
Sistema de Iluminación Pública Inteligente de Código Abierto: Diseño, Implementación y Validación Experimental de un Sistema IoT Adaptativo



Lautaro Bifano

Centro de Codiseño Aplicado (CODAPLI) —
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La
Plata, Argentina
bifanolautaro@frlp.utn.edu.ar

Hernán Mazzeo

Centro de Codiseño Aplicado (CODAPLI) —
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La
Plata, Argentina

Nicolás; Zaniratto

Centro de Codiseño Aplicado (CODAPLI) —
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La
Plata, Argentina

Federico Aguirre

Centro de Codiseño Aplicado (CODAPLI) —
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La
Plata, Argentina

Ingenio Tecnológico

vol. 8, e89, 2026
Universidad Tecnológica Nacional, Argentina
ISSN-E: 2618-4931
Periodicidad: Frecuencia continua
ingenio@frlp.utn.edu.ar

Recepción: 28 mayo 2026
Aprobación: 27 agosto 2026

URL: <https://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2665532024/>

Resumen: El alumbrado público representa entre el 20 % y el 40 % del consumo eléctrico municipal en América Latina (Carvajal et al., 2024) y aproximadamente el 25 % del gasto eléctrico del sector público argentino (Secretaría de Energía de la Nación, 2022). La mayoría de las redes operan sin control adaptativo ni monitoreo remoto. Este artículo presenta el diseño, la implementación y la validación experimental de un sistema de iluminación urbana inteligente de código abierto, desarrollado en el marco del PID LPENPP668 (UTN - CODAPLI). El sistema integra nodos ESP32 con sensores PIR y LDR, firmware MicroPython con cuatro niveles de operación, comunicación MQTT sobre Wi-Fi y una plataforma de supervisión en tiempo real. Se comparan tres estrategias de transmisión —periódica, por eventos y adaptativa por reglas— bajo condiciones controladas. El tráfico de red se redujo un 89,1 % y un 93,1 % respecto de la transmisión periódica, manteniendo un comportamiento funcional equivalente. La dimensión energética se aborda mediante un indicador funcional derivado de los tiempos por nivel, que verifica dicha equivalencia pero no constituye una medición eléctrica directa. El trabajo aporta evidencia experimental sobre el impacto de las estrategias de comunicación en sistemas IoT de alumbrado, una dimensión frecuentemente ignorada en la literatura.

Palabras clave: iluminación pública inteligente, IoT, ESP32, MQTT, estrategias de transmisión, eficiencia en el uso de la red, ciudades inteligentes, redes de sensores inalámbricos, código abierto, Argentina.

Abstract: Public lighting accounts for 20–40% of municipal electricity consumption in Latin America (Carvajal et al., 2024) and approximately 25% of Argentine public sector electricity expenditure (Secretaría de Energía de la Nación, 2022). Most networks operate without adaptive control or remote monitoring. This article presents the design, implementation and experimental validation of an open-source smart urban lighting system, developed within the framework of PID LPENPP668 (UTN - CODAPLI). The system integrates ESP32 nodes with PIR and LDR sensors, MicroPython firmware with four operating levels, MQTT communication over Wi-Fi, and a real-time supervisory platform. Three transmission strategies are compared —

periodic, event-driven, and rule-based adaptive— under controlled conditions. Network traffic was reduced by 89.1% and 93.1% relative to periodic transmission, while maintaining equivalent functional behavior. The energy dimension is addressed through a functional indicator derived from accumulated time per level, which verifies this equivalence but does not constitute a direct electrical measurement. The work provides experimental evidence on the impact of communication strategies in IoT lighting systems, a dimension frequently overlooked in the literature.

Keywords: smart street lighting, IoT, ESP32, MQTT, transmission strategies, network efficiency, smart cities, wireless sensor networks, open source, Argentina.

Introducción

El alumbrado público es uno de los servicios urbanos con mayor impacto en el consumo energético municipal. En América Latina representa entre el 20 % y el 40 % del consumo eléctrico de los gobiernos locales (Carvajal et al., 2024; IEA, 2023), mientras que en Argentina ronda el 25 % del gasto eléctrico del sector público (Secretaría de Energía de la Nación, 2022). La mayoría de estas redes operan sin mecanismos adaptativos ni plataformas de supervisión remota: las luminarias encienden y apagan por temporizador, sin considerar la demanda real del entorno (Mahoor et al., 2020).

En el paradigma de las ciudades inteligentes, el alumbrado urbano combina requerimientos de eficiencia energética, seguridad pública, disponibilidad del servicio y capacidad de monitoreo (Bouskela et al., 2016; Zanella et al., 2014). La incorporación de sensores de movimiento y luminosidad permite adaptar dinámicamente el comportamiento de las luminarias en función de las condiciones reales del entorno (Khemakhem y Krichen, 2024). Sin embargo, un aspecto frecuentemente ignorado en estos sistemas es la dimensión comunicacional: en redes de sensores distribuidas, las decisiones sobre cuándo y cómo transmitir datos tienen un impacto directo sobre el volumen de tráfico generado y sobre el consumo del propio nodo, dado que la transmisión es una de las operaciones de mayor costo energético en dispositivos IoT (Raza et al., 2017; Wang et al., 2019).

El presente artículo aborda esa dimensión de manera explícita. Se describe el diseño, la implementación y la validación experimental de un sistema de iluminación pública inteligente de código abierto, desarrollado en el marco del PID LPENPP668 de la UTN Facultad Regional La Plata dentro del Centro de Codiseño Aplicado (CODAPLI). El trabajo forma parte de una tesis de maestría en Redes de Datos cuyo eje central es el análisis del impacto de distintas estrategias de transmisión en sistemas IoT de iluminación urbana. El objetivo específico de esta etapa es cuantificar el efecto de la estrategia de transmisión sobre el volumen de tráfico de red, manteniendo constante la política de control lumínico y verificando que la reducción de tráfico no degrade el servicio de iluminación entregado. La cuantificación del consumo eléctrico mediante instrumentación física corresponde a una etapa posterior del PID LPENPP668 y se detalla en la sección de limitaciones. A diferencia de soluciones comerciales que dependen de infraestructura costosa o propietaria, el sistema propuesto adopta una arquitectura modular y replicable, orientada a municipios argentinos con recursos limitados.

Marco Teórico

Internet de las Cosas e infraestructura urbana

El concepto de Internet de las Cosas (IoT) hace referencia a la interconexión de dispositivos físicos capaces de recolectar, procesar y transmitir información a través de redes de comunicación (Al-Fuqaha et al., 2015; Lin et al., 2017). En el contexto urbano, IoT se ha consolidado como herramienta para el desarrollo de ciudades inteligentes, con aplicaciones en transporte, gestión de residuos, monitoreo ambiental e iluminación pública (Zanella et al., 2014; Liu et al., 2020). El alumbrado inteligente es particularmente atractivo como caso de aplicación por su alta penetración —toda ciudad dispone de infraestructura de alumbrado— y su potencial de ahorro energético significativo.

Uno de los desafíos principales en sistemas IoT es la gestión eficiente de los recursos disponibles, especialmente en lo que respecta al consumo energético y al uso de la red. Dado que muchos dispositivos operan con limitaciones de energía y conectividad, resulta fundamental diseñar arquitecturas que minimicen el uso de estos recursos sin comprometer la funcionalidad del sistema (Shafique et al., 2020).

Redes de Sensores Inalámbricos (WSN)

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) constituyen una categoría particular dentro del ecosistema IoT, caracterizada por la utilización de múltiples nodos distribuidos que cooperan para monitorear un entorno (Akyildiz et al., 2002). Cada nodo integra un microcontrolador, sensores, un módulo de comunicación y una fuente de energía. La eficiencia energética es uno de los aspectos más críticos en este tipo de redes, dado que los nodos suelen operar con baterías o fuentes limitadas.

Desde el punto de vista energético, la transmisión de datos es una de las operaciones más costosas en nodos IoT (Raza et al., 2017). Por ese motivo, factores como la frecuencia de transmisión, la topología de la red y el protocolo de comunicación tienen un impacto directo sobre la autonomía del sistema. La reducción del tráfico de red mediante esquemas adaptativos es una línea de investigación activa en este campo (Wang et al., 2019).

Tecnologías de comunicación: Wi-Fi y LoRa

En sistemas IoT de iluminación urbana se consideran principalmente dos tecnologías: Wi-Fi y LoRa. Wi-Fi, basado en la familia IEEE 802.11, ofrece alta tasa de transferencia e integración inmediata con redes existentes, pero con un consumo energético relativamente elevado (Naik, 2017). En el hardware empleado — ESP32 — el soporte es para las variantes 802.11b/g/n en 2,4 GHz.

LoRa (Long Range) es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para aplicaciones de bajo consumo y largo alcance. Opera en bandas no licenciadas (868 MHz en Europa, 915 MHz en América) usando modulación por espectro ensanchado de chirp. El spreading factor permite ajustar el compromiso entre tasa de transmisión y alcance: a mayor valor, mayor alcance pero menor tasa de datos (Adelantado et al., 2017; Augustin et al., 2016). Para los ensayos comparativos con LoRa planificados en etapas futuras se prevé utilizar placas Heltec WiFi LoRa con transceptor SX127x (Heltec Automation, s.f.). La Tabla 1 resume las características comparativas de ambas tecnologías.

Tabla 1
Comparación entre tecnologías Wi-Fi y LoRa.

Frecuencia	2,4 GHz	433 / 868 / 915 MHz
Alcance típico	50–100 m	2–15 km
Tasa de datos	Mbps	kbps
Consumo energético	Alto	Bajo
Integración nativa en ESP32	Sí (802.11b/g/n)	No (requiere módulo externo)

Nota. Elaboración propia a partir de Naik (2017), Adelantado et al. (2017) y Augustin et al. (2016). Los valores de alcance corresponden a condiciones típicas de línea de vista.

Protocolo MQTT y mecanismos de supervisión

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo ligero basado en el modelo publicación/suscripción, ampliamente adoptado en aplicaciones IoT por su bajo overhead y eficiencia en entornos con recursos limitados (OASIS, 2014; Naik, 2017). Los dispositivos publican mensajes en tópicos, mientras que otros componentes del sistema se suscriben para recibirlos. Este desacoplamiento facilita la integración con plataformas de monitoreo y la escalabilidad del sistema.

Dos mecanismos del protocolo resultan especialmente relevantes para este trabajo. El mecanismo de Last Will permite configurar un mensaje que el broker publica automáticamente ante una desconexión abrupta del cliente, sin necesidad de polling desde el servidor — lo que habilita la detección automática de fallos en nodos remotos. El heartbeat, implementado a nivel de aplicación, mantiene visibilidad sobre el estado del nodo incluso cuando la estrategia de transmisión funcional es muy selectiva.

Estrategias de transmisión en redes de sensores

La transmisión periódica es el enfoque más simple: el nodo publica telemetría en intervalos fijos independientemente de cambios en el estado del sistema. Tiene la ventaja de la sencillez y la uniformidad de la instrumentación, pero puede generar comunicaciones redundantes durante períodos estables (Wang et al., 2019). La transmisión por eventos publica únicamente ante cambios relevantes, reduciendo el volumen de mensajes especialmente cuando el sistema permanece estable durante intervalos prolongados.

Los enfoques adaptativos van un paso más allá: organizan la telemetría en función del comportamiento esperado o del estado operativo del sistema, no solo de variaciones instantáneas de los sensores. Trabajos recientes han explorado el uso de información contextual, estados operativos y técnicas de estimación para reducir comunicaciones innecesarias sin perder capacidad de seguimiento del sistema (Chen et al., 2019). Este trabajo se inscribe en esa línea, proponiendo una estrategia adaptativa basada en reglas y estados operativos como paso intermedio hacia enfoques predictivos de mayor complejidad.

Antecedentes y posicionamiento del trabajo

Los sistemas de iluminación urbana inteligente han sido ampliamente estudiados en la literatura reciente. Trabajos como los de Mahoor et al. (2020) y Khemakhem y Krichen (2024) revisan el estado del arte en control de luminarias inteligentes, destacando el potencial de sensores PIR y LDR para implementar lógica adaptativa. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se concentra en la lógica de encendido y regulación, prestando menor atención al impacto de la infraestructura de comunicación sobre la eficiencia global.

En el plano de tecnologías de comunicación, LoRaWAN se ha consolidado como alternativa para redes IoT de gran escala (Mekki et al., 2019; Adelantado et al., 2017; Centenaro et al., 2016). Estudios comparativos entre Wi-Fi y LoRa destacan la importancia de seleccionar la tecnología según los requerimientos de cada caso (Naik, 2017). La presente investigación adopta Wi-Fi en la primera etapa por razones metodológicas —la plataforma ya estaba validada sobre esa tecnología— y contempla la comparación con LoRa en etapas posteriores.

En cuanto a plataformas de gestión IoT, el ecosistema dispone de soluciones maduras y ampliamente adoptadas —ThingsBoard (s.f.) y Grafana Labs (s.f.) para telemetría y visualización, ChirpStack (s.f.) para gestión de redes LoRaWAN y Node-RED Project (s.f.) para flujos de integración—, algunas de las cuales se integran efectivamente en la plataforma desarrollada. El diseño experimental de este trabajo requiere, además de las funcionalidades de telemetría que estas herramientas proveen, que cada registro quede trazado simultáneamente por estrategia de transmisión, política de control, nivel lógico y estado operativo del nodo, de modo que cada mensaje resulte atribuible a la condición experimental que lo originó. Para garantizar esa trazabilidad de punta a punta y mantener el control del entorno de ensayo se optó por desarrollar una arquitectura propia, que incorpora Node-RED y Mosquitto como componentes y agrega sobre ellos el modelo de datos experimental.

La línea de reducción de tráfico en redes de sensores ha sido explorada por trabajos como el de Wang et al. (2019), que propone algoritmos de enrutamiento eficientes. El uso de enfoques predictivos ha sido estudiado en contextos de redes e IoT (Chen et al., 2019). Sin embargo, la integración de estrategias de comunicación con el control lumínico en sistemas de alumbrado urbano no ha sido abordada de manera experimental en la literatura local, lo que representa el espacio de contribución de este trabajo.

Desarrollo

Arquitectura general

El sistema se organiza en tres capas funcionales. La capa sensorial captura variables ambientales mediante un PIR HC-SR501 y un módulo LDR con comparador LM393. La capa de procesamiento local ejecuta la lógica de control en un ESP32-WROOM-32 con firmware MicroPython. La capa de supervisión remota centraliza la telemetría y expone una interfaz web en tiempo real.

La plataforma de supervisión se despliega mediante Docker Compose e integra: Eclipse Mosquitto (broker MQTT); Django con Django REST Framework (API REST y persistencia); PostgreSQL (telemetría histórica); Redis (mensajería WebSocket para actualizaciones en tiempo real); Node-RED (flujos de integración); y un dashboard en Svelte/Tailwind con mapas Leaflet georreferenciados. La trazabilidad de comandos incluye los estados PENDING, SENT, ACK y ERROR.

Hardware del nodo sensor

La Tabla 2 detalla los componentes seleccionados. Los criterios de selección priorizaron disponibilidad en el mercado local argentino, bajo costo unitario y documentación técnica abundante.

Tabla 2
Componentes del nodo sensor.

Microcontrolador	ESP32-WROOM-32	Procesamiento local, Wi-Fi, soporte LoRa
Sensor de movimiento	PIR HC-SR501	Detección de presencia hasta 7 m, ángulo 120°

Sensor de luminosidad	Módulo LDR + LM393	Umbral ajustable por potenciómetro
Celda de energía	Li-ion 18650	Alimentación autónoma (3,7 V nominal)
Cargador de batería	TP4056 HW-373 (USB-C)	Carga Li-ion con protección integrada
Regulador de tensión	MT3608 HW-045	Boost converter 3,7 V $\rightarrow$ 5 V estables
Actuador	Relé electromecánico 5 V	Control de luminaria LED con aislamiento galvánico

Nota. Elaboración propia. Los criterios de selección priorizaron disponibilidad en el mercado local argentino, bajo costo unitario y documentación técnica disponible.

El subsistema de alimentación autónoma es uno de los aspectos más relevantes del diseño: la celda 18650 se carga mediante el TP4056 con entrada USB-C, y su tensión es elevada a 5 V por el 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 y habilitando su uso en columnas sin acometida accesible.

En la Figura 1 podemos ver una fotografía del prototipo experimental ensamblado en laboratorio. Se observan, de izquierda a derecha: el portapilas con celda Li-ion 18650, los módulos de carga TP4056 y regulación MT3608 montados sobre la protoboard, el módulo LDR con comparador LM393 (inferior izquierdo), el microcontrolador ESP32-WROOM-32 y, en el extremo derecho, el sensor PIR HC-SR501. La distribución del cableado refleja la arquitectura de alimentación autónoma descrita en la Tabla 2.

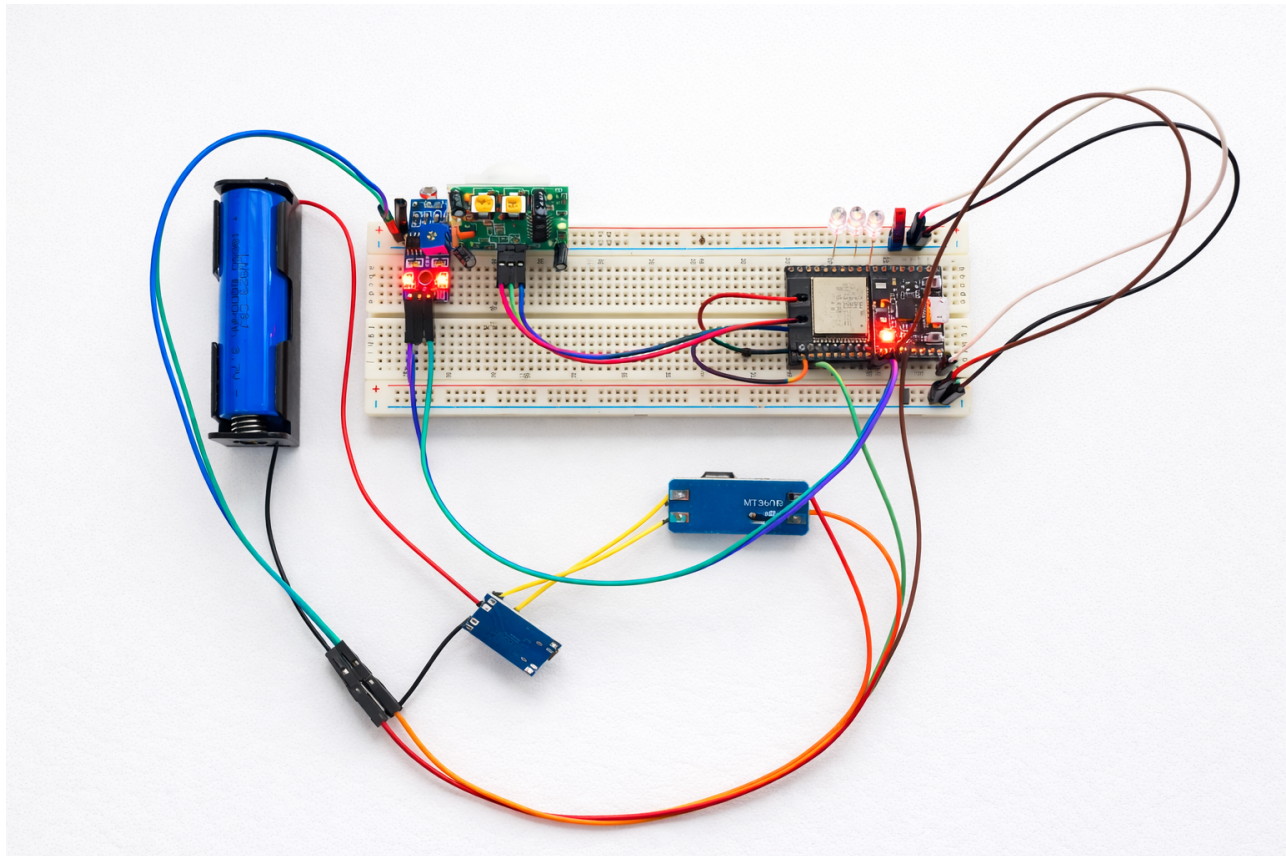


Figura 1
Fotografía general del nodo experimental armado

Firmware y niveles de operación

El firmware implementa tres modos conmutables en tiempo real vía MQTT: AUTO (respuesta autónoma a los sensores), FORCE_ON y FORCE_OFF (control forzado desde la plataforma). A diferencia de un esquema binario ON/OFF, el sistema opera con cuatro niveles lógicos de intensidad que permiten aproximar el comportamiento de una luminaria regulable:

- Nivel 0: luminaria apagada en condición diurna.
- Nivel 50: reposo nocturno sin detección de movimiento.
- Nivel 75: etapa de post-evento, transición hacia el reposo.
- Nivel 100: máxima intensidad ante detección de movimiento.

En la plataforma de pruebas, los niveles se representan mediante tres LEDs: uno encendido corresponde al 50 %, dos al 75 % y los tres al 100 % de intensidad. Esto permite evaluar el sistema no solo en términos de encendido/apagado sino también en tiempos de permanencia en distintos niveles. El heartbeat publica IP y RSSI cada 30 segundos; el mecanismo Last Will publica OFFLINE ante desconexiones abruptas, sin polling desde el servidor.

Estrategias de transmisión evaluadas

Se comparan tres estrategias sobre la misma plataforma de hardware y bajo la misma política de control BASE:

E1 — Transmisión periódica: el nodo publica telemetría cada 5 segundos fijos, independientemente de cambios en el estado. Simple de implementar, pero genera tráfico redundante durante períodos de estabilidad del sistema.

E2 — Transmisión por eventos: la publicación se produce únicamente ante cambios relevantes en las variables observadas o en el estado lógico del sistema. El heartbeat se mantiene como canal periódico separado para conservar visibilidad sobre el nodo.

E3 — Transmisión adaptativa por reglas: la telemetría se reorganiza en torno a estados operativos del sistema —DAY, IDLE, ACTIVE, POST— en lugar de publicar variaciones crudas de sensores. En este esquema desaparecen los tópicos sensor/luz y sensor/mov del flujo funcional ordinario, siendo reemplazados por resúmenes en el tópico metricas, que incluye campos como op_state (estado operativo) y hits_pir (contador de activaciones detectables del PIR).

Tabla 3
Comparación de estrategias de transmisión de datos.

E1 Periódica	Envío fijo cada 5 s	Simple, uniforme	Alto tráfico redundante
E2 Por eventos	Solo ante cambios detectados	Bajo tráfico	Tráfico variable
E3 Adaptativa	Basada en estados operativos	Semántica rica, mínimo tráfico	Mayor complejidad

Nota. Elaboración propia. Las tres estrategias se evaluaron sobre la misma plataforma de hardware y bajo la política de control BASE.

Metodología

Enfoque general

La investigación adopta un enfoque experimental aplicado, orientado al análisis de un sistema real desde la perspectiva de la comunicación y del control. A diferencia de trabajos puramente teóricos o basados en simulación, este trabajo se apoya en una plataforma concreta desplegada en laboratorio, sobre la cual se ejecutaron ensayos controlados para obtener evidencia cuantitativa comparativa entre las tres estrategias.

La lógica del trabajo es incremental. En la primera etapa —la que se reporta en este artículo— se evalúan las estrategias de transmisión sobre una política de control BASE, manteniendo fija la tecnología de comunicación (Wi-Fi) y concentrando el análisis en el comportamiento de la red y del nodo. En etapas posteriores el diseño se amplía hacia políticas de control contextual con horarios astronómicos (Bloque 2) y comparaciones con LoRaWAN (Bloque 3).

Previo al ensamblado del prototipo físico, se utilizó el entorno de simulación Wokwi para validar el comportamiento lógico del firmware y depurar el diseño del circuito. Como muestra la Figura 2, la simulación reproduce el esquema de conexiones entre el ESP32, el módulo LDR con comparador LM393, el sensor PIR HC-SR501 y el LED que representa la luminaria. Las simulaciones no reemplazan la experimentación real, pero permitieron consolidar el diseño antes de pasar a pruebas sobre hardware.

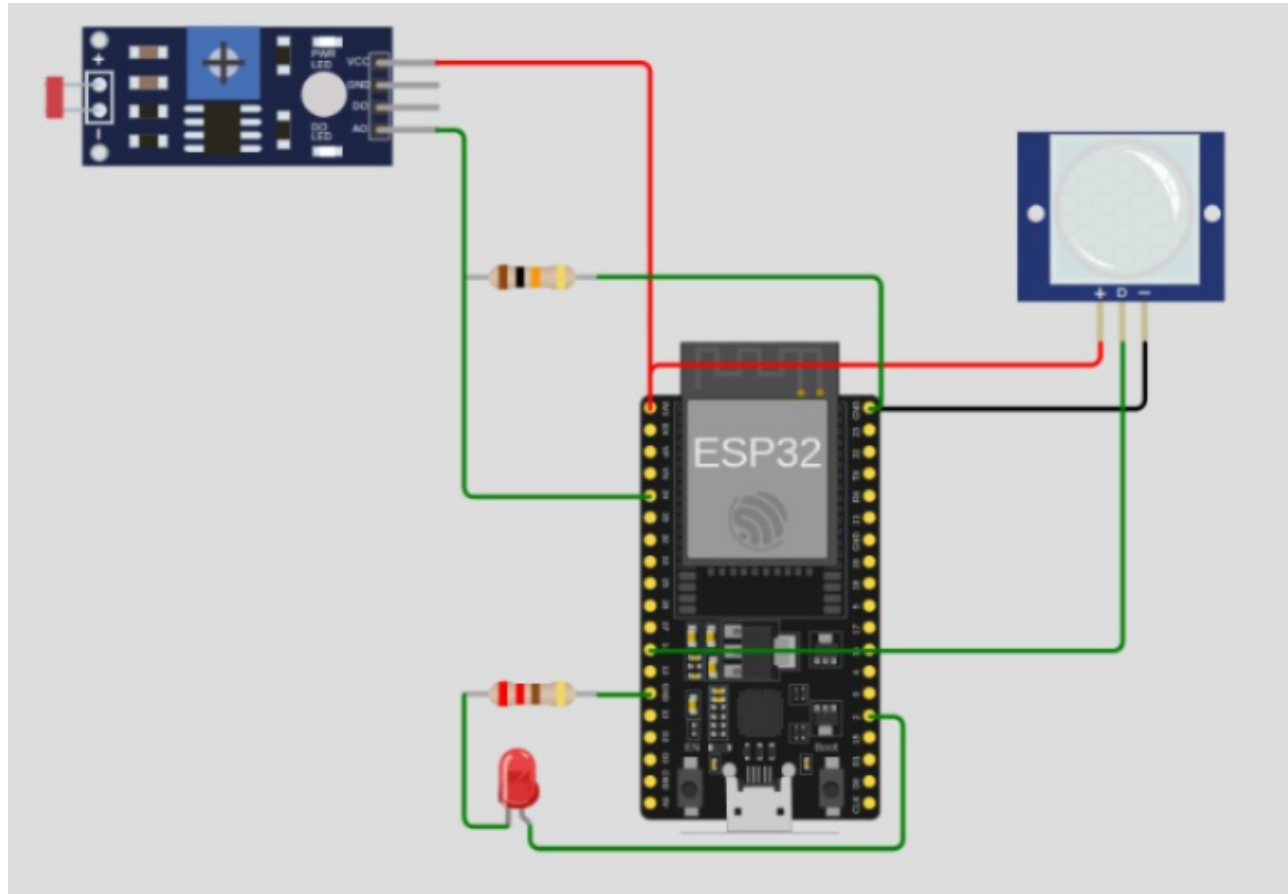


Figura 2:
Simulación del nodo IoT en entorno Wokwi.

Variables del experimento

El diseño experimental distingue tres tipos de variables. Las variables independientes principales son: (1) la estrategia de transmisión —periódica, por eventos y adaptativa por reglas—; (2) la política de control —BASE en esta etapa—; (3) la tecnología de comunicación —Wi-Fi en esta etapa. Las variables dependientes incluyen: cantidad total de mensajes, mensajes por tópico, secuencia de niveles lógicos, tiempos acumulados por nivel y energía lumínica equivalente. Las variables de control —nodo físico, backend, broker, red, guion temporal, intervalo de heartbeat— permanecen constantes entre ensayos, garantizando que las diferencias observadas sean atribuibles a la estrategia evaluada.

Protocolo de ensayo

Cada experimento siguió un guion de aproximadamente 15 minutos organizado en cinco fases consecutivas:

- Fase A — Día sin movimiento: sensor de luz en condición diurna, sin actividad PIR. Nivel esperado: 0 (luminaria apagada).
- Fase B — Noche sin movimiento: transición a condición nocturna. Nivel esperado: 50 (reposo).
- Fase C — Noche con movimiento intermitente: eventos de movimiento manual cada 20–30 s. Nivel esperado: 100 ante cada evento.
- Fase D — Post-evento: cese del movimiento. Verificación de transición nivel 75 → 50.
- Fase E — Vuelta a día: retorno a condición diurna, nivel 0, estabilización del nodo.

Además del CSV exportado por el backend, en cada ensayo se registraron notas manuales, capturas del dashboard y el momento exacto de cada cambio de fase. Esta documentación complementaria facilita la interpretación de anomalías y fortalece la trazabilidad del experimento.

Métricas de análisis

Las métricas consideradas se organizan en tres dimensiones. En comunicación: cantidad total de mensajes, mensajes por tópico, heartbeats, volumen relativo de tráfico entre estrategias. En comportamiento funcional: secuencia de niveles lógicos, tiempos acumulados en niveles 0/50/75/100 y consistencia con las fases del ensayo. En comportamiento lumínico: dado que las tres estrategias operan bajo la misma política de control (BASE), el comportamiento esperado de la luminaria es idéntico entre ellas. Para verificar esa equivalencia se definió un indicador funcional de energía lumínica equivalente (E_{eq}), calculado a partir de los tiempos acumulados en cada nivel de intensidad según la expresión

$$E_{eq} = (0 \cdot t_0 + 50 \cdot t_{50} + 75 \cdot t_{75} + 100 \cdot t_{100}) / 3600 \text{ [Wh}_{eq}]$$

donde los coeficientes representan la potencia nominal asociada a cada nivel para una luminaria teórica de 100 W. Corresponde precisar su alcance: E_{eq} no constituye una medición eléctrica y no debe interpretarse como consumo real. Supone una relación lineal entre nivel lógico y potencia entregada —supuesto que no se verifica exactamente en drivers LED regulables por PWM—, no contempla las pérdidas del driver ni el factor de potencia, y no incluye el consumo del propio nodo. Su función en este diseño es la de una **variable de verificación**: permite comprobar que la reducción de tráfico obtenida por E2 y E3 no se logró a costa de degradar el servicio lumínico entregado.

Resultados

Volumen de mensajes

La Tabla 4 resume los resultados de tráfico. En E1, los 2.630 mensajes del tópico log (78 % del total) corresponden a registros de depuración publicados por MQTT y se excluyen del conteo funcional. En E2 y E3 se excluyen los heartbeats del cómputo funcional.

Tabla 4
Volumen de mensajes por estrategia de transmisión.

E1 — PERIODIC	3.357	727	—
E2 — EVENT	109	79	↓ 89,1 %
E3 — ADAPTIVE	81	50	↓ 93,1 %

Elaboración propia a partir de los registros exportados por el backend.

Nota. Los mensajes funcionales excluyen el tópico log en E1 (registros de depuración) y los heartbeats en E2 y E3.

E3 registra además una reducción del 36,7 % en mensajes funcionales respecto de E2 y del 25,7 % en términos totales incluyendo heartbeat. El intervalo promedio entre mensajes funcionales en E1 es de 5,0 s (fijo); en E2, de 33,64 s (promedio estadístico de momentos con cambios detectados); en E3, los intervalos son más variables y asociados a cambios de estado operativo.

Distribución por tópicos

En E1, el 78 % del volumen corresponde al tópico log. En E2, sobre un total de 109 mensajes, la telemetría se distribuye entre hb 30 (27,5 %), sensor/luz 20 (18,3 %), sensor/mov 20 (18,3 %), nivel 20 (18,3 %) y metricas 19 (17,4 %). En E3, la representación del estado del sistema se apoya en hb (38 %), metricas (36 %), nivel (22 %) y estado (4 %), desapareciendo los tópicos de sensores crudos. Los registros de metricas en E3 incluyen los estados operativos DAY (2 ocurrencias), IDLE (5), ACTIVE (16) y POST (6), consistentes con el guion del ensayo. Esta redistribución es metodológicamente central: E3 no solo transmite menos, sino que transmite distinto.

Verificación de equivalencia funcional

Tabla 5
Tiempos acumulados por nivel, energía lumínica equivalente y potencia equivalente media.

Experimento	Duración total (s)	Nivel 0 (s / %)	Nivel 50 (s / %)	Nivel 75 (s / %)	Nivel 100 (s / %)	E_eq (Wh_eq)	P_eq media (W_eq)
E1 — PERIODIC	990,01	390,27 / 39,4	279,87 / 28,3	119,83 / 12,1	200,04 / 20,2	11,94	43,4

E2 — EVENT	793,23	187,78 / 23,7	351,88 / 44,4	75,07 / 9,5	178,50 / 22,5	11,41	51,8
---------------	--------	------------------	------------------	----------------	------------------	-------	------

E3 — ADAPTIVE	916,31	277,88 / 30,3	359,62 / 39,2	83,78 / 9,1	195,03 / 21,3	12,16	47,8
------------------	--------	------------------	------------------	----------------	------------------	-------	------

Elaboración propia a partir de los registros exportados por el backend.

E_{eq} es un indicador funcional derivado de los tiempos de permanencia por nivel para una luminaria teórica de 100 W; no constituye una medición eléctrica. $P_{eq} media = E_{eq} \cdot 3600 / \text{duración total}$.

Los ensayos no tuvieron duración idéntica (793 a 990 s), por lo que la comparación de valores absolutos de E_{eq} puede inducir a error. Normalizando por la duración total, la potencia equivalente media difiere hasta un 19 % entre E1 y E2. Esa diferencia se explica por la proporción de tiempo transcurrida en la fase diurna — nivel 0, de aporte nulo—, que fue del 39,4 % en E1 y del 23,7 % en E2 como consecuencia de la ejecución manual del guion de ensayo, y no por la estrategia de transmisión evaluada. Al observar la fracción de tiempo en nivel 100, asociada a la detección de movimiento y por lo tanto sensible al comportamiento del control, los tres ensayos se mantienen en un rango estrecho (20,2 %, 22,5 % y 21,3 %), lo que sostiene la equivalencia funcional entre estrategias. En ensayos futuros el guion se ejecutará con temporización automatizada a fin de eliminar esta fuente de variabilidad.

Discusión

El resultado más relevante del bloque experimental es la confirmación empírica de que la estrategia de transmisión influye de manera significativa sobre el tráfico de red, mientras que el comportamiento lumínico permanece equivalente bajo una misma política de control, tal como era esperable por diseño. El bloque BASE debe leerse, por lo tanto, principalmente como una validación comunicacional: la comunicación es una dimensión de diseño con impacto concreto y medible. Un sistema puede ser razonable desde el punto de vista del control lumínico y, al mismo tiempo, ineficiente desde la perspectiva de la red.

La comparación entre E2 y E3 muestra que no toda estrategia no periódica es equivalente. La transmisión por eventos ya produce una mejora muy significativa respecto del envío periódico, pero una reorganización basada en estados operativos reduce aún más el tráfico y, además, enriquece la semántica de la telemetría. En E3 el sistema comunica "cómo está operando" en lugar de "qué leyó el sensor", lo que resulta más útil para la supervisión a nivel de sistema y constituye un paso metodológico hacia enfoques contextuales o predictivos de mayor complejidad (Chen et al., 2019).

En E1, la publicación de logs por MQTT contaminó el 78 % del tráfico total. Este artefacto fue identificado y la publicación de logs se desactivará en ensayos futuros para obtener comparaciones más limpias. En E3, el ajuste del retardo del sensor PIR puede haber influido en los tiempos de nivel 100; una corrida adicional de E2 con la misma configuración permitirá aislar ese efecto.

Desde el punto de vista tecnológico, la arquitectura propia desarrollada ofrece ventajas concretas respecto de plataformas genéricas: control experimental de punta a punta, trazabilidad por estrategia y política, y representación visual adaptada a los conceptos del experimento.

Limitaciones del estudio

Corresponde explicitar el alcance de la evidencia presentada.

En primer lugar, el comportamiento lumínico se caracteriza mediante un indicador funcional derivado y no mediante medición eléctrica. Las afirmaciones del trabajo sobre eficiencia refieren, en consecuencia, al uso de la red y no al consumo eléctrico: lo que se sostiene es que la estrategia de transmisión reduce el tráfico sin degradar el servicio lumínico, y no que reduzca el consumo de la luminaria. Bajo una misma política de control, de hecho, no cabría esperar que lo hiciera.

En segundo lugar, y de manera relacionada, el efecto energético atribuible a la estrategia de transmisión no se localiza en la luminaria sino en el propio nodo. Siendo la transmisión una de las operaciones de mayor costo energético en dispositivos IoT (Raza et al., 2017), una reducción del 93,1 % en el número de mensajes debería traducirse en una disminución del tiempo de radio activa y, con ello, del consumo del nodo. Cuantificar esa relación excede el alcance de esta etapa y constituye un objetivo específico de la continuidad del PID LPENPP668, para la cual se prevé instrumentar el nodo con sensores de corriente de alta resolución (INA219/INA226) sincronizados con el registro de telemetría, de modo de establecer la correspondencia entre número de mensajes transmitidos, tiempo de radio activa y consumo efectivo. La caracterización eléctrica de la luminaria mediante analizador de calidad de energía se abordará en la misma etapa.

En tercer lugar, los ensayos se realizaron en condiciones de laboratorio, con un único nodo, estimulación manual de los sensores y duraciones no exactamente iguales entre corridas. La validación en escenario urbano real —con múltiples nodos, condiciones ambientales no controladas y automatización del guion temporal— forma parte de las etapas previstas del proyecto.

Finalmente, la publicación de registros de depuración por MQTT en E1 introdujo un artefacto que representó el 78 % del tráfico total de esa corrida. Si bien fue aislado del cómputo funcional, su presencia recomienda repetir E1 con dicha publicación desactivada antes de extrapolar los valores absolutos de tráfico periódico.

Conclusiones

Este trabajo presentó el diseño, la implementación y la validación experimental de un sistema de iluminación pública inteligente de código abierto orientado a municipios argentinos con recursos limitados. El sistema integra un nodo sensor autónomo basado en ESP32, firmware en MicroPython con cuatro niveles de operación, comunicación MQTT sobre Wi-Fi y una plataforma completa de supervisión en tiempo real.

Los resultados del bloque experimental BASE confirman que la estrategia de transmisión tiene un impacto directo y medible sobre el tráfico de red: la estrategia adaptativa por reglas redujo el tráfico funcional en un 93,1 % respecto de la periódica y en un 36,7 % respecto de la basada en eventos, manteniendo un comportamiento funcional equivalente en los tres casos. El indicador de energía lumínica equivalente se mantuvo en el mismo orden entre estrategias (11,41 a 12,16 Wh_eq sobre ensayos de 793 a 990 s), verificando que la reducción de tráfico no alteró el servicio lumínico entregado. Cabe subrayar que dicho indicador no constituye una medición eléctrica: la contribución de esta etapa se ubica en el plano comunicacional.

El trabajo realiza una contribución doble: una plataforma tecnológica abierta y replicable para iluminación urbana inteligente, y evidencia experimental cuantitativa sobre el impacto de distintas estrategias de transmisión en un entorno IoT real. Las etapas siguientes contemplan: la incorporación de una política de control contextual con horarios astronómicos (Bloque 2); la validación comparativa con LoRaWAN mediante placas Heltec SX127x (Bloque 3); la instrumentación del consumo eléctrico real del nodo mediante sensores de corriente sincronizados con el registro de telemetría, orientada a establecer la correspondencia cuantitativa entre reducción de mensajes y ahorro energético efectivo; y el despliegue de un piloto urbano en colaboración con un municipio. Estas líneas constituyen objetivos específicos de la continuidad del PID LPENPP668.

Agradecimientos

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 y de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UTN FRLP.

Referencias bibliográficas

- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J. y Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34–40. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600613
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. y Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422. DOI: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M. y Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095
- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T. y Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), art. 1466. DOI: 10.3390/s16091466
- Bouskela, M., Casseb, M., Bassi, S., De Luca, C. y Facchina, M. (2016). La ruta hacia las smart cities. Banco Interamericano de Desarrollo. DOI: 10.18235/0012831
- Carvajal, F., Gil, M., Poveda, R. y Quiroga, R. (2024). Eficiencia energética en la transición sostenible e inclusiva de América Latina y el Caribe. CEPAL. Recuperado de https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/estudio_eficiencia_energetica_alc_cepal.pdf
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A. y Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60–67. DOI: 10.1109/MWC.2016.7721743
- Chen, M., Challita, U., Saad, W., Yin, C. y Debbah, M. (2019). Artificial neural networks-based machine learning for wireless networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3039–3071. DOI: 10.1109/COMST.2019.2926625
- ChirpStack. (s.f.). *ChirpStack open-source LoRaWAN Network Server* (versión 4.x). Recuperado de <https://www.chirpstack.io/docs>
- Grafana Labs. (s.f.). *Grafana documentation* (versión 11.x). Recuperado de <https://grafana.com/docs/grafana/latest/>
- Heltec Automation. (s.f.). *WiFi LoRa 32: reference manual*. Recuperado de <https://heltec.org/project/wifi-lora-32>
- International Energy Agency [IEA]. (2023). Energy Efficiency 2023. International Energy Agency. Recuperado de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dfd9134f-12eb-4045-9789-9d6ab8d9bf4/EnergyEfficiency2023.pdf>
- Khemakhem, S. y Krichen, L. (2024). A comprehensive survey on an IoT-based smart public street lighting system. *Franklin Open*, 8, art. 100142. DOI: 10.1016/j.fraope.2024.100142
- Lin, J., Yu, W., Zhang, N., Yang, X., Zhang, H. y Zhao, W. (2017). A survey on Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5), 1125–1142. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2683200
- Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Yang, Q., Zhang, Y., Huo, Z. y Zhou, Z. (2020). Internet of Things for noise mapping in smart cities. *IEEE Network*, 34(4), 112–118. DOI: 10.1109/MNET.011.1900634
- Mahoor, M., Hosseini, Z. S., Khodaei, A., Paaso, A. y Kushner, D. (2020). State-of-the-art in smart streetlight systems: a review. *IET Smart Cities*, 2(1), 24–33. DOI: 10.1049/iet-smc.2019.0029
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. y Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1), 1–7. DOI: 10.1016/j.icte.2017.12.005

- Naik, N. (2017). Choice of effective messaging protocols for IoT systems. En 2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE), pp. 1–7. DOI: 10.1109/SysEng.2017.8088251
- Node-RED Project. (s.f.). *Node-RED documentation* (versión 4.x). Recuperado de <https://nodered.org/docs>
- OASIS. (2014). MQTT Version 3.1.1. [Estándar OASIS] Recuperado de <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html>
- Raza, U., Kulkarni, P. y Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19(2), 855–873. DOI: 10.1109/COMST.2017.2652320
- Secretaría de Energía de la Nación. (2022). Resolución 883/2022. Ministerio de Economía. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-883-2022-377519/texto>
- Shafique, K., Khawaja, B. A., Sabir, F., Qazi, S. y Mustaqim, M. (2020). Internet of Things (IoT) for next-generation smart systems. IEEE Access, 8, 23022–23040. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970118
- ThingsBoard. (s.f.). *ThingsBoard documentation* (versión 3.x). Recuperado de <https://thingsboard.io/docs>
- Wang, J., Gao, Y., Liu, W., Sangaiah, A. K. y Kim, H.-J. (2019). Energy efficient routing algorithm with mobile sink support for wireless sensor networks. Sensors, 19(7), art. 1494. DOI: 10.3390/s19071494
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L. y Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. IEEE Internet of Things Journal, 1(1), 22–32. DOI: 10.1109/JIOT.2014.2306328

AmeliCA

Disponible en:

<https://portal.amelica.org/ameli/ameli/journal/266/2665532024/2665532024.pdf>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en portal.amelica.org

AmeliCA

Ciencia Abierta para el Bien Común

Lautaro Bifano, Hernán Mazzeo, Nicolás; Zaniratto,
Federico Aguirre

**Sistema de Iluminación Pública Inteligente de Código
Abierto: Diseño, Implementación y Validación
Experimental de un Sistema IoT Adaptativo**

Ingenio Tecnológico

vol. 8, e89, 2026

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ingenio@frlp.utn.edu.ar

ISSN-E: 2618-4931



CC BY-NC-SA 4.0 LEGAL CODE

**Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-
CompartirIgual 4.0 Internacional.**