (competitividad).

Las próximas etapas contemplan: completar la integración LoRa [3], validar el alcance en exteriores, incorporar alimentación solar y ejecutar un despliegue piloto. La tesis de maestría asociada profundizará en algoritmos de control adaptativo y evaluación de impacto energético en campo.

Acknowledgments. Este trabajo se desarrolla en el marco del PID LPENPP668 de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, y del Centro de Codiseño Aplicado (CODAPLI). Los autores agradecen el apoyo institucional del equipo de CODAPLI.

Disclosure of Interests. Los autores declaran no tener conflictos de interés relevantes para el contenido de este artículo.

References

1. Banco Interamericano de Desarrollo: Ciudades inteligentes y sostenibles en América Latina: retos y oportunidades. Tech. rep., BID, Washington, D.C. (2021)

2. Bifano, L., Aguirre, F.: Diseño y validación preliminar de un sistema abierto de iluminación pública para ciudades inteligentes. In: Actas del XXXI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2025). Viedma, Argentina (Oct 2025)
3. Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., Zorzi, M.: Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications* **23**(5), 60–67 (2016). <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>
4. CEPAL: Eficiencia energética en servicios municipales de América Latina. Tech. rep., Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile (2022)
5. Olavarria, J., Pérez, L., Gómez, M.: Implementación piloto de alumbrado público inteligente en ciudades intermedias argentinas. *Revista de Ingeniería Urbana* **8**(1), 55–68 (2023)
6. Secretaría de Energía de la Nación: Diagnóstico de la iluminación pública en Argentina. Tech. rep., Ministerio de Economía, Buenos Aires, Argentina (2022)
7. Secretaría de Modernización: Programa País Digital: modelo de planificación estratégica para ciudades inteligentes (2022), disponible en: <https://www.argentina.gob.ar>. Accedido: marzo 2026