

Ciudades inteligentes: sistema IoT para la gestión de eficiencia energética en edificios gubernamentales de la Provincia de Buenos Aires.

Valeria Mercedes Lasagna, Sebastián Andrés Sánchez, Nicolás Agustín Martínez
Ministerio de Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, Subsecretaría de
Gobierno Digital,
Dirección Provincial de Innovación Digital,
La Plata, Buenos Aires, Argentina
{valeria.lasagna;sebastiana.sanchez;nicolas.martinez}@gba.gob.ar

Resumen. El presente trabajo se desarrolla como una Prueba de Concepto (PoC) orientado a promover la eficiencia energética en edificios del ámbito gubernamental provincial.

En este contexto, se describe el diseño e implementación de un sistema de medición de energía eléctrica basado en tecnología de Internet de las Cosas (IoT), en el marco de iniciativas de Ciudades Inteligentes. El sistema propuesto se fundamenta en una arquitectura distribuida de nodos de adquisición, compuestos por microcontroladores de bajo consumo, conversores analógico-digitales y sensores de corriente no invasivos tipo pinza amperométrica. Estos dispositivos permiten relevar el consumo energético a nivel de circuitos trifásicos directamente desde el tablero eléctrico central, sin intervención sobre la infraestructura existente. La solución implementa un esquema de adquisición periódica y transmisión de datos mediante protocolos de red estándar, posibilitando la construcción de series temporales de consumo energético. A partir de dichas mediciones, se generan métricas comparativas entre distintos sectores del edificio (incluyendo iluminación, climatización y equipamiento informático), facilitando el análisis tendencial y la detección de patrones de consumo.

En este sentido, el sistema constituye una herramienta tecnológica de soporte para la toma de decisiones, contribuyendo al desarrollo de políticas públicas sostenibles y a la gestión energética soberana en el ámbito del sector público.

Palabras claves. Ciudades Inteligentes, Internet de las cosas (IoT), Eficiencia Energética, Medición de Energía Eléctrica, Edificios del Sector Público

Smart Cities: An IoT System for Energy Efficiency Management in Government Buildings of the Province of Buenos Aires.

Abstract

This work is developed as a Proof of Concept (PoC) aimed at promoting energy efficiency in provincial government buildings. In this context, the design and implementation of an electrical energy measurement system based on Internet of Things (IoT) technology is described, within the framework of Smart Cities initiatives.

The proposed system is based on a distributed architecture of acquisition nodes composed of low-power microcontrollers, analog-to-digital converters, and non-invasive current sensors (clamp-type ammeters). These devices enable the monitoring of energy consumption at the level of three-phase circuits directly from

the main electrical panel, without requiring modifications to the existing infrastructure.

The solution implements a periodic data acquisition and transmission scheme using standard network protocols, enabling the construction of energy consumption time series. Based on these measurements, comparative metrics are generated across different building sectors—including lighting, HVAC systems, and IT equipment— facilitating trend analysis and the identification of consumption patterns.

In this sense, the system constitutes a technological tool to support decision-making processes, contributing to the development of sustainable public policies and to sovereign energy management within the public sector.

Keywords: Smart Cities, Internet of Things (IoT), Energy Efficiency, Electric Energy Measurement, Public Sector Buildings.

1 Introducción

El presente documento describe el desarrollo técnico de una Prueba de Concepto, de un sistema de medición energética basado en tecnología IoT, en línea con los enfoques propuestos por Al-Obaidi et al. (2022). El mismo es llevado adelante por la Dirección de Provincia y Experiencia Digital (DPED), dependiente de la Dirección Provincial de Innovación Digital (DPID) de la Subsecretaría de Gobierno Digital, del Ministerio de Gobierno de la Provincia de Buenos Aires. El proyecto se enmarca dentro de iniciativas de ciudades y territorios inteligentes (Zaman et al., 2024), con foco específico en la eficiencia energética en edificios públicos.

El alcance del documento se limita exclusivamente a los aspectos técnicos del sistema desarrollado, incluyendo la arquitectura de medición, los dispositivos implementados, el esquema de adquisición de datos y los fundamentos eléctricos asociados.

1.1 Relevancia del Proyecto

La eficiencia energética en edificios públicos constituye un eje estratégico para optimizar el gasto estatal y promover la sostenibilidad, siendo clave la disponibilidad de información confiable y detallada para la toma de decisiones basada en evidencia. Asimismo, el proyecto se vincula con la soberanía tecnológica al impulsar soluciones locales en el sector público, fortaleciendo las capacidades institucionales y contribuyendo a un desarrollo sostenible.

1.2 Objetivo del sistema

El sistema tiene como objetivo medir el consumo energético de circuitos eléctricos asociados a:

- Equipamiento de oficina,
- Sistemas de iluminación,
- Equipos de climatización (aires acondicionados).

Inicialmente, las mediciones de la Prueba de Concepto se realizarán en el Piso 11 del Edificio Torre 2, ubicada en el centro de la ciudad de La Plata. En etapas posteriores, se extenderá la medición al resto de los pisos del edificio, permitiendo realizar comparativas de consumo y evaluar si un piso particular puede considerarse representativo del comportamiento energético general.

2 Metodología

Acorde con Metallidou et al. (2020), se proponen una arquitectura de IoT modular y escalable que integra sensores distribuidos, adquisición de datos y análisis en tiempo real para optimizar la eficiencia energética en edificios inteligentes.

2.1 Ubicación de la medición

Los dispositivos de medición se instalarán en el 4º subsuelo del Edificio Torre 2, específicamente en el tablero eléctrico general. Esta ubicación permite un acceso centralizado a los circuitos eléctricos de todos los pisos, reduciendo la complejidad de instalación y mantenimiento.

2.2 Arquitectura general del sistema

El sistema se compone de nodos de medición independientes. Cada nodo está diseñado para medir un circuito trifásico completo y se encuentra conformado por:

- Microcontrolador ESP32,
- Conversor analógico-digital ADS1115,
- Tres sensores de corriente SCT013-50A / 1V,
- Fuente de alimentación step-down de 12 V a 3.3 V,
- Circuito de acondicionamiento de señal.

Cada nodo opera de manera autónoma y actúa como un odómetro eléctrico, acumulando energía consumida a lo largo del tiempo.

2.3 Medición no invasiva

El sistema fue diseñado bajo el criterio de medición no invasiva. No se realizan mediciones directas de tensión ni se intervienen las conexiones eléctricas existentes. La medición se limita exclusivamente a corriente, utilizando sensores tipo pinza, lo que permite una instalación segura y reversible.

2.4 Acondicionamiento de señal

Los sensores SCT013-50A entregan una señal analógica alterna proporcional a la corriente medida, con un rango máximo de 1V pico a pico. Dado que el ADS1115 solo admite señales positivas, se implementa un desplazamiento de nivel mediante un divisor resistivo.

2.4.1 Divisor de tensión

El divisor de tensión está compuesto por dos resistencias iguales de valor

$$R_1 = R_2 = 45\text{ k}\Omega$$

conectadas en serie entre 3,3V y GND. La tensión de referencia obtenida en el punto medio es:

$$V_{offset} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{cc} = 1,65V$$

Esta tensión permite desplazar la señal alterna del sensor, representando correctamente ambos semiciclos. Un capacitor conectado en paralelo con R_2 mejora la estabilidad del punto de referencia y reduce el ruido.

2.5 Adquisición de datos

El ESP32 se comunica con el ADS1115 mediante el bus I2C. Dado que múltiples sensores se encuentran conectados a un mismo conversor, las mediciones se realizan de forma escalonada, seleccionando secuencialmente cada canal. Este esquema introduce pequeños tiempos muertos entre lecturas.

2.6 Cálculo de energía

Para cada fase $k \in \{1, 2, 3\}$, el ADS1115 adquiere muestras discretas de corriente $i_k[n]$ a una tasa máxima de 860 muestras por segundo. Dado que el ESP32 opera con un único conversor en configuración multiplexada, las tres fases se miden de forma secuencial, asignando a cada sensor una ventana de muestreo de 1 s. Un ciclo de medición completo comprende las tres ventanas consecutivas, con duración total:

$$T_c = 3 \times 1 \text{ s} = 3 \text{ s}$$

2.6.1 Corriente eficaz por fase

Dentro de cada ventana de 1 s, el nodo adquiere hasta $N = 860$ muestras de la fase correspondiente. La corriente eficaz de cada fase se estima como el valor cuadrático medio (root mean square, RMS) de las muestras adquiridas:

$$I_{k,rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_k[n]^2}, \quad k \in \{1, 2, 3\}$$

Este estimador es válido para cualquier forma de onda y, en el caso particular de una señal sinusoidal de amplitud I_{pk} , reproduce el resultado analítico

$$I_{k,rms} = I_{pk} \sqrt{2}$$

2.6.2 Energía incremental

Sea $I_{1,rms}$, $I_{2,rms}$, $I_{3,rms}$ la corriente eficaz obtenida en cada fase durante un ciclo de medición. La corriente trifásica total se define como:

$$I_{tot} = I_{1,rms} + I_{2,rms} + I_{3,rms}$$

La energía incremental acumulada durante cada ciclo se estima como:

$$\Delta E = V_{nom} \cdot I_{tot} \cdot T_c$$

donde V_{nom} corresponde a la tensión nominal de la red. Este valor se acumula en memoria no volátil del ESP32, actualizándose cada 30 s.

2.7 Limitaciones de la medición

El sistema no mide tensión instantánea ni ángulo de fase entre tensión y corriente, por lo que no es posible calcular potencia activa exacta ni el factor de potencia. En consecuencia, la magnitud primaria obtenida es la potencia aparente.

No obstante, dado que la tensión de red presenta una baja variabilidad y que las cargas típicas de oficina exhiben factores de potencia relativamente estables, la energía acumulada puede considerarse una aproximación representativa del consumo real. En este marco, y considerando que el objetivo principal del sistema es el análisis comparativo y tendencial, dicha aproximación resulta válida.

En consecuencia, el sistema se configura como una herramienta adecuada para la realización de estudios de eficiencia energética, la detección de sobreconsumos y la comparación entre distintos sectores del edificio.

2.8 Persistencia y ciclo de vida de la memoria

La memoria flash del ESP32 soporta típicamente del orden de 10^5 ciclos de escritura por sector. Considerando una escritura cada 30 segundos:

$$N_{\text{escrituras/año}} = \frac{60}{30} \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \approx 1,05 \times 10^6$$

El uso del sistema de almacenamiento no volátil (NVS) incorpora mecanismos de *wear leveling*, distribuyendo las escrituras entre múltiples sectores. Asumiendo una partición efectiva de 64 sectores:

$$\text{Vida útil} \approx \frac{10^5 \cdot 64}{1,05 \times 10^6} \approx 6 \text{ años}$$

Este valor resulta adecuado para el horizonte operativo del proyecto.

2.9 Transmisión y almacenamiento de datos

Además del cálculo local de energía, cada nodo transmite periódicamente buffers de mediciones de corriente mediante el protocolo HTTP (elegido por su simplicidad de implementación en el contexto de una PoC) hacia un servidor local, donde los datos son almacenados de forma temporal como instancia intermedia de persistencia. Este nivel permite desacoplar la adquisición de datos del almacenamiento definitivo, mejorando la robustez del sistema ante eventuales fallas de conectividad.

Posteriormente, en intervalos definidos, los datos son transferidos desde el servidor local hacia una máquina virtual (VM) desplegada en la infraestructura de nube de la Dirección Provincial de Innovación Digital (DPID). Finalmente, la información es almacenada de manera persistente en una base de datos PostgreSQL provista por la Dirección de Datos, también dependiente de dicha dirección, donde queda disponible para su procesamiento, análisis y visualización mediante un tablero de gestión estadística.

3 Resultados esperados

En términos de validación técnica del sistema, se anticipa que la arquitectura de nodos distribuidos basada en el ESP32 y el conversor ADS1115 demostrará capacidad de operación continua y estable, con transmisión confiable de datos hacia la base PostgreSQL en la nube de la DPID. La experiencia de implementaciones análogas con sensores SCT013 en tableros trifásicos ha demostrado que este tipo de arquitectura no invasiva permite relevar el estado operativo de los circuitos en tiempo real desde el tablero eléctrico central, sin requerir modificaciones en la infraestructura existente (Najmurokhman et al., 2023).

Desde una perspectiva comparativa, la literatura especializada indica que sistemas IoT de monitoreo energético en edificios pueden contribuir a reducciones de consumo de entre un 20% y un 30%, así como a una disminución equivalente en costos operativos, a partir de las decisiones de gestión informadas que posibilitan (Poyyamozi et al., 2024). Si bien el presente sistema, en su carácter de PoC, no está orientado en esta instancia a la actuación automática sobre los circuitos, la disponibilidad de datos comparativos entre sectores habilitará a los responsables del edificio a fundamentar medidas de eficiencia con evidencia empírica.

Asimismo, se espera que los datos recopilados permitan evaluar si el Piso 11 resulta representativo del comportamiento energético del edificio en su conjunto, lo que orientará la estrategia de expansión del sistema hacia los pisos restantes.

4 Conclusiones

El sistema propone una solución de medición energética no invasiva, escalable y de bajo costo para edificios públicos. En su carácter de Prueba de Concepto (PoC), el proyecto se posiciona como una instancia exploratoria que permite validar

decisiones de diseño, tecnologías empleadas y estrategias de captación y gestión de datos en contextos reales de operación.

Asimismo, su concepción modular posibilita su rápida replicabilidad en otros edificios y organismos, favoreciendo su adopción a escala. En este sentido, la arquitectura propuesta no solo cumple una función operativa inmediata, sino que también habilita la evolución progresiva hacia una solución más robusta, mediante la incorporación futura de equipamiento de medición de mayor precisión y capacidades ampliadas, consolidando así un sistema integral de gestión energética basado en una solución tecnológica propia, que fortalece la soberanía tecnológica de la Provincia.

Referencias

- Al-Obaidi, K. M., Hossain, M., Alduais, N. A. M., Al-Duais, H. S., Omrany, H., & Ghaffarianhoseini, A. (2022). A review of using IoT for energy efficient buildings and cities: A built environment perspective. *Energies*, 15(16), 5991. <https://doi.org/10.3390/en15165991>
- Metallidou, C. K., Psannis, K. E., & Egyptiadou, E. A. (2020). Energy Efficiency in Smart Buildings: IoT Approaches. *IEEE Access*, 8, 63679–63699. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984461>
- Najmurokhman, A., Kusnandar, Komarudin, U., & Amirulloh, D. I. (2023). Three phase current monitoring system using SCT013 sensor and Internet of Things platform. *AIP Conference Proceedings*, 2646(1), 050034. <https://doi.org/10.1063/5.0112698>
- Poyyamozi, M., Murugesan, B., Rajamanickam, N., Shorfuzzaman, M., & Aboelmagd, Y. (2024). IoT—A Promising Solution to Energy Management in Smart Buildings: A Systematic Review, Applications, Barriers, and Future Scope. *Buildings*, 14(11), 3446. <https://doi.org/10.3390/buildings14113446>
- Zaman, M., Puryear, N., Abdelwahed, S., & Zohrabi, N. (2024). A review of IoT-based smart city development and management. *Smart Cities*, 7(3), 1462–1501. <https://doi.org/10.3390/smartcities7030061>