

EnerTrack: Sistema IoT para Monitorio de Consumo Energético

Ignacio Daniel Behler

Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería
Oberá, Misiones, Argentina

Abstract—This work presents EnerTrack, an Internet of Things (IoT) platform for energy-consumption monitoring that unifies acquisition, transport, storage, visualization, and real-time alerting. A measurement node built on an ESP32 microcontroller (ESP32) and a PZEM-004T sensor captures voltage, current, power factor, frequency, and accumulated energy. Measurements are published via the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol to topics of the form `enertrack/<esp_id>/...` and persisted in InfluxDB v2 (a time-series database, TSDB) by a subscriber service. A Python/Flask backend provides a REST API and web dashboards (Chart.js/Bootstrap 5) with user management and node assignment. The system integrates a Telegram bot to set per-node 15 min average-power thresholds and deliver immediate alerts. The prototype was deployed on a virtual private server (VPS), validated first with synthetic MQTT data and later with real readings under load. Results from the validation protocol indicate end-to-end data availability and integrity consistent with the intended use. *Overall, the study validates the feasibility of a low-cost, replicable IoT pipeline for residential and institutional energy management.*

Keywords—Energy monitoring; ESP32; PZEM-004T; MQTT over TLS; time-series database (TSDB); Flask REST API; Chart.js dashboards; Telegram alerts.

Resumen—Se presenta EnerTrack, una plataforma de Internet de las Cosas (IoT) para monitoreo de consumo energético que integra adquisición, transporte, almacenamiento, visualización y alertas en tiempo real. El nodo de medición, basado en un microcontrolador ESP32 (ESP32) y el transductor PZEM-004T, registra tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia y energía acumulada. Los datos se publican mediante el protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) en tópicos `enertrack/<esp_id>/...` y se persisten en InfluxDB v2 (base de datos de series temporales, TSDB) a través de un servicio suscriptor. Un backend en Python/Flask ofrece una API REST y paneles web (Chart.js/Bootstrap 5) con gestión de usuarios y asignación de nodos. Se integra un bot de Telegram para definir por nodo un umbral de potencia media a 15 min y emitir alertas inmediatas. El prototipo se desplegó en un servidor privado virtual (VPS) y se validó con datos sintéticos por MQTT y con lecturas reales bajo carga. Los resultados del protocolo de validación evidencian disponibilidad e integridad extremo a extremo acordes al uso previsto. *En conjunto, se valida la viabilidad de una solución IoT de bajo costo y replicable para gestión energética residencial e institucional.*

Palabras clave—Monitoreo energético; ESP32; PZEM-004T; MQTT con TLS; base de datos de series temporales (TSDB); API

REST con Flask; dashboards con Chart.js; alertas por Telegram.

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo describe EnerTrack, una plataforma IoT de bajo costo para el monitoreo continuo del consumo eléctrico. El sistema integra un nodo de medición basado en un microcontrolador ESP32 y el transductor PZEM-004T que adquiere tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia y energía acumulada; mensajería Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), almacenamiento en InfluxDB v2 como base de datos de series temporales (TSDB) y un backend web en Python/Flask que ofrece una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) REST y una Interfaz de Usuario (UI) con paneles históricos (Chart.js/Bootstrap 5). Además, incorpora un bot de Telegram para notificaciones inmediatas cuando se supera un umbral de potencia media a 15 min.

El objetivo es proveer observabilidad básica y remota para hogares y PyMEs, manteniendo simplicidad de despliegue y costos contenidos. En esta versión se evalúa un único medidor para demostrar el flujo extremo a extremo y discutir su potencial de escalado hacia múltiples nodos.

Estructura del artículo. La Sección II delimita el problema. La Sección III revisa trabajos y soluciones afines. La Sección IV fundamenta la propuesta y su alcance. La Sección V plantea objetivos. La Sección VI describe el prototipo y su arquitectura (véase Fig. 1). La Sección VII detalla el protocolo de validación y resultados. La Sección VIII compara con plataformas similares. Finalmente, la Sección IX resume hallazgos, limitaciones y trabajo futuro.

II. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

El acceso oportuno y continuo a datos básicos del suministro eléctrico y del consumo es una necesidad creciente en entornos domésticos y de pequeñas organizaciones. En la práctica, los usuarios suelen carecer de herramientas asequibles que les permitan observar de forma simple y remota cómo varían tensión y corriente en sus instalaciones, cuánto consumen a lo largo del día y cuándo se producen picos de demanda que

encarecen la factura o anticipan sobrecargas. Las alternativas profesionales disponibles ofrecen altas prestaciones, pero se ubican fuera del alcance económico y operativo del usuario común, mientras que las soluciones de muy bajo costo rara vez brindan históricos consultables, alertas proactivas o una integración IoT que facilite la toma de decisiones cotidianas [4], [5].

En paralelo, la calidad del suministro puede verse afectada por fluctuaciones de tensión, microcortes e interrupciones que degradan equipamiento y generan molestias en la vida diaria [1], [2]. Sin embargo, para la mayoría de los usuarios el principal obstáculo no es aplicar inmediatamente un análisis normativo avanzado, sino contar con visibilidad básica y continua de variables eléctricas y consumo acumulado, de modo de detectar tendencias, corregir hábitos y disponer de evidencia mínima para gestionar reclamos o intervenciones técnicas. Un panel web con históricos, más un esquema de notificaciones simple (p. ej., superar un umbral de potencia media en 15 min), ya aporta un valor tangible al permitir prevenir sobreconsumos, identificar consumos “fantasma” y organizar el uso de cargas críticas [3], [4].

Desde esta perspectiva, el problema que aborda el prototipo EnerTrack se delimita así:

- **Brecha de observabilidad:** falta de una herramienta de bajo costo y fácil despliegue que muestre, en tiempo casi real, tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia y energía en el punto de consumo, con históricos consultables y acceso remoto.
- **Gestión reactiva del consumo:** sin alertas por umbral (p. ej., potencia media a 15 min), los usuarios detectan tarde picos de demanda o usos ineficientes, perdiendo oportunidades de ahorro y de protección de equipos.
- **Evidencia mínima para la acción:** la ausencia de registros básicos dificulta justificar reclamos ante la distribuidora, orientar decisiones de mantenimiento eléctrico o evaluar el impacto de cambios de hábito [3], [4].

III. ANTECEDENTES

Para situar el prototipo EnerTrack en el estado del arte, se consideran cuatro familias de soluciones con distinto grado de complejidad, costo e integración. Dado que el alcance del prototipo se centra en medición básica (tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia y energía), visualización histórica y alertas por umbral de potencia media a 15 min, se priorizan antecedentes que aportan contexto para monitoreo de consumo y observabilidad remota, sin pretender un análisis normativo completo de calidad de potencia.

- 1) **Equipos comerciales de calidad eléctrica.** Marcas consolidadas como Fluke (1760) [6], Dranetz (familia

HDPQ, p. ej., Xplorer) [7] y Sonel [8] ofrecen registradores avanzados y conformes a normativas. Si bien son referencia técnica, su costo y complejidad los orienta a entornos industriales o consultoría especializada, quedando por fuera del alcance típico de hogares y PyMEs a los que apunta el prototipo.

- 2) **Proyectos de código abierto y DIY.** Iniciativas como OpenEnergyMonitor (emonPi/emonTx) han democratizado la medición de consumo y el acceso a históricos, con amplia comunidad y espíritu educativo [9]. Abundan, además, desarrollos sobre Arduino, ESP32 y ESP8266, a menudo con CIs de medición (HLW8012, ATM90E32S), y experiencias documentadas como el Informe_PPS_Krindges_VF [10]. Estas propuestas inspiran el enfoque de bajo costo y replicable del prototipo, aunque usualmente requieren integrar por cuenta propia la cadena completa hardware–backend–visualización.
- 3) **Plataformas IoT para monitoreo.** Servicios en la nube como ThingsBoard [11], Ubidots [12], AWS IoT [13], Azure IoT [14] y opciones accesibles como Blynk [21] proveen infraestructura para recolección, almacenamiento, visualización y gestión de datos. En general, exigen desarrollar el hardware de adquisición y la lógica de aplicación específica, razón por la cual el prototipo EnerTrack integra un nodo ESP32 + PZEM-004T, un backend Flask e InfluxDB, logrando una solución autocontenida y ajustada al caso de uso.
- 4) **Medición inteligente (smart meters).** Soluciones comerciales de Itron [15], Landis+Gyr [16], Honeywell [17] o Schneider Electric [18] incorporan lectura remota y, en ciertos casos, consumo horario. No obstante, su foco primario es la facturación y gestión para la distribuidora; típicamente no brindan al usuario final detalle exhaustivo en tiempo real ni flexibilidad para definir alertas operativas como el umbral de potencia media a 15 min por nodo. En la literatura práctica también se relevan equipos como POWERMETER SMART [10].
- 5) **Investigación académica.** Existe un corpus robusto sobre detección y clasificación de perturbaciones (sags, swells, transitorios, armónicos) y aplicaciones de IoT/IA para redes inteligentes [19], [20]. Estos trabajos resultan valiosos como horizonte evolutivo, pero exceden el alcance del prototipo, que se concentra en observabilidad básica, históricos y notificaciones como primer peldaño hacia soluciones más avanzadas.

Síntesis y posicionamiento

El panorama anterior revela oportunidades para soluciones compactas y de bajo costo que equilibren facilidad de despliegue, visualización histórica y alertas proactivas centradas

en el usuario final residencial/PyME. En ese espacio, EnerTrack aporta una integración extremo a extremo con ESP32 + PZEM-004T, MQTT → InfluxDB, dashboards web y Telegram para umbrales operativos, priorizando replicabilidad y escalabilidad simple (múltiples nodos en el futuro) por sobre un análisis normativo exhaustivo. Esta dirección es consistente con la necesidad de soluciones conectadas, accesibles y centradas en el usuario.

IV. JUSTIFICACIÓN

La literatura y los relevamientos locales señalan déficits persistentes en la visibilidad del suministro y en la transparencia del consumo, con impactos operativos para usuarios residenciales y organizaciones, lo que sustenta la necesidad de instrumentos de observación continua y trazables del comportamiento eléctrico [5], [19], [20]. En ese marco, la propuesta se centra en medición básica con registro histórico y notificaciones como insumo empírico para describir patrones de uso y detectar anomalías en el entorno real de operación.

Como contribución técnica, el prototipo integra un *pipeline* reproducible: adquisición local (tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia y energía), transporte de datos por mensajería, persistencia en base de series temporales y visualización orientada a histórico y tendencias, incorporando además alertas operativas basadas en ventanas temporales (p. ej., potencia media en 15 min). Esta cadena extremo a extremo habilita estudios sobre latencia, robustez ante fallos de red, disponibilidad del dato y sensibilidad de umbrales, elementos señalados como relevantes para mejorar la observabilidad del sistema eléctrico a escala de usuario.

El alcance se delimita explícitamente: se aborda un único punto de medición y no se pretende una clasificación normativa exhaustiva de calidad de potencia; el objetivo es generar registros confiables y comparables que sirvan como base para análisis posteriores (p. ej., correlación entre picos de demanda y eventos de interrupción o fluctuación), en línea con la necesidad de datos concretos para diagnóstico y toma de decisión informada.

Limitaciones y proyección

La propuesta no persigue validar normativas específicas ni realizar desagregación por carga; su foco es la observabilidad básica y la notificación temprana. A partir de esta línea base, quedan abiertas extensiones naturales:

- Múltiples nodos y usuarios, con administración y escalado horizontal.
- Evaluación comparativa de exactitud frente a instrumentos de referencia.
- Endurecimiento de seguridad en el transporte y almacenamiento de datos.

V. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseñar e implementar un prototipo de plataforma IoT para la observación básica del consumo eléctrico en un único punto de medición, capaz de: (i) adquirir tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia y energía mediante ESP32 + PZEM-004T; (ii) transportar los datos vía MQTT; (iii) persistirlos en InfluxDB v2; (iv) visualizarlos mediante dashboards web (Flask/Chart.js) con históricos; y (v) emitir notificaciones por superación de umbrales de potencia media en ventanas de 15 min, priorizando replicabilidad y trazabilidad extremo a extremo.

B. Objetivos específicos

- **Integración de medición.** Integrar y configurar ESP32 + PZEM-004T para la lectura de tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia y energía, incluyendo pruebas de estabilidad y calibración básica del lazo de medición.
- **Publicación de datos.** Definir el esquema de tópicos MQTT (p. ej., `enertrack/<esp_id>/...`) e implementar la publicación periódica desde el nodo, con autenticación y cifrado en el transporte cuando corresponda.
- **Ingesta y almacenamiento.** Desplegar un *worker* suscrito a `enertrack/#` para normalizar y almacenar las series temporales en InfluxDB v2, definiendo *measurements*, *tags*, *fields* y políticas de retención acordes al alcance.
- **API y visualización.** Desarrollar una API en Flask para consultas de históricos y agregaciones, e implementar dashboards interactivos con Chart.js (tema claro/oscuro, vistas por día/semana/mes).
- **Alertas operativas.** Implementar la vinculación con Telegram mediante código único por usuario y la lógica de umbral de potencia media a 15 min por nodo, con notificación inmediata ante excedencias.
- **Despliegue.** Desplegar en VPS la solución completa (broker, backend, base de datos y frontend), documentando variables de entorno, dependencias y procedimientos de puesta en marcha.
- **Validación funcional.** Realizar pruebas con datos sintéticos por MQTT y ensayos con carga real, verificando latencia extremo a extremo, disponibilidad de datos y comportamiento de las alertas.
- **Documentación y replicabilidad.** Elaborar la documentación técnica del prototipo, detallar limitaciones (único nodo; sin clasificación normativa exhaustiva de calidad de potencia) y criterios de escalado a múltiples nodos/usuarios.

VI. DESARROLLO DEL PROTOTIPO

A. Arquitectura de extremo a extremo

El prototipo implementa una cadena completa de adquisición–transporte–almacenamiento–visualización–notificación. Un nodo de medición basado en ESP32 y PZEM-004T captura tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia y energía acumulada. Las mediciones se publican por MQTT hacia un *broker* en la nube utilizando una jerarquía de tópicos `enertrack/<esp_id>/...`. Un *worker* suscrito a `enertrack/#` ingiere los datos, los normaliza y los persiste en InfluxDB v2 como series temporales. Un backend en Flask expone una API para consultas agregadas e históricas; un frontend con Chart.js y Bootstrap 5 ofrece visualizaciones interactivas, con modo claro/oscuro y vistas por ventana temporal. Además, se integra Telegram para alertas basadas en potencia media móvil a 15 min. Este diseño prioriza observabilidad básica con registro histórico y notificaciones, de acuerdo con las motivaciones planteadas (véase Fig. 1).

Arquitectura

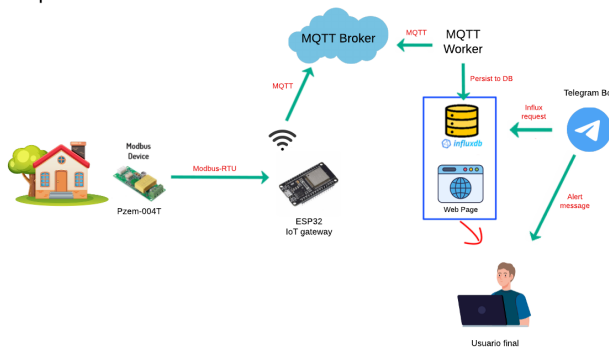


Figura 1. Arquitectura extremo a extremo del prototipo EnerTrack (nodo ESP32+PZEM-004T, MQTT, InfluxDB, backend Flask, UI web y bot de Telegram).

B. Nodo de medición: hardware y firmware

El nodo emplea ESP32 como controlador y pasarela de comunicaciones, y PZEM-004T como transductor de energía. El firmware realiza:

- Inicialización de interfaces (UART/Modbus-RTU para PZEM-004T), lectura periódica y validaciones básicas (rangos plausibles, NaN/Inf).
- Cálculo local de métricas derivadas cuando corresponde (p. ej., potencia instantánea si el chip entrega V , I y PF).
- Publicación MQTT con QoS configurable (típicamente 1) y retardo de reintento exponencial ante fallos de red.

- Etiquetado con *timestamps* y metadatos (ID de nodo, versión de firmware).

Frecuencia de muestreo y empaquetado. Se utiliza una cadencia de publicación definida según la latencia extremo a extremo admisible y la granularidad requerida para el cálculo de la ventana móvil de 15 min.

C. Esquema de tópicos y carga útil MQTT

La jerarquía de tópicos permite direccionar múltiples nodos (aunque en este trabajo se evalúa un único medidor):

- `enertrack/<esp_id>/status`
- `enertrack/<esp_id>/telemetry`
- `enertrack/<esp_id>/events`

Seguridad y autenticación. El *broker* acepta conexiones autenticadas; cuando la infraestructura lo permite, se emplea TLS para cifrado del canal.

D. Ingesta y almacenamiento en InfluxDB v2

Un *worker* suscrito a `enertrack/#`:

- Valida y normaliza los mensajes.
- Enriquece con etiquetas (*tags*, p. ej., `esp_id`).
- Persiste en InfluxDB v2 definiendo:
 - **Measurement:** `power_metrics`.
 - **Tags:** `esp_id`, `site`.
 - **Fields:** `v_rms`, `i_rms`, `pf`, `freq`, `e_acc`.
 - **Política de retención:** acorde al horizonte de análisis (p. ej., 30–90 días para crudos; *downsampling* opcional a 1–5 min).

Para gestión de usuarios y asignación de nodos se utiliza una base relacional (MariaDB), separada de la TSDB.

E. Backend (Flask) y API de consulta

El backend expone *endpoints* para:

- Series históricas por rango temporal y resolución.
- Agregaciones (máximos, mínimos, promedios) y ventanas móviles.
- Gestión: alta de nodos, vinculación de usuario, configuración de umbrales.

La separación API/UI permite futuras integraciones (p. ej., clientes móviles o dashboards alternativos).

F. Frontend (Chart.js + Bootstrap 5)

La interfaz implementa:

- Dashboards con selección de rango (últimas 24 h / 7 días / 30 días) y modo claro/oscuro.
- Gráficas de V , I , PF , frecuencia y energía acumulada, con *tooltips* (véase ejemplo en Fig. 2).
- Vistas de eventos (excedencias de umbral) y estado del nodo.
- Gestión de usuarios y asignación de nodos desde la propia UI.

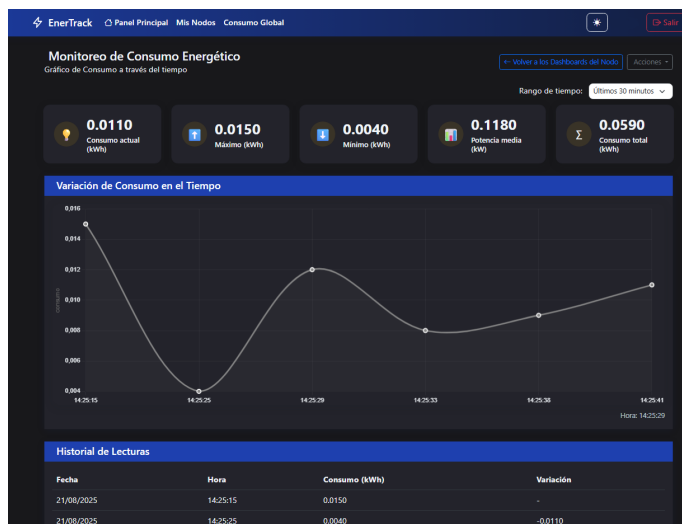


Figura 2. Ejemplo de dashboard web mostrando series históricas y eventos.

G. Módulo de notificaciones (Telegram)

La notificación opera en dos fases:

- **Vinculación de usuario:** el sistema genera un código único; el usuario envía ese código al bot para asociar su cuenta.
- **Detección de excedencias:** el backend mantiene, para cada nodo, una ventana deslizante de 15 min sobre potencia media. Si el promedio supera el umbral configurado, se emite alerta inmediata vía Telegram (incluyendo valor, umbral y *timestamp*).

Esta lógica combina series temporales con mensajería instantánea, aportando un mecanismo simple y útil de alerta temprana.

H. Despliegue y operación

El sistema se despliega en una VPS con los siguientes servicios:

- **Broker MQTT** (autenticación obligatoria; TLS cuando se dispone de certificados).
- **InfluxDB v2 (TSDB)** y base relacional para usuarios/nodos.
- **Backend Flask** y frontend servido desde el mismo backend.

Se documentan variables de entorno, rotación de *logs* y procedimientos de copia de seguridad de las bases. El prototipo físico se ilustra en la Fig. 3.

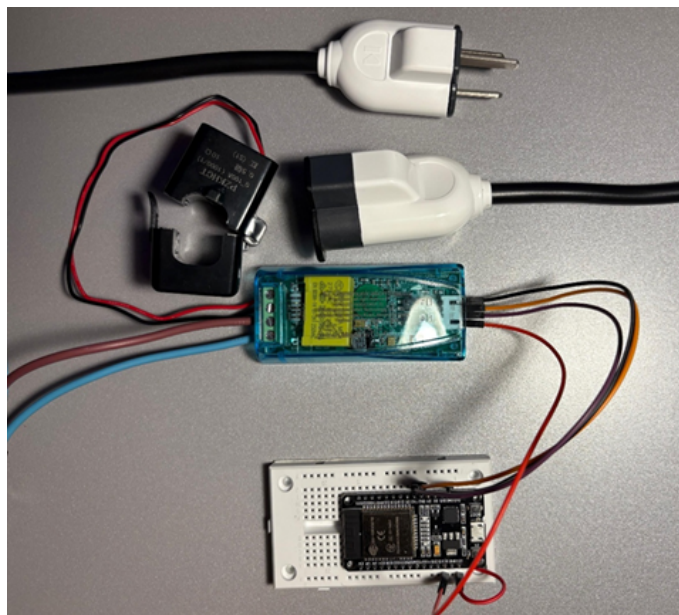


Figura 3. Prototipo físico: ESP32 + PZEM-004T y cableado de medición.

Disponibilidad de código y licencia

El software del backend (Flask), el servicio de ingesta y los paneles se publican como *código abierto* bajo licencia MIT.¹ Se incluyen aviso de licencia y un README con despliegue reproducible en VPS.

VII. VALIDACIÓN FUNCIONAL EN ENTORNO DOMÉSTICO

A. Protocolo

Se verificó el funcionamiento extremo a extremo con **cargas domésticas** representativas: (i) lámpara inteligente Nexxt Home (LED, 9 W nominal),² (ii) ventilador de pie Liliana 20" (90 W nominal),³ y (iii) heladera Bambi con freezer (consumo de referencia 239 kWh/año para el modelo 2F-1200).⁴ Para cada carga se realizó:

- 1) Registro continuo de V_{rms} , I_{rms} , factor de potencia (PF), frecuencia y energía acumulada (E) durante **30 min** (lámpara y ventilador) y **120 min** (heladera).
- 2) Verificación de *plausibilidad* de magnitudes: coherencia física entre $P \approx V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot PF$ y la potencia

¹Repositorio público: <https://github.com/ignaciobehler/enertrack>.

²Ficha Nexxt Solutions A19 9W: <https://www.nexxtsolutions.com/connectivity/internal-products/NHB-W120/>.

³Ejemplo de modelo Liliana 20" con potencia declarada 90 W: <https://www.liliana.com.ar/ventilador-de-pie-20/p>.

⁴Ejemplo de especificación comercial con 239 kWh/año (Bambi 2F-1200): <https://www.mercadolibre.com.ar/heladera-auto-defrost-bambi-2f1200-blanca-con-freezer-239-l-color-blanco/p/MLA11211664>.

nominal/esperable, y estabilidad razonable de V_{rms} y frecuencia.

- 3) Verificación de *trazabilidad temporal*: ante encendido/apagado, la serie muestra escalones acordes; en la heladera se observan ciclos de compresor (variación en I y P a intervalos).
- 4) Comprobación de *eventos*: configuración de umbral de potencia media a 15 min y observación de notificación cuando corresponde.

B. Criterios y fórmulas

Se evalúa:

- **Coherencia de potencia:** $P_{medida} = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot PF$ en torno a $P_{nominal}$ (la variación depende del tipo de carga y del PF).
- **Acumulación de energía:** $\Delta E \approx \bar{P} \cdot \Delta t$ (con $\bar{P}$ promedio en el intervalo Δt).
- **Estabilidad básica:** variación de V_{rms} y frecuencia aco-
tadas (observación cualitativa).

C. Resultados

Las Tablas I y II sintetizan los resultados medidos con el prototipo. Los valores de referencia (placa/ficha) y de consumo anual se indican en notas al pie.

TABLA I
VERIFICACIÓN POR CARGA (MEDICIONES DOMÉSTICAS).

Carga	P_{nom} [W]	PF (obs.)	P_{medida} [W]	Criterio
Lámpara LED Nexxt	9	0.62	8.7	Plausible
Ventilador Liliana 20"	90	0.86	85	Plausible
Heladera Bambi (ciclo)	–	Variable	Rango: 70–110	Plausible

TABLA II
CHEQUEO DE ENERGÍA ACUMULADA EN INTERVALOS CONTROLADOS.

Carga	Δt [min]	$\Delta E_{estimada}$ [Wh]	$\Delta E_{registrada}$ [Wh]
Lámpara LED Nexxt	30	4.5	4.3
Ventilador Liliana 20"	30	37.5	36.8
Heladera Bambi (prom.)	120	60	58

Observaciones cualitativas. Se observaron escalones claros en I y P al encender/apagar lámpara y ventilador; en la heladera se registraron ciclos del compresor con aumentos transitorios de I y posterior estabilización. La frecuencia se mantuvo estable (observación visual en el dashboard). El umbral de potencia media a 15 min permitió generar una notificación cuando la potencia promedio superó el valor configurado.

D. Limitaciones de la validación

La validación se realizó con cargas domésticas y sin instrumento patrón de laboratorio; por lo tanto, los resultados son

funcionales (plausibilidad y trazabilidad) y no constituyen una certificación metrológica. Esta limitación queda consignada y se aborda en el trabajo futuro.

VIII. COMPARACIÓN CON ALTERNATIVAS

La Tabla III sintetiza diferencias prácticas frente a opciones habituales. EnerTrack prioriza cadena autocontenida y replicable con costos controlados en despliegue propio. *OEM* refiere a OpenEnergyMonitor.

TABLA III
COMPARATIVA DE CARACTERÍSTICAS.

Característica	EnerTrack	OEM	ThingsBoard	Ubidots
HW de medición incluido	ESP32+PZEM	Varía	No	No
Ingesta & TSDB	MQTT+Influx	MQTT+EmonCMS	MQTT+DB	MQTT+DB (SaaS)
Dashboards custom	Si (Chart.js)	Si	Si	Si
Alertas por umbral 15 min	Si	Configurable	Si	Si
Despliegue propio (<i>self-host</i>)	Si	Si	Si	Parcial
Licencia & código abierto	MIT	GPL	Apache-2.0	Propietario/SaaS
Costo mensual	VPS	Propio	VPS	Suscripción

IX. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó EnerTrack, un prototipo de plataforma IoT para observabilidad básica del consumo eléctrico en un único punto de medición, articulando una cadena extremo a extremo compuesta por ESP32 + PZEM-004T (adquisición), MQTT (transporte), InfluxDB v2 (series temporales), Flask (API) y Chart.js/Bootstrap (visualización), con notificaciones por umbral de potencia media a 15 min mediante Telegram. La implementación y los ensayos con datos sintéticos y con carga real, junto con el protocolo de validación reportado, evidenciaron disponibilidad e integridad de datos acordes al uso previsto, y latencias compatibles con monitoreo operativo.

La principal contribución radica en ofrecer un *pipeline* reproducible y documentado que integra hardware de amplio acceso con una infraestructura de datos trazable y consultable, orientada a tendencias de uso y a la detección operativa de picos. En términos metodológicos, la separación entre captura, mensajería, almacenamiento, API y UI facilita tanto la reutilización de componentes como su sustitución por equivalentes (p. ej., otros transductores, distintos motores de base de datos o clientes alternativos), manteniendo la compatibilidad con el esquema de tópicos y el modelo de datos. *En conjunto, se valida la factibilidad de una solución IoT de bajo costo y replicable para la gestión energética residencial e institucional.*

Limitaciones.

- (i) Evaluación restringida a un único nodo.
- (ii) Sin clasificación de calidad de potencia según normas específicas.
- (iii) Sin desagregación por carga ni análisis tarifario.
- (iv) Exactitud metrológica del conjunto ESP32+PZEM-004T no contrastada contra instrumentos de referencia bajo protocolos formales.

- (v) Seguridad acotada a autenticación y cifrado de transporte (sin gestión avanzada de identidades ni telemetría de integridad).

Trabajo futuro.

- (1) Extensión a múltiples nodos/usuarios.
- (2) Endurecimiento de seguridad (TLS mutuo, gestión de llaves, auditoría y alertas de integridad).
- (3) Resiliencia ante fallas (buffering en el borde, reenvío y compactación), además de *downsampling* y retención por niveles.
- (4) Estudio de experiencia de usuario para optimizar la presentación de históricos y eventos en distintos perfiles de consumo.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Territorio, “Vecinos padecen pérdidas a consecuencia de la baja tensión en energía eléctrica”, 7 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.elterritorio.com.ar/noticias/2023/01/07/775670-vecinos-padecen-perdidas-a-consecuencia-de-la-baja-tension-en-energia-electrica>. [Último acceso: 25 de junio de 2025].
- [2] A. Fisher, “Power Surges on Home Electronics”, Easefix Blog, 4 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.easefix.com/blog/Power-Surges-on-Home-Electronics>. [Último acceso: 25 de junio de 2025].
- [3] ENRE, “Reclamar resarcimiento por daños en artefactos eléctricos”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/servicio/reclamar-resarcimiento-por-danos-en-artefactos-electricos>. [Último acceso: 25 de junio de 2025].
- [4] Infobae, “18 consejos para ahorrar energía en casa y cuáles son los electrodomésticos que más gastan”, 10 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.infobae.com/economia/2024/04/10/18-consejos-para-ahorrar-energia-en-casa-y-cuales-son-los-electrodomesticos-que-mas-gastan/>. [Último acceso: 25 de junio de 2025].
- [5] EPRI, *The Cost of Power Disturbances to Industrial and Digital Economy Companies*. Palo Alto, 2001.
- [6] PowermeterStore.com, “Fluke 1760 Power Quality Recorder”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.powermeterstore.com/online/fluke-1760-power-quality-recorder>. [Último acceso: 25 de junio de 2025].
- [7] Dranetz, “HDPQ Family – Permanent PQ & Energy Monitoring Products”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dranetz.com/product-category/dranetz-hdpq-family/>. [Último acceso: 25 de junio de 2025].
- [8] Sonel S.A., “Power-Quality Analysis Devices”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sonel.pl/en/products/devices/power-quality-analysis>. [Último acceso: 25 de junio de 2025].
- [9] OpenEnergyMonitor Community, “Electricity Monitoring Documentation”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://docs.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/>. [Último acceso: 23 de junio de 2025].
- [10] F. N. Krindges, “Desarrollo de prototipo de medidor de energía inteligente para generación fotovoltaica”. Oberá, Misiones, 2024.
- [11] ThingsBoard, “Open-source IoT Platform”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://thingsboard.io/>. [Último acceso: 23 de junio de 2025].
- [12] Ubidots, “Powerful but simple Industrial IoT”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ubidots.com/>. [Último acceso: 22 de junio de 2025].
- [13] Amazon Web Services, “AWS IoT Core”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://aws.amazon.com/iot/>. [Último acceso: 23 de junio de 2025].
- [14] Microsoft Corporation, “Azure IoT Hub”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://azure.microsoft.com/en-us/products/iot-hub>. [Último acceso: 22 de junio de 2025].
- [15] Itron, “OpenWay® Riva™ Single-Phase Electricity Meter – Datasheet”, Liberty Lake, 2016.
- [16] Landis+Gyr AG, “E350 (ZxF100) Smart Meter – Data Sheet”, Zug, 2013.
- [17] Honeywell International Inc., “Alpha A4Res Residential Smart Meter – Data Sheet”, Charlotte, 2022.
- [18] Schneider Electric, “Acti 9 iEM3000 Series – Technical Data Sheet”, Rueil-Malmaison, 2014.
- [19] T. Ravi y S. Srividya, “Review of Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using Machine Learning and Deep Learning Methods”, en *2023 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, Chennai, India, 2023.
- [20] I. S. Samanta, S. Panda, P. K. Rout, M. Bajaj, M. Piecha, V. Blazek, y L. Prokop, “A Comprehensive Review of Deep-Learning Applications to Power Quality Analysis”, *Energies*, vol. 16, núm. 11, art. 4406, 2023.
- [21] Blynk Inc., “Blynk IoT Platform”, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blynk.io>. [Último acceso: 23 de junio de 2025].