



**SISTEMA DIGITAL DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA LA MITIGACIÓN DE
RIESGOS ECONÓMICOS EN PYMES INDUSTRIALES EN
BOGOTÁ D.C.**

Andrés Rincón Sánchez

Natalia Ximena Quiroga Muñoz

Nicolás David Ballesteros Arévalo

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Proyecto de Integración

Bogotá D.C, Colombia

12 de junio de 2026

**SISTEMA DIGITAL DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA LA MITIGACIÓN DE
RIESGOS ECONÓMICOS EN PYMES INDUSTRIALES EN
BOGOTÁ D.C.**

Andrés Rincón Sánchez

Natalia Ximena Quiroga Muñoz

Nicolás David Ballesteros Arévalo

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero de Sistemas

Ingeniero Industrial

Ingeniero de Energías

Director (a):

Diana Paola Figueroa Hernández

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Proyecto de Integración

Bogotá D.C, Colombia

12 de junio de 2026

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Ciudad, día/mes/año

Resumen

Las PYMES industriales de Bogotá enfrentan ineficiencias energéticas agravadas por la volatilidad tarifaria asociada al Fenómeno de El Niño, que impacta la matriz hidroeléctrica colombiana 67% de generación nacional. A diferencia de la gran industria, las PYMES carecen de herramientas digitales para implementar sistemas de gestión energética basados en ISO 50001, limitando su competitividad frente a incrementos tarifarios documentados de hasta 15,3% (UPME, 2022).

Este estudio evalúa la viabilidad técnica de un sistema digital de gestión energética diseñado para 50 PYMES industriales en Bogotá. Cabe precisar que el análisis se basa en un entorno de simulación con datos sintéticos, orientados a validar la arquitectura del sistema y no a reflejar el comportamiento operativo real de las empresas. El sistema adopta EnPI basadas en ISO 50001, ISO 50002 e ISO 50006. La arquitectura la compone backend para procesamiento de facturas, frontend con visualización de EnPI y alertas de variabilidad tarifaria, y APIs para integración con sistemas empresariales.

Debido a que el desarrollo del sistema se basa en el uso de datos sintéticos, la validación se realiza bajo el Método Delphi. En donde profesionales del área de sistemas y especialistas en energía certificados en normas ISO de gestión y eficiencia energética, por medio de entrevistas estructuradas, evaluarán la funcionalidad y precisión técnica del sistema digital, asegurando que los resultados sintéticos se alineen con los estándares operativos reales del sector pyme.

Palabras clave: eficiencia energética, PYMES industriales, ISO 50001, indicadores EnPI, gestión energética digital, Bogotá

Abstract

Industrial SMEs located in Bogotá show significant inefficiencies in their energy use, which are intensified by electricity price instability linked to El Niño cycles, affecting a hydroelectric matrix that supplies around 67% of Colombia's national generation. Unlike large industrial companies, these firms generally lack digital solutions to structure energy management systems consistent with ISO 50001, which weakens their position when facing tariff increases reported at up to 15.3% in recent years (UPME, 2022).

This study evaluates the technical feasibility of a digital energy management system designed for fifty industrial SMEs in Bogotá. It should be noted that the analysis is based on a simulation environment with synthetic data, intended to validate the system architecture and not to reflect the companies' actual operational behavior. The system integrates energy performance indicators EnPI according to ISO 50001, ISO 50002, and ISO 50006 standards, featuring energy baseline modeling normalized by production levels and consumption pattern analysis algorithms. The architecture includes backend for billing data processing, frontend with EnPI visualization and tariff variability alerts, and APIs for enterprise system integration.

Since the model's development is based on the use of synthetic data, the validation phase is structured using the Delphi Method. This approach ensures validation through expert judgment: professionals in the field of systems and energy specialists, the latter certified in ISO standards for energy management and efficiency. Through structured interviews, the professionals will evaluate the application's functionality, relevance, and technical accuracy, ensuring that the synthetic results align with the sector's actual operational standards.

Keywords: energy efficiency, industrial SMEs, ISO 50001, EnPI indicators, digital energy management, Bogotá

Introducción

El Colombia genera alrededor del 67% de su electricidad a partir de fuentes hídricas, lo que convierte al Fenómeno de El Niño en una amenaza directa sobre las tarifas eléctricas. En los últimos cinco años esto produjo incrementos de hasta el 15,3% en las tarifas de energía. (UPME, 2022; IPCC, 2021). En donde para una gran empresa ese aumento se puede costear mientras para una PYME industrial no.

Las PYMES en Bogotá D.C; actualmente representan el 96,4% de las empresas del país (DANE, 2021) y en su mayoría no tienen herramientas digitales para controlar ni gestionar su consumo energético. Las grandes industrias pueden costear sistemas basados en ISO 50001 mientras que las PYMES enfrentan barreras económicas, técnicas y de conocimiento que lo impiden (Ministerio de Minas y Energía, 2017).

A nivel de Latinoamérica, hay poca implementación de soluciones digitales de gestión energética adaptadas a PYMES. Existen iniciativas como EmPOWER en España (Bettergy, 2023), que lograron ahorros de entre 10% y 20% usando análisis de big data y digitalización de facturas, pero en Colombia esto no se cumple: la disponibilidad de medición inteligente instalada (Briano et al., 2016; CAF, 2025). Perczyk et al. (2023) clasifican las barreras en cuatro categorías técnicas, económicas, regulatorias e informativas y advierten que todas empeoran en países en desarrollo. Zambrano y Real (2021) agregan que implementar ISO 50001 en una PYME exige tiempo y personal especializado que simplemente no está disponible en economías emergentes. Triller y Sandkuhl (2025) lo confirman: aunque las PYMES entienden que gestionar energía es importante, no hay soluciones estandarizadas y adaptadas culturalmente a su contexto.

Las cifras internacionales también no son un referente directo. Darby (2010) reporta reducciones de 3–15% con medidores inteligentes en Europa, y Ketenci y Wolf (2024) registra

ahorros de 16–22% en PYMES manufactureras europeas mediante análisis de flujo energético.

Pero esos resultados vienen de mercados con mayor infraestructura técnica y personal capacitado, condiciones que no son comparables con el contexto colombiano.

Debido a este contexto, la pregunta que orienta este proyecto es: **¿en qué proporción el diseño de un sistema digital basado en los estándares ISO 50001 e ISO 50006 permite optimizar el desempeño energético y reducir el impacto financiero de la volatilidad tarifaria en PYMES industriales de Bogotá?**

Para responderla, se plantea un sistema de gestión energética que opera en tres ítems: normalización de indicadores de desempeño energético EnPI bajo ISO 50006, procesamiento y visualización en tiempo real con alertas de variabilidad tarifaria, y vinculación del consumo con los turnos de operación para identificar oportunidades concretas de optimización (Capehart et al., 2020; Zhou et al., 2016).

Objetivos

Objetivo General

Diseñar y comprobar por medio del Método Delphi y la implementación de datos sintéticos, un sistema digital de gestión energética basado en EnPI, bajo estándares: ISO 50001, 50002 y 50006, enfocado en identificar oportunidades de optimización de consumo energético en PYMES industriales de Bogotá, respaldado la técnica y alineación operativa del sistema, a través del juicio de los profesionales.

Objetivos Específicos

El proyecto tiene como objetivos específicos modelar la Línea Base Energética y definir los Indicadores de Desempeño Energético específicos para cada proceso industrial, normalizando los datos según los niveles de producción bajo los lineamientos de la ISO 50006; desarrollar la arquitectura del sistema digital de gestión energética, incluyendo backend de procesamiento, frontend con visualización de EnPI y alertas de variabilidad tarifaria, y APIs para integración con sistemas empresariales; implementar algoritmos de análisis para detección de patrones de consumo, estimación de ahorros contrafactuales y generación de recomendaciones operativas adaptadas a turnos de producción y cargas de trabajo, basándose en conjuntos de datos sintéticos. La funcionalidad del sistema se verificará mediante el método Delphi, en donde un panel de expertos conformado por un profesional de sistemas y dos profesionales en energía, certificados en normas ISO, asegurarán por medio de entrevistas estructuradas que los resultados sintéticos y la técnica del sistema se ajusten con los estándares operativos reales del sector industrial PYME.

Marco Teórico

Este proyecto parte de dos pilares: la normativa ISO de gestión energética y las herramientas digitales de la Industria 4.0. La idea central es que las PYMES no gestionen la energía solo revisando facturas al final del mes, sino que tengan acceso a datos en tiempo real para tomar decisiones con base técnica.

Eficiencia energética

La eficiencia energética es producir lo mismo consumiendo menos energía (ISO, 2018). Para una PYME industrial esto no es un tema ambiental secundario, es un ítem directo de competitividad, especialmente cuando las tarifas eléctricas son volátiles. Capehart et al. (2020) señala que el kWh es el indicador más crítico para procesos manufactureros, porque permite cuantificar el costo real de cada unidad producida.

La intensidad energética enfatiza ese análisis a nivel macroeconómico, aunque en PYMES su uso requiere normalizar los datos por variables propias de la operación: turnos, tipo de carga, estacionalidad (Trianni et al., 2013). Precisamente para eso, la ISO 50006 (2018) ofrece métodos para construir líneas base ajustadas a esas condiciones variables.

Un tema que suele ignorarse en empresas pequeñas son las curvas de demanda: los picos de consumo coinciden con las horas productivas, y si no se analizan, no se pueden nivelar (Pérez-Lombard et al., 2008). Zhou et al. (2016) lo demostraron en PYMES textiles, donde reorganizar los turnos de alta intensidad generó ahorros del 12%.

Auditoría Energética

La auditoría energética es el sistema para entender cómo y dónde se consume la energía, identificar los usos más significativos y priorizar mejoras con criterio económico (ISO 50002, 2018). Existen tres niveles: el nivel 1 es una caracterización inicial rápida; el nivel 2 implica medición directa de equipos; y el nivel 3 es monitoreo continuo para verificar que los ahorros se mantengan.

Para una PYME con recursos limitados, llegar al nivel 3 es poco accesible. Por eso el sistema propone una lógica híbrida nivel 1/2: captura automática de facturas, análisis de curvas de demanda y recomendaciones ordenadas por retorno de inversión. Trianni et al. (2013) reportaron que PYMES manufactureras italianas lograron entre 16% y 22% de ahorro con auditorías simplificadas. Pero Zambrano y Real (2021) advierten que esos resultados son difíciles de replicar en economías emergentes donde no hay personal técnico interno. Rodríguez et al. (2020) confirman esa brecha en Colombia: la mayoría de las microempresas no tiene capacidad para hacer diagnósticos energéticos sistemáticos según ISO 50001.

Tecnologías Digitales y Arquitecturas para Gestión Energética Industrial

Los sistemas de gestión energética actuales combinan digitalización de facturas con OCR, análisis de series temporales y dashboards pensados para usuarios que no son ingenieros. Benítez-Pina (2022) mostró que incluso con hardware de bajo costo como Arduino es posible lograr un error de medición de apenas 0,36% frente a un medidor convencional. El reto, como apuntan Romero Macías y Loor (2025), no es solo medir bien, sino que la interfaz convierta esos datos en acciones concretas: ¿qué proceso apagar? ¿en qué turno reubicar la carga?

En cuanto a los algoritmos, Zhou et al. (2016) proponen K-means para agrupar perfiles de consumo según el tipo de proceso (maquinaria pesada vs. ensamblaje ligero), mientras Kim et al. (2024) documentan que Random Forest alcanza un 92% de precisión en predicción de picos de demanda bajo variabilidad tarifaria. Estos modelos permiten simular escenarios contrafactuales, es decir, estimar cuánto se ahorraría si se redujeran cargas en horas pico, lo que convierte los datos en argumentos para decisiones gerenciales (Marinakís, 2020).

Marcos Normativos Internacionales y su Adaptación a PYMES

Este proyecto se basa en tres normas: ISO 50001 define el ciclo completo de gestión energética (Planificar–Hacer–Verificar–Actuar), ISO 50002 estructura cómo hacer las auditorías, e ISO 50006 establece cómo calcular y normalizar los EnPI (ISO, 2018). Thollander y Palm (2013) confirman que estas normas son aplicables a PYMES no intensivas en energía, siempre que se simplifiquen los indicadores y se segmenten las líneas base por proceso.

El problema radica que la normativa por sí sola no funciona. Ketenci y Wolf (2024) identifica que, sin adaptación cultural y capacitación del personal operativo, la implementación falla, algo que en contextos latinoamericanos suele subestimarse. Torres et al. (2024) documenta que en Colombia muchas PYMES ni siquiera reconocen qué es un EnB o un EnPI, lo que confirma la necesidad de interfaces que traduzcan esas métricas en algo accionable para un gerente o jefe de planta.).

Brechas Identificadas y Vinculación con la Propuesta

La investigación muestra que los marcos normativos existen, las tecnologías existen, pero la brecha está en la aplicación práctica para PYMES en países en desarrollo. Iniciativas como EmPOWER en Europa (Bettergy, 2023) funcionan bien en mercados con medición inteligente instalada, pero en países como Colombia simplemente no existe a escala PYME. Vanegas et al. (2012) ya señalaba que las pequeñas empresas necesitan herramientas que conecten el gasto energético con sus variables operativas reales: turnos, cargas, estacionalidad.

Esta propuesta responde a esa brecha en cuatro pasos concretos: (1) captura de facturación mensual como proxy del consumo agregado, (2) cálculo automatizado de EnPI normalizados por producción en kWh/unidad, (3) líneas base ajustadas por turnos operativos según ISO 50006, y (4) verificación de ahorros contrastada con fuentes oficiales. El enfoque prioriza escalabilidad y usabilidad sobre precisión de laboratorio, siguiendo la lógica de prototipos como el de Benítez-Pina (2022) y reconociendo que en etapas tempranas la validación con datos reales es limitada (Torres et al., 2024).

Estado del Arte

Procedimiento de Búsqueda

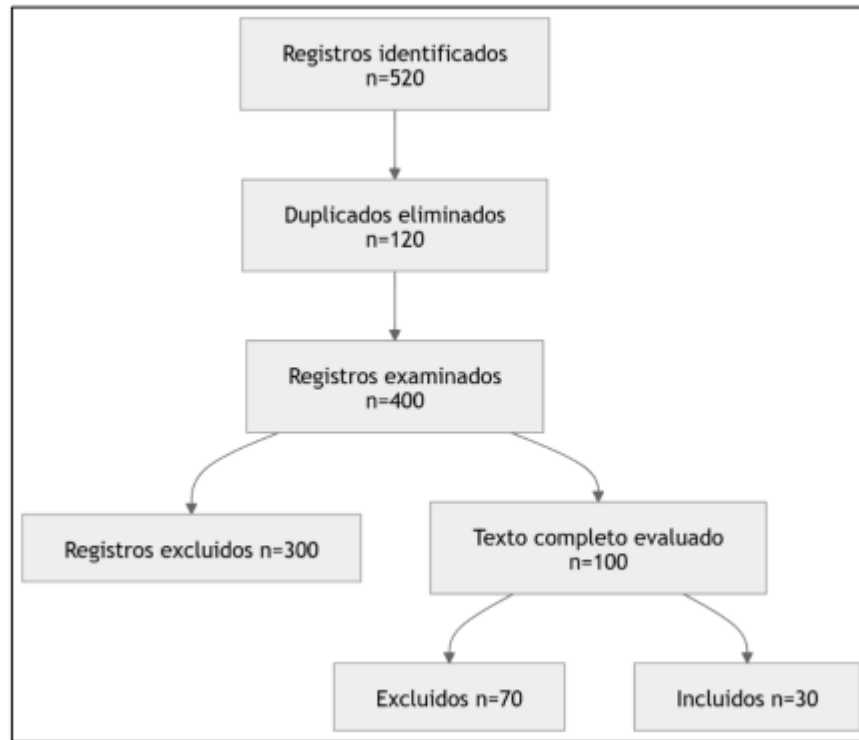
Para la investigación se consultaron bases de datos académicas entre los periodos de enero y marzo del 2026.

Se incluyeron investigaciones teóricas y aplicados publicados entre 2013 y 2025 que presentaran soluciones tecnológicas para medir y mejorar el consumo eléctrico en PYMES o sectores con uso no intensivo de energía. Se descartaron trabajos centrados en grandes industrias, energías diferentes de la eléctrica o investigaciones descriptivas sin propuesta técnica.

El proceso de selección se realizó según el método PRISMA 2020: eliminación de artículos duplicados, revisión de títulos y resúmenes. A partir de este proceso, de los quinientos registros iniciales se quedó con una muestra final de treinta estudios.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA para selección de estudios sobre gestión energética digital en PYMES industriales



Nota. Inicialmente se consultaron 520 registros, 120 fueron duplicados, se excluyeron 300 por falta relación directa del proyecto. Se analizaron 100 artículos completos, excluyendo 70 por metodología y en donde finalmente, 30 estudios constituyeron el estado del arte.

Caracterización de los 30 Estudios Incluidos

En el análisis se identificaron 30 estudios que se agrupan en cinco categorías temáticas. La primera corresponde a aplicaciones móviles orientadas al seguimiento y visualización del consumo energético. La segunda tiene propuestas fundamentadas en tecnologías y sensores inteligentes para medición y control en tiempo real. Una tercera categoría está conformada por trabajos que aplican técnicas de analítica de datos y algoritmos de machine learning a problemas de gestión energética. La cuarta categoría está conformada por experiencia en implementación de la norma ISO 50001 en pequeñas y medianas empresas. Y por último, se identificó un grupo de revisiones sistemáticas y marcos conceptuales que aportan una visión más amplia del campo de estudio.

Categoría 1. Aplicaciones móviles para monitoreo energético

Investigaciones en contextos desarrollados. Beltozar-Clemente et al. (2025) crearon una aplicación Android/iOS para gestión domiciliaria que tiene registro de usuarios, sensores inteligentes, monitoreo en tiempo real con alertas y análisis de consumo diario, mensual, anual. En su validación con 60 usuarios, el 48,3% calificó la satisfacción como buena y el 43,3% evaluó la usabilidad como buena mediante escala Likert, indicando buena aceptación del enfoque. Sin embargo, no reportan reducciones cuantificadas en consumo energético, limitándose a validación de usabilidad.

Alam et al. (2017) revisaron métodos computacionales para optimización de costos energéticos residenciales en redes inteligentes, identificando 34 algoritmos de optimización aplicados a gestión de demanda. Aunque enfocado en hogares, destacan la aplicabilidad de algoritmos de programación dinámica y heurísticas para PYMES con perfiles de consumo

variables. Karlin et al. (2015) realizaron un metaanálisis de 42 estudios sobre feedback energético, reportando reducciones promedio de 5-15% en consumo residencial, pero con alta heterogeneidad metodológica estudios de campo vs. laboratorio, duración variable de 1 semana a 2 años.

Estudios en contextos en latinoamerica. Benítez-Pina (2022) evidencia en Cuba un sistema de uso doméstico para monitorear consumo energético combinando Arduino y Android, logrando precisión del 99,64% respecto al medidor convencional en pruebas técnicas. El prototipo refleja consumos por aparatos y genera reportes comparativos diarios/semanales, pero no incluye validación de cambios conductuales ni ahorros reales.

En cuanto a la validación de impacto, Kim et al. (2024) analizaron el efecto de la retroalimentación eléctrica en tiempo real mediante medidores inteligentes en 1284 hogares coreanos durante seis meses. Los resultados fueron muy variados: mientras algunos usuarios disminuyeron su consumo en torno al 13%, otros datos incrementaron entre el 7% y el 20%, lo que sugiere que la presencia de tecnología no garantiza cambios.

Por su parte, Zhou et al. (2016) construyeron en China un sistema de gestión energética para edificios comerciales que integró sensores IoT, modelos de análisis predictivo-basados en ARIMA y estrategias de optimización de sistemas HVAC. En este caso hubo una disminución aproximada del 12% en el consumo, especialmente a través del ajuste de turnos de climatización, resultado que fue verificado mediante la comparación con facturas oficiales durante doce meses de operación.

A partir de estas y otras investigaciones, varios autores han identificado brechas importantes. Una de las más frecuentes es que muchas aplicaciones móviles se concentran en

mostrar consumos totales en kWh y costos monetarios, pero no trabajan con indicadores normalizados de desempeño energético EnPI.

Categoría 2. Sistemas IoT

Artículos de investigación de Romero Macías y Loor (2025) analizaron el uso de IoT en entornos de hogar inteligente, donde evidenciaron como elementos recurrentes sensores de corriente y voltaje ACS712, SCT-013, microcontroladores de bajo costo como ESP32 y Raspberry Pi, y sistemas on line en la nube para gestión energética, entre ellas AWS IoT y Azure IoT centro de operaciones. En general, los artículos analizados muestran que este tipo de prototipos permite reducir consumos mediante automatización. Sin embargo, algunos artículos, sugieren que hay varios desafíos: la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes, los costos iniciales de implementación, que pueden estar entre 500 y 2 000 USD por instalación completa, y los riesgos de ciberseguridad asociados a ataques dirigidos a dispositivos IoT.

Por otro lado, Marinakis (2020) sugiere una arquitectura más compleja para edificios inteligentes, donde combina tecnologías para confirmar la trazabilidad de los datos, modelos de inteligencia artificial basados en redes neuronales profundas para deducir la demanda energética y plataformas de visualización interactiva tipo dashboard. Esta solución se estructura en varias capas: una capa de sensores medidores inteligentes y sensores ambientales, una capa de comunicación basada en protocolos como MQTT y CoAP, una capa de procesamiento que emplea herramientas como Apache Kafka y Spark, y una capa de aplicación con paneles web y APIs REST. Pero el propio autor aclara que se trata de sistemas pensados para edificios de gran tamaño más de 10 000 metros cuadrados y con presupuestos superiores a 100 000 USD, lo que la aleja de la realidad económica de la mayoría de LAS PYMES.

En el contexto comercial, una referencia frecuente es el sistema EmPOWER desarrollado en España (Bettergy, 2023), que integra en un mismo sistema los datos de consumo de distintas PYMES, digitaliza facturas mediante OCR desde el teléfono móvil y utiliza análisis de big data para sugerir diferencias de tarifa o ajustes en el perfil de consumo. Los reportes disponibles indican ahorros promedio de entre el 10% y el 20%, inicialmente por optimización contractual y renegociación con comercializadoras. Sin embargo, esta solución se apoya en un contexto con alta penetración de medidores inteligentes superior al 80% en el caso español, una condición que aún no se cumple en Colombia, donde la adopción de smart meters es menos del 5% según UPME (2022).

También existen soluciones de bajo costo orientadas a contextos emergentes. Alam et al. (2017) detallan sistemas de gestión energética residencial basados en Raspberry Pi y sensores de corriente SCT-013, con costos inferiores a 150 USD por vivienda.

Finalmente, Ahmad et al. (2020) analizo 119 trabajos sobre predicción de demanda energética en redes inteligentes y concluyeron que los modelos híbridos que combinan LSTM con ARIMA pueden alcanzar errores MAPE por debajo del 3% en horizontes de 24 horas, siempre que la calidad de los datos de entrada sea adecuada. La investigación resalta que aspectos como la frecuencia de muestreo y la cantidad de valores faltantes afectan de forma difícil el desempeño de los modelos de machine learning, llegando a degradar notablemente su precisión cuando más del 10% de la serie histórica presenta vacíos. En conjunto, estos antecedentes muestran que muchas soluciones IoT y de software comercial se orientan a grandes consumidores por encima de 500 MWh/año y no están pensadas para la operación directa de pequeñas empresas, además de arrastrar problemas de interoperabilidad entre dispositivos que limitan su escalabilidad en el contexto de PYMES).

Categoría 3. Analítica avanzada

Zhou et al. (2016) utilizó el algoritmo K-means para agrupar los perfiles horarios de 120 PYMES manufactureras en China. Con este estudio se identificaron cinco patrones de operación: empresas con turno diurno convencional, organizaciones con turno extendido y picos nocturnos, operaciones continuas 24/7, consumos concentrados en fines de semana y comportamientos irregulares sin un patrón claro.

Para la detección de irregularidades; Marinakis (2020) sugiere el uso de autoencoders variacionales VAE en entornos industriales. Esta investigación permite evidenciar, sin supervisión directa, situaciones como equipos que permanecen encendidos fuera del horario productivo, aumentos graduales en el consumo base que sugieren pérdida de eficiencia y picos de corriente asociados a fallas puntuales. En pruebas realizadas sobre datos de 45 edificios comerciales, el modelo logró detectar alrededor del 87% de las anomalías reales, manteniendo la tasa de falsos positivos por debajo del 5%.

En relación con los sistemas de recomendación, Darby (2010) aporta evidencia sobre la eficacia de la comparación social frente a mensajes genéricos. En una investigación con 500 hogares en el Reino Unido, las alertas personalizadas del tipo su consumo está un 15% por encima del promedio de hogares similares lograron reducciones promedio de consumo del 8% en un año, frente a un 3% resultado con mensajes estándar.

Por último, varias investigaciones coinciden en señalar ciertas brechas recurrentes. Una de las más relevantes es que muchas soluciones siguen basadas en indicadores simples, como kWh totales o costo mensual, sin normalizar por producción ni superficie. Esto dificulta la

comparación entre empresas y sectores; Ketenci y Wolf (2024) destacan que aún son pocos los estudios que reportan consumos por metro cuadrado o por unidad producida en PYMES industriales, lo que limita la construcción de referentes intersectoriales útiles.

Categoría 4. Implementación de ISO 50001

En el caso de las grandes empresas, uno de los referentes más mencionado es 3M en América Latina. El reporte del Clean Energy Ministerial (2022) detalla cómo la compañía implementó ISO 50001 en 28 plantas de la región y logró reducir el tiempo de certificación desde alrededor de 18 meses en el primer sitio hasta rangos de 3 a 8 meses en los siguientes, principalmente gracias a la estandarización de procedimientos. En términos de resultados, se registra una reducción cercana al 15% en la intensidad energética, medida en MWh por tonelada producida, sostenida durante cinco años, con un retorno de la inversión en proyectos de eficiencia de aproximadamente 2,3 años.

Este mismo caso refleja una brecha importante frente a la realidad de las PYMES: la inversión inicial por planta se ubicó entre 50 000 y 200 000 USD, montos que difícilmente pueden asumir empresas de menor tamaño.

Cuando se consulta específicamente a las PYMES, los desafíos se hacen más evidentes. Zambrano y Real (2021), en su análisis sobre empresas ecuatorianas, muestran varias barreras críticas para la implementación de ISO 50001: el trabajo inicial para el personal entre 200 y 400 horas para poner en marcha el sistema de gestión, la necesidad de contratar procesos de capacitación externa con costos estimados entre 5000 y 10000 USD, la percepción de que los requisitos documentales son excesivamente burocráticos y la dificultad de una cultura consolidada de medición y seguimiento continuo. Los autores deducen que, aunque la norma

contempla lineamientos para PYMES, el esfuerzo económico y organizacional asociado puede resultar desproporcionado para micro y pequeñas empresas con márgenes estrechos.

También hay estudios en sectores industriales no intensivos en energía. Ketenci y Wolf (2024) explican dos casos de PYMES manufactureras en Alemania: una dedicada a componentes electrónicos y otra al ensamblaje de maquinaria. Con consumos anuales entre 1500 y 2500 MWh. A través de medición específica en equipos clave, identificación de oportunidades como la optimización de compresores y el aprovechamiento de calor residual, y ajustes organizacionales como el apagado sistemático de equipos fuera de turno, estas empresas lograron reducciones de consumo entre el 16% y el 22%, verificadas contra la facturación oficial.

En el contexto de América, la integración formal de ISO 50001 sigue siendo limitada. Gallego et al. (2022) señalan que en Colombia hay menos de 50 empresas certificadas bajo esta norma, en su mayoría grandes industrias y multinacionales. Entre las barreras reportadas se destacan el desconocimiento de la norma por parte del 78% de las PYMES encuestadas, la percepción de que los costos de implementación son altos del 65% y la falta de incentivos o apoyos gubernamentales claros para promover este tipo de sistemas del 45%.

Categoría 5. Revisiones sistemáticas

Karlin et al. (2015) realizó un análisis de 42 estudios, con una muestra acumulada de alrededor de 27 000 hogares, para evaluar el efecto de distintos tipos de feedback energético sobre la conservación de energía. En conjunto, se evidenciaron una reducción promedio del consumo cercana al 7,4%, con un intervalo de confianza entre 5,9% y 8,9%, pero acompañada de una heterogeneidad elevada entre estudios, lo que indica que los resultados varían bastante según el contexto. El trabajo sobresale como ítems moderadores la frecuencia con la que se entrega la

retroalimentación si es en tiempo real suele ser más efectiva que la información mensual, la forma de presentación de los datos la comparación con hogares similares tiende a ser más influyente que mostrar solo cifras absolutas y la duración de las intervenciones, ya que los efectos tienden a disminuir cuando se superan los doce meses de seguimiento.

En el ámbito industrial, Thollander y Palm (2013) sugiere un marco de trabajo estructurado para mejorar la eficiencia energética en plantas manufactureras. Este ítem conforma varios componentes: la realización de auditorías energéticas en diferentes niveles de profundidad, el uso de diagramas de flujo, por ejemplo, diagramas de Sankey para visualizar el recorrido de la energía, la comparación de indicadores entre empresas similares, la evaluación técnica-económica de las medidas de mejora y la verificación de los ahorros obtenidos mediante protocolos de medición y verificación como IPMVP. El framework ha sido aplicado en más de 200 PYMES europeas, donde se reportan tasas de implementación de las recomendaciones entre el 45% y el 65%.

Por último, varios trabajos llaman la atención sobre barreras que no son únicamente financieras. Trianni et al. (2016), a partir de encuestas a 168 PYMES italianas, muestran que factores como la falta de tiempo, la ausencia de líderes internos que impulsen los proyectos y ciertos rasgos de la cultura organizacional explican alrededor del 53% de la variación en la adopción de medidas de eficiencia, superando incluso a las barreras económicas, que representan cerca del 42%. En el contexto latinoamericano, Perczyk et al. (2023) añaden otras capas de dificultad: limitaciones institucionales asociadas a una aplicación débil de la regulación, resistencias culturales al cambio dentro de las empresas y brechas de información entre quienes ofrecen servicios energéticos y las PYMES que podrían beneficiarse de ellos.

Síntesis crítica y oportunidades identificadas

El análisis de los 30 estudios revela cuatro brechas:

Brecha geográfica y contextual: Solo 4 de 30 estudios provienen de Latinoamérica y ninguna de Colombia

Brecha normativa-tecnológica: Solo 5 estudios incorporan explícitamente métricas I

Brecha metodológica en validación: solo de 7 estudios, el 23% incluyen verificación rigurosa de ahorros reales

Brecha de escalabilidad: Las soluciones IoT avanzadas tienen un costo de \$50 000

- \$200 000 USD. (Benítez-Pina, 2022).

La propuesta de este proyecto cierra estas brechas mediante un sistema digital que integra EnPI y métricas de ISO para disminuir el consumo energético de PYMES.

Tabla 1

Síntesis de estudios sobre gestión energética digital en PYMES industriales incluidos en revisión sistemática PRISMA

Autor/ año	Categoría	Contexto geográfico	Tecnología s principales	Indicadore s evaluados	Resultado s clave	Validación empírica	Aplicabilidad a PYMES colombianas
Beltozar - Clemente et al. (2025)	Aplicación móvil	Latinoamérica (internacional)	Android/iOS, sensores IoT, alertas tiempo real	Satisfacción (Likert), usabilidad	48,3% satisfacción "muy buena", 43,3% usabilidad "muy buena"	Encuestas usabilidad (n=60), sin validación de ahorro	Alta; requiere validación local de impacto en consumo
Alam et al. (2017)	Revisión sistemática	Global	Algoritmos optimización, smart grids	Métodos computacionales	34 algoritmos identificados para gestión demanda	Revisión de literatura	Media; enfocado en hogares, adaptable a PYMES
Karlin et al. (2015)	Meta-análisis	Global	Feedback energético	Reducción consumo (%)	Reducción promedio 7,4% (IC 95%: 5,9-8,9%), I ² =87%	Meta-análisis (n=42 estudios, 27 000 hogares)	Media; alta heterogeneidad, requiere adaptación contextual
Benítez-Pina (2022)	IoT prototipo	Cuba	Arduino, Android, sensores corrientes	Precisión técnica (%)	Error 0,36% respecto medidor convencional	Pruebas técnicas laboratorio	Alta; bajo costo, requiere validación de adopción

Gomez et al. (2025)	Plataforma web industrial	Colombia	Snap7, PLC Siemens S7-1200, OEE	Uptime (%), satisfacción usuarios	98% uptime, 98% satisfacción usuarios	Experimentos técnicos, retroalimentación usuarios	Muy alta; contexto colombiano, sector llenado industrial
Kim et al. (2024)	Feedback tiempo real	Corea del Sur	Medidores inteligentes, IHD aplicación	kWh por hogar, perfil demanda	Heterogéneo: 13% reducción en algunos, 7-20% aumento en otros	Estudio campo (n=1284 hogares, 6 meses)	Media; resultados contradictorios, requiere segmentación usuarios
Zhou et al. (2016)	Sistema gestión inteligente	China	IoT sensores, ARIMA predictivo, HVAC	kWh edificio comercial, patrones horarios	12% reducción mediante reordenamiento turnos climatización	Validación contra facturas (12 meses)	Alta; aplicable a gestión turnos productivos PYMEs
Paneru y Tarigan (2023)	Revisión sistemática	Global	Aplicaciones smart energy	Impacto en consumo	68% estudios reportan usabilidad, solo 23% validan ahorros	Revisión (n=183 estudios)	Alta; identifica brechas metodológicas críticas
Romero Macías y Loor (2025)	Revisión IoT	Global (énfasis Latinoamérica)	ESP32, Raspberry Pi, AWS IoT	kWh, patrones uso	Prototipos logran reducciones significativas, desafíos interoperabilidad	Revisión de literatura técnica	Alta; identifica barreras de implementación regional
Marinak is (2020)	Arquitectura big data	Europa (multipaís)	Blockchain, redes neuronales, Kafka	Predicción demanda, anomalías	Detección 87% anomalías, falsos positivos <5%	Pruebas (n=45 edificios comerciales)	Baja; alto costo (\$100 000+), enfocado grandes edificios

Bettergy (2023) - EmPOWER	Plataforma comercial	España	OCR facturas, big data, optimización tarifaria	kWh totales, ahorro económico	10-20% ahorro mediante optimización contractual	Casos comerciales PYMEs europeas	Media; diseñado para mercados con smart meters (>80%)
Alam et al. (2017)	Gestión energética residencial	Global	Raspberry Pi, sensores SCT-013, SQLite	kWh por circuito	Costos implementación <\$150 USD por hogar	Prototipos técnicos	Alta; bajo costo, requiere escalamiento a PYMEs
Ahmad et al. (2020)	Revisión forecasting	Global	ARIMA, LSTM, Random Forest, XGBoost	Error predicción (MAPE)	Modelos híbridos CNN-LSTM logran MAPE 2,8%	Revisión (n=119 estudios)	Alta; aplicable a predicción demanda PYMEs
Darby (2010)	Feedback social	Reino Unido	Comparación benchmarking pares	Reducción consumo (%)	8% reducción con mensajes personalizados vs 3% genéricos	Estudio campo (n=500 hogares, 12 meses)	Alta; aplicable a recomendaciones personalizadas PYMEs
Clean Energy Ministerial (2022) - 3M LATAM	Implementación ISO 50001	América Latina (28 sitios)	SGE ISO 50001, medición continua	MWh/ton producido	15% reducción intensidad energética, ROI 2,3 años	Certificación ISO 50001 (5 años)	Baja; inversión \$50 000-\$200 000 USD/sitio, inaccesible PYMEs
Zambra no y Real (2021)	Revisión ISO 50001 PYMEs	Ecuador	SGE ISO 50001	Barreras implementación	200-400 horas personal, \$5 000-\$10 000 capacitación	Análisis cualitativo PYMEs	Muy alta; identifica barreras económicas contexto andino

Triller y Sandkuhl (2025)	Revisión gestión energética PYMEs	Europa (multipaís)	Framework simplificado 5 pasos	Adopción medidas (%)	Propuesta diagnóstica 1 día, 3-5 EnPI críticos	Revisión (n=67 estudios)	Alta; propone simplificación aplicable a contexto local
Ketenci y Wolf (2024)	Análisis flujo energético	Alemania	Medición equipos,	kWh totales, ahorro económico	16-22% reducción verificable,	Casos estudio (n=2 PYMEs)	Alta; sectores no intensivos, métodos replicables

			mejoras operativas		payback 1824 meses	manufacturas)	
Gallego et al. (2022)	Penetración ISO 50001	Colombia	Certificación ISO 50001	Empresas certificadas	<50 empresas certificadas, barreras: desconocimiento (78%), costos (65%)	Encuestas PYMEs colombianas	Muy alta; evidencia brechas específicas Colombia
Thollander y Palm (2013)	Framework gestión industrial	Europa (multipaís)	Auditorías, Sankey diagrams, M&V	Adopción recomendaciones (%)	45-65% implementación recomendaciones	Validación (n=200 PYMEs manufacturas)	Alta; metodología sistemática aplicable PYMEs
Trianni et al. (2016)	Barreras eficiencia energética	Italia	Encuestas estructuradas	Barreras no económicas	53% varianza explicada por barreras no económicas vs 42% económicas	Encuestas (n=168 PYMEs)	Alta; identifica barreras culturales/organizacionales
Perczyk et al. (2023)	Barreras transición energética	Latinoamérica	Análisis barreros sistémicas	Barreras regionales	Clasificación : técnicas, económicas, institucionales, culturales	Revisión contextual LATAM	Muy alta; específico para economías emergentes

Capehart et al. (2020)	Marco teórico gestión energética	Global	EnPI, auditorías, M&V Protocol	kWh/unidad producida	Metodologías normalización consumo por producción	Revisión bibliográfica técnica	Alta; fundamentos teóricos aplicables
PérezLombar d et al. (2008)	Revisión consumo edificios	Europa	Auditorías energéticas multinivel	kWh totales edificios	Identificación usos significativos energía	Revisión de literatura	Media; enfocado edificios comerciales
Torres et al. (2024)	Barreras PYMEs Bogotá	Colombia (Bogotá)	Encuestas conocimiento prácticas	Conocimiento tecnologías (%)	Solo 35% conocen mejores prácticas, falta conocimiento técnico	Encuestas MiPYMEs bogotanas	Muy alta; contexto específico población objetivo
Vanegas et al. (2012)	Eficiencia microempresas	Colombia (Medellín)	Auditorías simplificadas	Potencial ahorro (%)	15-25% potencial ahorro, barreras económicas identificadas	Auditorías (microempresas manufactureras)	Muy alta; documenta potencial ahorro sector manufacturero local
OECD (2024)	Política PYMEs LATAM	América Latina y Caribe	Indicadores digitalización	Acceso tecnología (%)	99,5% empresas son PYMEs, 60% empleo formal, barreras digitales críticas	Indicadores macroeconómicos regionales	Muy alta; contexto político-económico regional
CIPE (2024)	Digitalización PYMEs	Colombia	Adopción herramientas digitales	Desafíos adopción	>4 000 empresarios enfrentan desafíos significativos adopción digital	Caracterización empresarial	Muy alta; evidencia brecha digital específica Colombia

Fichera et al. (2020)	Comunidades energéticas	Italia	Prosumers, gestión comunitaria	Desafíos implementación	Adaptación ISO 50001 a contextos no productivos requiere ajustes EnPI	Estudio caso comunidades	Media; enfocados prosumidores, no PYMES industriales
IEA (2023)	Eficiencia energética global	Global	Indicadores macroeconómicos	Intensidad energética	Eficiencia energética como estrategia principal reducción emisiones	Informe técnico internacional	Media; marco conceptual general, no específico PYMES

Nota. La tabla sintetiza los 30 estudios incluidos en la revisión sistemática PRISMA 2020. La columna "Aplicabilidad a PYMES colombianas" evalúa la relevancia contextual mediante tres categorías: muy alta (directamente aplicable al contexto colombiano), alta (aplicable con adaptaciones menores), media (requiere adaptaciones significativas) y baja (limitada aplicabilidad por contexto o escala).

Metodología

Enfoque y Alcance de la Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, con enfoque mixto que integra componentes cuantitativos y cualitativos. El diseño corresponde a un estudio no experimental de alcance descriptivo-exploratorio, orientado a evaluar la viabilidad técnica de un sistema digital de gestión energética mediante el uso de datos sintéticos y la validación a través del Método Delphi. Debido a que el estudio no se basa en datos de PYMES reales, sino en datos sintéticos que representaban patrones de consumo energético en PYMES industriales de Bogotá.

El enfoque cuantitativo se realiza en el análisis estadístico de los datos sintéticos generados: cálculo de EnPI normalizados por producción, modelado de líneas base energéticas basados en ISO 50006 y validación numérica de la lógica de alertas de variabilidad tarifaria. El enfoque cualitativo se realiza en la verificación del sistema mediante el Método Delphi, a través del juicio de los profesionales en sistema y energías, estos últimos certificados en ISO que validaran la funcionalidad técnica y alineación del sistema con los estándares internacionales. Este enfoque es consecuente con proyectos de desarrollo tecnológico en etapas tempranas, donde la aprobación se hace mediante expertos cuando no se dispone de datos reales de campo. (Linstone & Turoff, 2002; Hsu & Sandford, 2007).

Población y Muestra

Dado que el desarrollo del proyecto se basa en datos sintéticos, la noción de población y muestra se hace en dos niveles. El primer nivel corresponde al conjunto de datos sintéticos de consumo energético en PYMES en Bogotá D.C. Y el segundo nivel, que constituye la muestra operativa del estudio, corresponde a los profesionales sistema y energías que harán la validación Delphi del sistema.

Los datos usados en el sistema simulan el comportamiento energético de 50 PYMES industriales de Bogotá, cifra razonable con la escala de estudios piloto de gestión energética reportados en la investigación (Trianni et al., 2016; Thollander & Palm, 2013). Estos datos artificiales fueron generados a partir de criterios del sector industrial bogotano rangos de consumo, turnos de producción, variabilidad tarifaria estacional y no corresponden a empresas reales. Su objetivo es validar la arquitectura del sistema, la correcta implementación de EnPI y el comportamiento funcional de las alertas y visualizaciones.

El método Delphi, está compuesto por profesionales, cuyos criterios de inclusión contemplan: título profesional en Ingeniería de Sistemas, Ingeniería Industrial o Ingeniería Eléctrica/Energética; experiencia mínima de un año en gestión energética industrial o desarrollo de sistemas de información; conocimiento certificable de las normas ISO 50001, ISO 50002 o ISO 50006.

Instrumentos

Para la recolección de información se emplearán los siguientes instrumentos. En primer lugar, el conjunto de datos sintéticos: constituye la fuente de entrada primaria del sistema y fue estructurado para representar 50 perfiles de PYMES industriales bogotanas con variables de consumo mensual en kWh, costos de facturación en pesos colombianos, indicadores de producción por turno y parámetros de variabilidad tarifaria estacional asociados a la dinámica del Fenómeno de El Niño. Los registros sintéticos fueron generados bajo distribuciones estadísticas coherentes con los rangos de consumo documentados por la UPME (2022) para el sector industrial bogotano, y constituyen el insumo sobre el cual el sistema calcula EnPI, modela líneas base y genera alertas de variabilidad. En segundo lugar, el cuestionario estructurado de validación Delphi instrumento diseñado para que los expertos evalúen la pertinencia técnica de los EnPI implementados, la coherencia metodológica con ISO 50001, ISO 50002 e ISO 50006, la usabilidad de la interfaz de visualización y la viabilidad operativa del sistema para el contexto de PYMES industriales colombianas. Las entrevistas incorporan preguntas abiertas que permiten a los expertos registrar observaciones, correcciones técnicas y sugerencias de mejora.

Técnicas para el Análisis de la Información

El análisis de datos se realizará mediante métodos cuantitativas y cualitativas. Para el ítem cuantitativo se tendrá en cuenta lo siguientes procedimientos: estadística descriptiva: cálculo de medias, desviaciones estándar, rangos de consumo mensual en kWh y costo en pesos colombianos, distribución de EnPI calculados por perfil de empresa simulada.

Para el ítem cualitativo se realizará por medio de las entrevistas Delphi, que determinaran la pertinencia del sistema para las PYMES en Colombia.

Desarrollo de la Aplicación

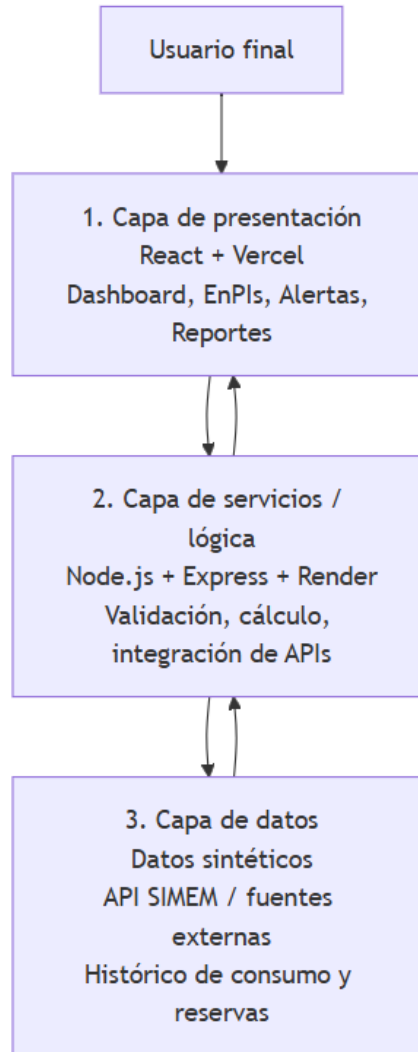
El desarrollo de la aplicación web del proyecto se realizó mediante una metodología ágil e incremental, orientada a la construcción progresiva de funcionalidades, la validación continua de los módulos implementados y la incorporación de ajustes a partir de pruebas técnicas y retroalimentación del proceso de desarrollo. La solución se enfocó en la creación de una plataforma digital para la visualización, análisis y apoyo a la gestión de información relacionada con el consumo energético, los indicadores energéticos y las alertas asociadas al comportamiento de los datos.

Desde el punto de vista arquitectónico, la aplicación fue estructurada en tres capas. La primera corresponde a la capa de presentación, desarrollada en React y desplegada en Vercel, encargada de la interacción visual con el usuario y la visualización de tableros, alertas y métricas. La segunda es la capa de servicios y lógica de negocio, implementada en Node.js con Express y desplegada en Render, responsable de recibir peticiones, procesar datos, consultar servicios externos y retornar respuestas estructuradas. La tercera capa corresponde a la persistencia y fuentes de datos, compuesta por los conjuntos de datos sintéticos del proyecto y por la integración con APIs externas, especialmente la API de SIMEM para el componente de reservas hídricas.

Arquitectura de la Solución

Figura 2

Arquitectura de la aplicación



La arquitectura de la solución se organiza en tres capas: presentación, servicios y datos. La capa de presentación fue desarrollada en React y desplegada en Vercel; la capa de servicios e inteligencia de negocio se implementó en Node.js con Express y se desplegó en Render; y la capa de datos está conformada por fuentes sintéticas y APIs externas, incluyendo SIMEM. Esta separación permitió mantener independencia entre la interfaz, la lógica de procesamiento y las fuentes de información.

Implementación del Frontend

La interfaz de usuario se desarrolló en React, con una estructura modular orientada a dashboards operativos para la consulta de información energética. El frontend incluye vistas para el panel principal, estadísticas, alertas, recomendaciones e impacto ambiental, permitiendo al usuario navegar entre diferentes niveles de análisis dentro del mismo sistema. La aplicación fue desplegada públicamente en Vercel y actualmente puede accederse desde: <https://proyecto-grado-backup.vercel.app/>.

Figura 3

Captura del dashboard energético principal

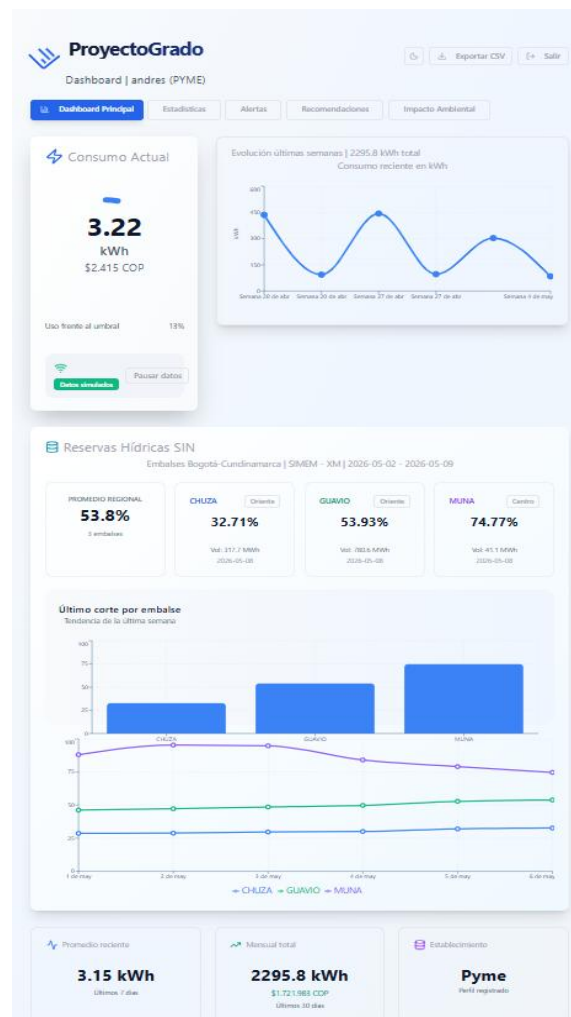


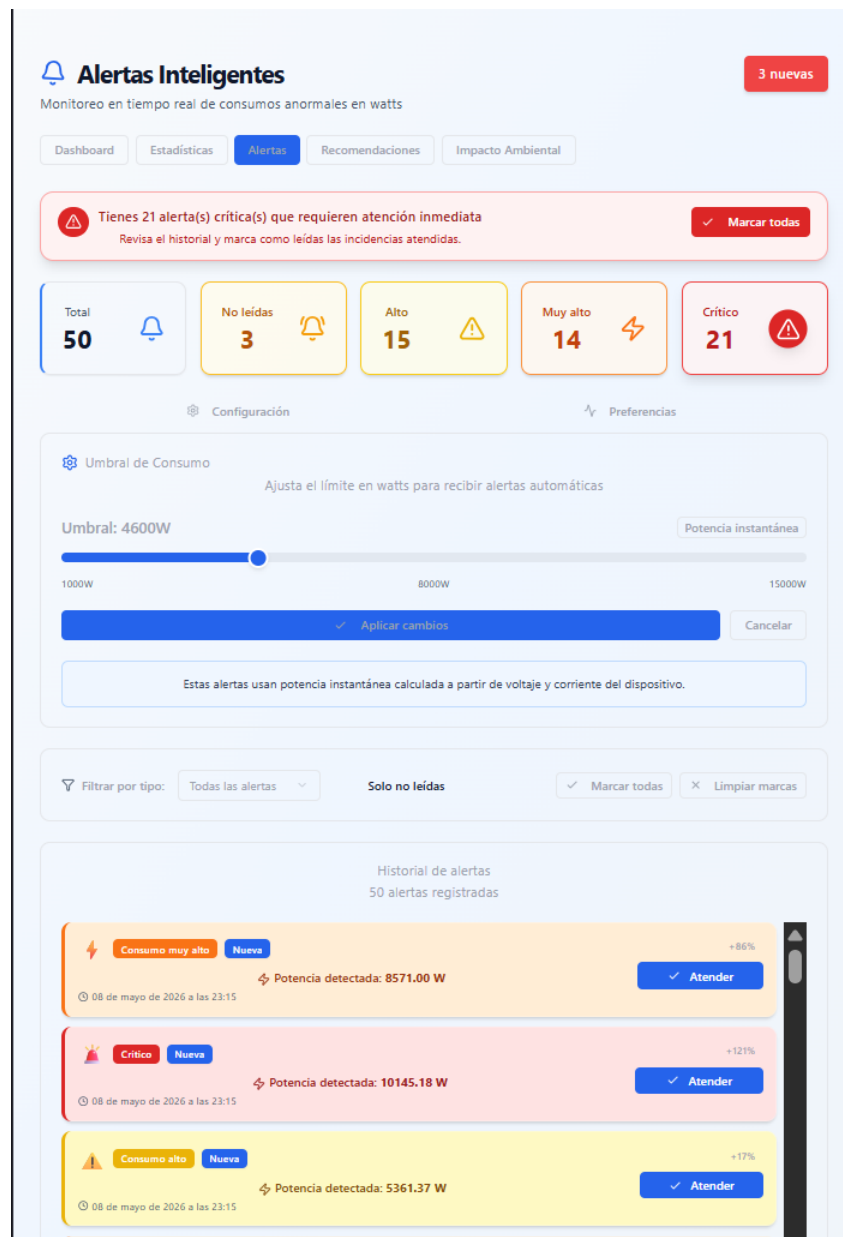
Figura 4

Visualización de indicadores de desempeño energético EnPI



Figura 5

Sistema de alertas energéticas



La interfaz fue diseñada para mostrar información resumida y detallada de manera progresiva, priorizando la lectura rápida de indicadores críticos y la identificación de tendencias. Esta lógica visual facilita la interpretación de datos por parte del usuario y permite relacionar consumo, costo, alertas y recomendaciones dentro de un mismo entorno.

Implementación del Backend

La capa de servicios fue implementada con Node.js y Express, organizando los endpoints por módulos funcionales. En particular, se desarrolló un servicio para la consulta de reservas hídricas del sistema SIMEM, el cual procesa los parámetros de entrada, consulta la API externa, normaliza los datos obtenidos y devuelve una estructura unificada al frontend. Este servicio demuestra información del sistema energético aumentado al análisis de consumo eléctrico.

Figura 6

Captura de pantalla de consumo de API

```
PS C:\Users\andre\Downloads\Project\proyectoGrado\backend> npm run dev
>>
]
Consultando SIMEM con: {
  API_URL: 'https://www.simem.co/backend-files/api/PublicData',
  DATASET_ID: 'c51127',
  startDate: '2026-05-01',
  endDate: '2026-05-06'
}
EMBALSES DISPONIBLES: [
  'AGREGADO_SIN | undefined',
  'AGREGADO | undefined',
  'TRONERAS | undefined',
  'GUAVIO | undefined',
  'SANLOREN | undefined',
  'PORCE2 | undefined',
  'MUNA | undefined',
  'PUNCHINA | undefined',
  'URRA1 | undefined',
  'RIOGRAN2 | undefined',
  'PENOL | undefined',
  'ELQUIMBO | undefined',
  'ITUANGO | undefined',
  'CHUZA | undefined',
  'PLAYAS | undefined',
  'ESMERALD | undefined',
  'BETANIA | undefined',
  'CALIMA1 | undefined',
  'SALVAJIN | undefined',
  'PRADO | undefined',
  'ALTOANCH | undefined',
  'MIEL1 | undefined',
  'PORCE3 | undefined',
  'SOGAMOSO | undefined',
  'MIRAFLOR | undefined'
]
```

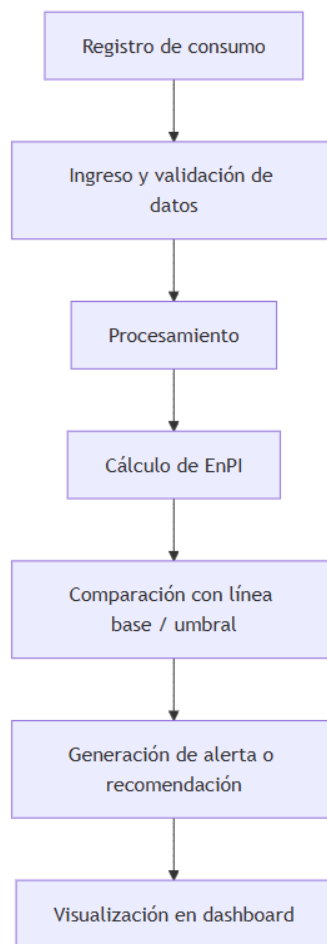
La consulta de la API se complementa mediante una capa intermedia de validación, lo que permite adaptar la información a la dimensión requerida para la interfaz de usuario. Este mecanismo también facilita la optimización del sistema, el control de errores y la mejora de las respuestas obtenidas desde los otros servicios.

Flujo de Procesamiento

El sistema empieza desde que el usuario ingresa la información energética, después estos datos son procesados en el backend, donde se calculan los indicadores energéticos más importantes, como los EnPI, las tendencias de consumo y las variaciones frente a los umbrales definidos para cada caso. Finalmente, la aplicación muestra los resultados del dashboard y en el momento que muestra desviaciones, genera alertas y recomendaciones de apoyo para la toma de decisiones.

Figura 7

Diagrama de flujo de procesamiento de datos



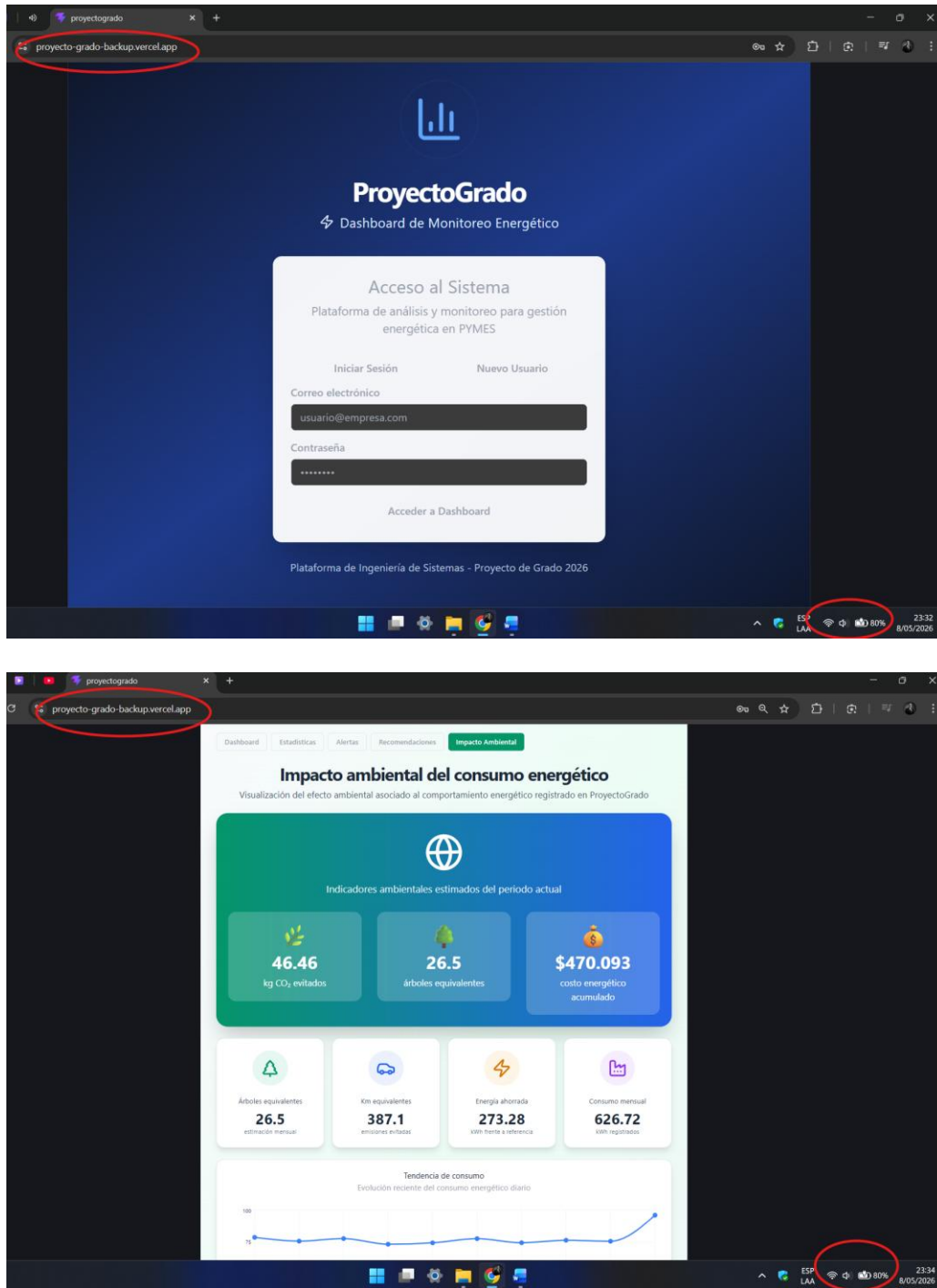
Este proceso admite conciliar la información operativa en información clara para la toma de decisiones, basando en el análisis del rendimiento energético y la identificación eficaz de posibles irregularidades en el comportamiento de consumo. Igualmente, la forma en que se organiza el flujo del sistema facilita la lectura visual de las consecuencias por parte del consumidor, algo útil cuando se necesita una revisión del estado energético.

Evidencia Funcional del Prototipo

El prototipo desarrollado demuestra que el sistema no se quedó en la etapa de diseño, sino que cuenta con una implementación operativa de sus módulos principales: el dashboard energético, la visualización de EnPI, el sistema de alertas, la integración con servicios externos vía API y los paneles de análisis. Todos estos componentes fueron construidos y probados en un entorno de despliegue real, lo que permitió comprobar su correcto funcionamiento técnico y su coherencia con los objetivos planteados en el proyecto.

Figura 8

Evidencia del funcionamiento del prototipo desplegado



Distribución de Roles

En el desarrollo del proyecto se definieron responsabilidades según el perfil de formación de cada integrante. El estudiante de Ingeniería de Sistemas se encargó del diseño y construcción de la aplicación web, incluyendo el frontend, el backend, la integración con servicios externos y el despliegue en producción. Desde Ingeniería en Energías se apoyó la selección y validación de los indicadores energéticos utilizados en el sistema. Por su parte, Ingeniería Industrial contribuyó a organizar los flujos de uso, analizar el funcionamiento operativo y elaborar los reportes de resultados.

Esta forma de trabajo permitió abordar al mismo tiempo la parte tecnológica y el análisis de la información, dando coherencia entre la solución digital y los objetivos de gestión energética planteados para las PYMES industriales. Gracias a esta unión, la aplicación se sintetizó como un instrumento que adopta una visualización de información, consumo de servicios y presentación de resultados en una interfaz web, con componentes que pueden ser consultados y efectuados.

Resultados

Resultados del Prototipo

El prototipo del sistema de gestión energética se finalizó como una aplicación web organizada en tres capas: una interfaz desarrollada en React y desplegada en Vercel, un backend construido en Node.js con Express y alojado en Render, y una base de datos sintéticos de PYMES industriales, complementados con la API del SIMEM para reservas hídricas cercanas a Bogotá D. C.

En cuanto al desempeño, el dashboard principal incluye secciones para visualizar el consumo y el costo energético simulado, consultar hitos de desempeño EnPI, recibir alertas relacionadas con la variabilidad de precios, revisar recomendaciones ejecutivas y observar un resumen del impacto estimado. La Figura 9 presenta la vista general del tablero en producción, donde se aprecia la carga adecuada de los gráficos, las tarjetas de resumen y los elementos de navegación.

Figura 9

Indicadores de desempeño y variabilidad

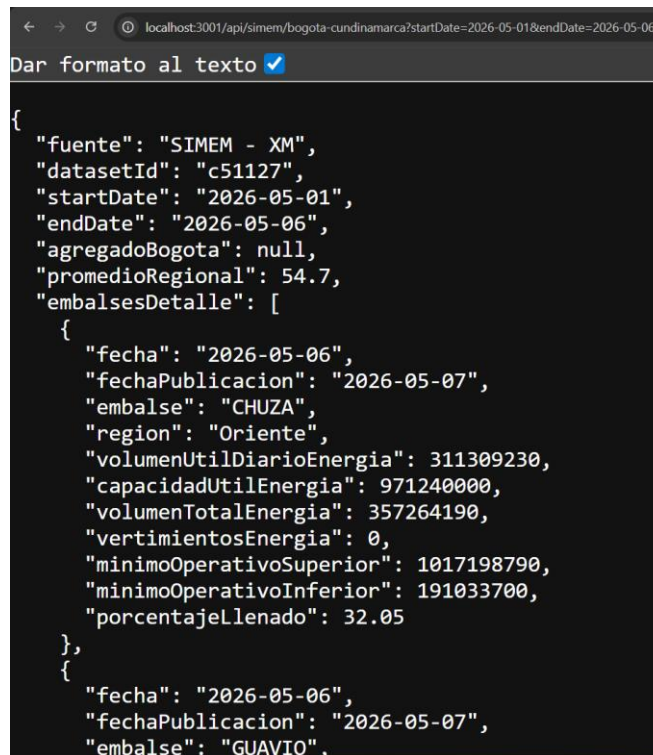


La comunicación entre la interfaz y el servidor se comprobó a partir de pruebas sobre los endpoints construidos en Express. En particular, se desarrolló un servicio para la ruta `/api/simem/bogota-cundinamarca`, encargado de consultar la API de SIMEM, procesar la respuesta y devolver al frontend un objeto JSON unificado y listo para su uso.

En las pruebas realizadas sobre el sistema ya desplegado no se evidenciaron fallas críticas que afectaran el funcionamiento normal de la aplicación. Las vistas cargaron en tiempos adecuados para un uso operativo y los distintos módulos del frontend consumieron sin problemas los servicios expuestos por el backend.

Figura 10

Respuesta del endpoint, en el que se observan campos como fuente, datasetId, startDate, endDate, promedioRegional, embalsesDetalle.



```
{
  "fuente": "SIMEM - XM",
  "datasetId": "c51127",
  "startDate": "2026-05-01",
  "endDate": "2026-05-06",
  "agregadoBogota": null,
  "promedioRegional": 54.7,
  "embalsesDetalle": [
    {
      "fecha": "2026-05-06",
      "fechaPublicacion": "2026-05-07",
      "embalse": "CHUZA",
      "region": "Oriente",
      "volumenUtilDiarioEnergia": 311309230,
      "capacidadUtilEnergia": 971240000,
      "volumenTotalEnergia": 357264190,
      "vertimientosEnergia": 0,
      "minimoOperativoSuperior": 1017198790,
      "minimoOperativoInferior": 191033700,
      "porcentajeLlenado": 32.05
    },
    {
      "fecha": "2026-05-06",
      "fechaPublicacion": "2026-05-07",
      "embalse": "GUAUVIO",

```

Resultados de Procesamiento de Datos e Indicadores Energéticos

A nivel de procesamiento de datos, el sistema logró leer y transformar los registros sintéticos correspondientes a PYMES industriales de Bogotá, calculando para cada empresa indicadores como consumo mensual en kWh, costo en pesos, producción equivalente y EnPI normalizados, por ejemplo, kWh/unidad producida. Estos indicadores alimentan tanto las tarjetas de resumen del dashboard como los gráficos de tendencias implementados en la interfaz.

La medida de línea base permitió definir una referencia para cada tipo de empresa simulada. A partir de estas relaciones, el sistema emitió alertas cuando el EnPI calculado destacó

los umbrales establecidos inicialmente, las cuales se muestran en la sección de alertas junto con una breve representación del evento y el nivel de prioridad.

En cuanto a la integración de la API con SIMEM, el backend procesó las respuestas para un rango de fechas definido, filtrando únicamente los embalses relevantes para Bogotá, Cundinamarca y calculando un promedio regional de nivel de llenado de los embalses. Estos resultados se pudieron observar en un módulo específico del dashboard, lo que demuestra que el prototipo es capaz de combinar datos sintéticos con información real proveniente de servicios públicos.

Figura 11

Evidencia de API del SIMEM en el sistema



Resultados de los Indicadores

A partir del análisis de los datos, el sistema permitió identificar algunos patrones en el comportamiento energético de las empresas. Especialmente, se identificaron casos con consumos diarios visiblemente por encima del promedio del grupo, lo que se evidencia en las tablas de clasificación de consumo y en los gráficos comparativos de EnPI.

Figura 12

Estadísticas con picos de consumo



En segundo lugar, el análisis temporal mostró y periodos de facturación con mayor intensidad de consumo, asociados a turnos de producción ampliados o a simulaciones de escenarios de Fenómeno de El Niño. Estos patrones se representaron mediante gráficos, permitiendo visualizar rápidamente los consumos y los costos simulados se incrementan de forma más pronunciada.

Figura 13

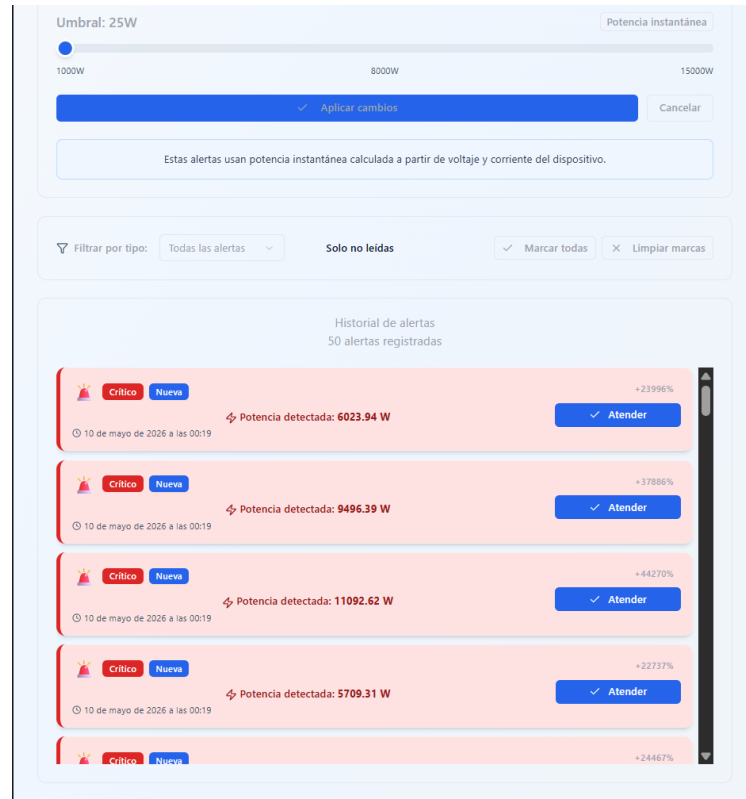
Tendencias de consumo



Finalmente, el sistema generó alertas de variabilidad tarifaria y desviaciones cuando los EnPI simulados se alejaron de los rangos considerados aceptables. La Figura 14 resume el número de alertas generadas por tipo, por ejemplo, “alto consumo específico”, “incremento de costo” y por empresa simulada en el periodo analizado.

Figura 14

Sistema de alertas



Resultados de la Validación por Expertos

Para la validación del sistema se aplicó un diseño de investigación basado en el Método Delphi, complementado con un instrumento específico de evaluación de usabilidad y calidad técnica del prototipo. El panel estuvo conformado por expertos interdisciplinarios, incluyendo profesionales del área de Ingeniería de Sistemas y especialistas en Ingeniería de Energías con experiencia certificada en normas ISO 50001, ISO 50002 e ISO 50006

En la primera ronda Delphi, los expertos revisaron la lógica de cálculo de EnPI, la definición de líneas base y la coherencia de las recomendaciones automatizadas con los lineamientos de las normas ISO. En general, los expertos consideraron que los indicadores

implementados son técnicamente consistentes y que la estructura del sistema es adecuada para un entorno de simulación, sugiriendo ajustes puntuales

Paralelamente, el instrumento aplicado para evaluar la usabilidad y la calidad técnica del sistema arrojó resultados favorables en los distintos criterios considerados. La Tabla 2 presenta de forma resumida los promedios obtenidos y su desviación estándar para cada dimensión evaluada.

Tabla 2

Datos de juicio de los expertos

Criterio	Promedio (1–5)	Desviación estándar
Usabilidad percibida (U1–U6)	4.50	0.55
Calidad técnica (Q1–Q6)	4.17	1.17
Valor global del sistema (G1)	4.75	0.00

La evaluación por parte de los expertos evidencia una percepción positiva del sistema en sus tres aspectos fundamentales. En usabilidad, el sistema alcanzó un promedio de 4,50 sobre 5, lo que indica que el experto lo percibe como una herramienta fácil de usar, con funciones integradas y con potencial de uso frecuente en ambientes industriales. La calidad técnica obtuvo un promedio de 4,17, valor que manifiesta una evaluación de la arquitectura y del funcionamiento en general, sin embargo, con algunas diferencias de opinión en ítems relacionados con la cantidad y facilidad de entendimiento de la expresión técnica utilizando la interfaz. Finalmente, el valor global del sistema se calificó con 4,75 sobre 5, lo que sugiere que,

en términos generales, el prototipo es visto como una herramienta que aporta un beneficio concreto a la gestión energética de las PYMES.

De la misma manera, esta evaluación de software permitió revisar con mayor detalle la lógica matemática y los algoritmos de cálculo efectuados en el aplicativo, tomando como base los criterios ajustados de una auditoría energética. Los principales comentarios y ajustes planteados fueron los siguientes.

En cuanto a la normalización de la línea base y los datos de consumo los expertos validadores están de acuerdo en que el uso del consumo en kW por cada unidad de salida en producción es coherente y está de acuerdo a los lineamientos de la ISO 50001 sin embargo recomendaron la mejora del modelo cambiando de una regresión lineal a otros modelos de regresión que incorporen más variables como los turnos de operación o uso de aire acondicionado para que de esta forma se pueda interpretar de mejor forma los datos y no confundir caídas en producción como mejoras en el desempeño energético.

Respecto a la medición y verificación de ahorros, el panel llamó la atención sobre la dificultad de cuantificar de manera aislada el impacto de medidas como el apagado operativo. Como alternativa, sugirió integrar en el backend el método de Sumas Acumuladas, que permite seguir la desviación del consumo acumulado frente a la línea base energética y separar mejor el efecto de las acciones implementadas de las variaciones normales de la producción.

En el tratamiento de datos atípicos ya anómalos los validadores recomendaron tener la opción en el aplicativo de arranque y parada de planta ya que tener solo los datos de la factura eléctrica se pueden tener meses con menor desempeño, pero con costes de energía similares lo cual es importante entrar a analizar.

Mitigación de Riesgo Económico: La integración de tomar y mostrar datos mediante API directamente del SIMEN para los expertos fue una integración que aporta gran valor para la solución ya que el monitoreo de embalses que son críticos para el suministro eléctrico permite una toma de decisiones más acertada e informada para los usuarios ya que permite anticipar incrementos tarifarios principalmente relacionados al fenómeno del niño

Discusión

Desempeño Técnico del Prototipo

A partir de la simulación con datos sintéticos y de la validación posterior mediante el método Delphi, fue posible analizar la viabilidad del sistema tanto desde el punto de vista técnico como desde su ajuste a la normativa de gestión energética. En esta sección se relaciona el comportamiento del diseño digital con las exigencias de los estándares internacionales aplicables al proyecto.

Desde el área de Ingeniería de Sistemas, el proyecto, resulta viable para soportar un sistema de gestión energética con potencial de crecimiento. El hecho para desplegar la solución que la aplicación puede ejecutarse en posibles entornos reales y no solo con datos ficticios. Las calificaciones de calidad técnica y usabilidad dadas por los expertos muestran que la herramienta ayuda a reducir parte de la brecha de usabilidad en el estado del arte. A diferencia de plataformas IoT mucho más complejas, que suelen requerir inversiones poco accesibles para las pequeñas PYMES Bogotanas, la solución presenta como una alternativa más leve y de menor costo.

Rigor normativo y madurez del modelado

El panel validó que los EnPI principales expresados en kWh por unidad producida son sólidos con los lineamientos de la ISO 50006, incluso trabajando con datos sintéticos. Aun así, los expertos fueron claros, si el sistema aspira a un nivel de rigor comparable al de una auditoría energética completa, el modelado tiene que ir más allá de los indicadores simples.

Específicamente, señalaron la necesidad de incorporar regresión múltiple con variables como el área de la planta y los turnos de operación, porque sin esa normalización, una caída en la producción puede leerse fácilmente como una mejora en eficiencia cuando no lo es.

Interpretación de los Patrones Energéticos Simulados

Aunque los datos empleados son sintéticos, los patrones que el sistema logra identificar empresas con consumos elevados, periodos de mayor intensidad y alertas por desviaciones respecto a la línea base muestran que la lógica de análisis e interpretación que se implementaron replica comportamientos que tienen sentido desde el punto de vista energético. Esto indica que los algoritmos de cálculo de los indicadores EnPI, la generación de alertas y la construcción de las líneas base se incorporaron de forma adecuada en el backend de la solución.

El limitante principal del proyecto está precisamente en el uso de datos sintéticos, lo que impide trasladar de manera directa los ahorros económicos proyectados a empresas reales. En esta primera etapa, el sistema permite validar la funcionalidad y la arquitectura, pero sería necesario comprobar su impacto con datos operativos en futuras aplicaciones en entornos reales. Aun así, los resultados obtenidos ofrecen un punto de partida muy sólido para considerar que la solución es técnicamente viable y coherente con las brechas de información detectadas en el entorno de las PYMES industriales colombianas.

Aporte de la Validación por Expertos

La validación realizada con el método Delphi y el juicio de expertos añadió un nivel extra de confianza a los resultados del proyecto. En las revisiones, los especialistas en energía señalaron que la forma en que se definieron los EnPI y se construyó la lógica de las recomendaciones es coherente con los lineamientos de las normas ISO 50001 y 50006, tal como se planteó desde el diseño del sistema. Acompañado de que, las puntuaciones obtenidas en el instrumento de usabilidad y calidad técnica muestran que, desde la mirada de los expertos validadores, el prototipo se percibe como una herramienta utilizable y sólidamente construida para el contexto de PYMES. Este tipo de validación coincide con lo que reportan otros trabajos, donde se resalta la necesidad de revisar tanto la parte técnica como la experiencia de uso en sistemas digitales de gestión energética, sobre todo cuando están dirigidos a organizaciones con recursos limitados y sin equipos de TI altamente especializados.

Ventajas y Limitaciones del Enfoque Adoptado

Una de las ventajas del enfoque utilizado es que permitió diseñar y poner a prueba el sistema digital de gestión energética sin necesitar, en esta fase, acceso a información sensible de empresas reales. Trabajar con datos sintéticos hizo posible simular y modelar distintos escenarios de consumo, tarifas y niveles de producción, reduciendo además los trámites y riesgos legales asociados al manejo de datos empresariales que son datos sensibles de las organizaciones.

Al mismo tiempo, esta elección es también la principal limitación del estudio. Los resultados energéticos y económicos que se presentan son producto de simulaciones y, por el mismo motivo, no pueden trasladarse de forma directa a PYMES industriales concretas. El

prototipo permite comprobar que la arquitectura y la lógica funcional del sistema operan correctamente, pero no reemplaza una evaluación basada en facturación y producción reales.

Conclusiones

El proyecto logró lo que se propuso. Se construyó un sistema de gestión energética pensado para PYMES industriales de Bogotá, y tres expertos certificados en normas ISO lo revisaron y lo aprobaron. Evaluaron la facilidad de uso, la solidez técnica y el valor que puede aportar en la práctica, y en los tres frentes el concepto fue positivo. El hecho de que un sistema construido con datos simulados pase ese filtro dice bastante sobre la solidez de la propuesta.

El primer objetivo tenía que ver con construir una línea base energética y definir indicadores de consumo por unidad producida, siguiendo los lineamientos de la ISO 50006, y eso se logró. Pero los expertos dejaron una observación importante sobre la mesa: el modelo actual puede confundir una baja en la producción con una mejora en eficiencia, y eso es un error que en la práctica costaría caro. La solución que propusieron es ampliar el modelo para que considere más variables del contexto real de cada empresa, como el tamaño de la planta o cómo organiza sus turnos de trabajo.

El segundo objetivo era construir la arquitectura del sistema, y ahí el resultado fue sólido. Lo que más valoraron los expertos fue la conexión con los datos oficiales de los embalses del país, porque eso le da al sistema algo que otros prototipos no tienen: la capacidad de anticiparse a los aumentos de tarifa antes de que lleguen a la factura. Para una PYME que opera con márgenes ajustados, saber que la energía va a subir con semanas de antelación puede marcar una diferencia real.

El tercer objetivo era que el sistema identificara patrones de consumo y generara recomendaciones operativas. Eso funcionó, y los expertos consideraron que las sugerencias del sistema tienen sentido técnico. Eso sí, hicieron una advertencia práctica: mover operaciones a

horarios de menor tarifa puede salir más caro si se considera lo que vale pagar nómina en turno nocturno. También recomendaron agregar una herramienta que permita medir con precisión cuánto ahorro generó realmente cada acción, separándolo de lo que simplemente bajó porque se produjo menos.

Referencias

Ahmad, T., Zhang, H., & Yan, B. (2020). A review on renewable energy and electricity requirement forecasting models for smart grids and buildings. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102052. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102052>

Alam, M. R., St-Hilaire, M., & Kunz, T. (2017). Computational methods for residential energy cost optimization in smart grids: A survey. *ACM Computing Surveys*, 49(1), 1-34. <https://doi.org/10.1145/3001583>

Beltozar-Clemente, S., Caira-Mamani, E., Mendigure-Fernández, R., Castro-Gutiérrez, V., & Esenarro-Vargas, D. (2025). Desarrollo de una aplicación móvil multiplataforma para la gestión inteligente del consumo de energía eléctrica domiciliaria. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, 13(25), 112-128. <https://doi.org/10.36825/RITI.13.25.009>

Benítez-Pina, I. F. (2022). Sistema de uso doméstico para el monitoreo del consumo de energía eléctrica. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 43(2), 45-58. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282022000200045

Bettergy. (2023). EmPOWER: Gestor energético virtual para PYMEs que provee servicios para tener control sobre la contratación de energía, sus datos de consumo y conexión con servicios innovadores de eficiencia energética.

<https://bettergy.es/2023/12/07/empowerhttps://bettergy.es/2023/12/07/empower-gestor-energetico-virtual-para-pymes/gestor-energetico-virtual-para-pymes/>

Briano, J. I., Báez, M. J., & Rodríguez, R. A. (2016). Smart grids en Latinoamérica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 13(1), 17-25.

<https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.09.004>

Brooke, J. (1996). SUS: A "quick and dirty" usability scale. En P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester & I. L. McClelland (Eds.), *Usability evaluation in industry* (pp. 189-194). Taylor & Francis.

Capehart, B. L., Turner, W. C., & Kennedy, W. J. (2020). *Guide to energy management* (8ª ed.). The Fairmont Press.

Clean Energy Ministerial. (2022). *ISO 50001 Energy Management System – Case Study: 3M Company (Latin America)*.

<https://www.cleanenergyministerial.org/content/uploads/2022/09/cem-em-casestudy-3mhttps://www.cleanenergyministerial.org/content/uploads/2022/09/cem-em-casestudy-3m-latam.pdf>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2023). *Eficiencia energética en América Latina y el Caribe: avances y oportunidades*. Naciones Unidas.

<https://www.cepal.org/es/publicaciones/eficiencia-energetica-america-latina-caribe>

Corporación Andina de Fomento [CAF]. (2025). *Energía sostenible para todos: Transición energética en América Latina*. CAF Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe. <https://www.caf.com/es/conocimiento/publicaciones/energia-sostenible/>

Center for International Private Enterprise [CIPE]. (2024). *Characterization of SMEs in Colombia and their digital adoption*. <https://www.cipe.org/resources/characterization-of-smeshttps://www.cipe.org/resources/characterization-of-smes-in-colombia-and-their-digital-adoption/in-colombia-and-their-digital-adoption/>

Darby, S. (2010). Smart metering: What is the potential for householder engagement? *Building Research & Information*, 38(5), 442-457. <https://doi.org/10.1080/09613218.2010.492660>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2021). *Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH): Mercado laboral por regiones*.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/mercado-laboral>

Duarte, R., Sánchez-Chóliz, J., & Sarasa, C. (2021). *El consumo de electricidad en América Latina: Determinantes y proyecciones*. Banco Interamericano de Desarrollo.
<https://doi.org/10.18235/0003142>

Fichera, A., Pluchino, A., & Volpe, R. (2020). From self-consumers to prosumers: The energy management challenges in the building sector. *Energies*, 13(9), 2157.
<https://doi.org/10.3390/en13092157>

Gallego, L. M., Vera, S., & Gómez, J. D. (2022). Barreras y oportunidades para la implementación de sistemas de gestión energética ISO 50001 en Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 24(2), e20112832. <https://doi.org/10.25100/iyv.v24i2.11232>

Gomez, J. C., Rodríguez, M. A., & López, D. F. (2025). AutOEE: Sistema automatizado para la medición de eficiencia operativa en la industria de llenado mediante tecnología Snap7. *Revista Ingenio UFPS*, 22(1), 78-92.
<https://revistas.ufps.edu.co/index.php/ingenio/article/view/2780>

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill Education.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. En V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

International Energy Agency [IEA]. (2023). *Energy efficiency 2023*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>

International Organization for Standardization [ISO]. (2018). *ISO 50001:2018 Energy management systems — Requirements with guidance for use*. ISO. <https://www.iso.org/standard/69426.html>

International Organization for Standardization [ISO]. (2018). *ISO 50002:2014 Energy audits — Requirements with guidance for use*. ISO. <https://www.iso.org/standard/60088.html>

International Organization for Standardization [ISO]. (2018). *ISO 50006:2014 Energy management systems — Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) General principles and guidance*. ISO. <https://www.iso.org/standard/51869.html>

Karlin, B., Zinger, J. F., & Ford, R. (2015). The effects of feedback on energy conservation: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, 141(6), 1205-1227. <https://doi.org/10.1037/a0039650>

Ketenci, Y. C., & Wolf, S. (2024). Energy efficiency in non-energy-intensive SMEs: Analysis of energy audits and implementation barriers in German manufacturing companies.

Energy Efficiency, 17(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10179-4>

Kim, M. J., Park, H. C., & Chung, M. H. (2024). Effect of the energy feedback with inhome displays on residential electricity use: A field experiment in South Korea. *Energy Policy*, 185, 113956. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113956>

Marinakis, V. (2020). Big data for energy management and energy-efficient buildings. *Energies*, 13(7), 1555. <https://doi.org/10.3390/en13071555>

Ministerio de Minas y Energía. (2017). *Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética 2017-2022*. República de Colombia.
<https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/23971272/PAI+PROURE+2017+-+2022.pdf>

Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). *Applied statistics and probability for engineers* (6^a ed.). John Wiley & Sons.

Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2024). *SME Policy Index: Latin America and the Caribbean 2024*. OECD Publishing.
<https://doi.org/10.1787/ba028c1d-en>

Paneru, S., & Tarigan, A. K. M. (2023). A systematic review on the impact of smart energy applications on residential energy consumption. *Energy Informatics*, 6(1), 18.
<https://doi.org/10.1186/s42162-023-00274-8>

Perczyk, D., Dubrovsky, H., & Bianchi, M. P. (2023). Barreras para la implementación de medidas de eficiencia energética en empresas argentinas: Un análisis multidimensional. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 37(1), 45-67.

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>

Rodríguez, Y., Arias, J., & Parra, D. (2020). Diagnóstico energético bajo la norma ISO 50001 en la Alcaldía de Bucaramanga, Colombia. *Revista UIS Ingenierías*, 19(4), 203-216.

<https://doi.org/10.18273/revuin.v19n4-2020019>

Romero Macías, E. R., & Loor, K. (2025). Internet de las cosas (IoT) aplicado en hogares inteligentes: Revisión del estado del arte sobre gestión energética. *Dominio de las Ciencias*, 11(1), 234-256. <https://doi.org/10.23857/dc.v11i1.3567>

Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). *The Scrum Guide: The definitive guide to Scrum: The rules of the game*. Scrum.org. <https://scrumguides.org/scrum-guide.html>

Thollander, P., & Palm, J. (2013). *Improving energy efficiency in industrial energy systems: An interdisciplinary perspective on barriers, energy audits, energy management, policies, and programs*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4162-5>

Torres, M. C., Ramírez, L. F., & Castro, H. A. (2024). Barreras para la adopción de prácticas de eficiencia energética en micro, pequeñas y medianas empresas de Bogotá. *Revista Científica*, 49(1), 78-95. <https://doi.org/10.14483/23448350.19876>

Trianni, A., Cagno, E., & Farné, S. (2016). Barriers, drivers and decision-making process for industrial energy efficiency: A broad study among manufacturing small and medium-sized enterprises. *Applied Energy*, 162, 1537-1551. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.078>

Trianni, A., Cagno, E., Thollander, P., & Backlund, S. (2013). Barriers to industrial energy efficiency in foundries: A European comparison. *Journal of Cleaner Production*, 40, 161-176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.040>

Triller, J., & Sandkuhl, K. (2025). Energy management in small and medium-sized enterprises: A systematic literature review. *Sustainability*, 17(2), 456. <https://doi.org/10.3390/su17020456>

Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME]. (2019). *Plan Energético Nacional 2020-2050*. Ministerio de Minas y Energía. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_2020_2050.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME]. (2022). *Balance Energético Colombiano 2022*. Ministerio de Minas y Energía. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/BECO_2022.pdf

Vanegas, C. A., Restrepo, A. H., & Jaramillo, J. (2012). Diagnóstico de eficiencia energética en microempresas de Medellín, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 64, 128-139. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/14222>

Zambrano, J. E., & Real, J. A. (2021). Implementación de sistemas de gestión de energía ISO 50001 en pequeñas y medianas empresas: Barreras y facilitadores en Ecuador. *Revista Técnica Energía*, 18(1), 76-92. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v18.n1.2021.456> Zhou, K., Fu, C., & Yang, S. (2016). Big data driven smart energy management: From big data to big

insights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 215-225.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.050>

Anexos

A continuación, se adjuntan los anexos correspondientes a las validaciones correspondientes de los expertos.

FORMATO DE VALIDACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Sistema Digital de Gestión Energética para la Mitigación de Riesgos Económicos en PYMES Industriales en Bogotá D.C.

1. Presentación

La presente tiene por finalidad solicitar su valiosa colaboración como experto para la validación de un prototipo de sistema digital de gestión energética desarrollado en el marco del proyecto de grado "Sistema Digital de Gestión Energética para la Mitigación de Riesgos Económicos en PYMES Industriales en Bogotá D.C.".

El sistema está orientado a PYMES industriales ubicadas en Bogotá, y tiene como propósito apoyar la toma de decisiones en gestión energética mediante el uso de datos sintéticos, indicadores de desempeño energético (EnPIs) alineados con las normas ISO 50001, ISO 50002 e ISO 50006, y tableros de visualización que integran consumo, costos, alertas y recomendaciones. El prototipo se encuentra desplegado en un entorno web, con una arquitectura de tres capas: frontend en React (Vercel), backend en Node.js/Express (Render) e integración con fuentes de datos sintéticos y la API de SIMEM para información hídrica.

Su juicio como experto es fundamental para evaluar la claridad, pertinencia y calidad técnica del instrumento de evaluación de usabilidad y calidad del software, así como la adecuación del prototipo al contexto de PYMES industriales colombianas.

2. Objetivo de la validación

Establecer la validez de contenido del instrumento de evaluación de usabilidad y calidad técnica del prototipo web "ProyectoGrado", verificando que sus ítems sean sintáctica y semánticamente correctos, completos, coherentes y pertinentes para valorar la experiencia de uso y la calidad percibida del sistema digital de gestión energética en PYMES industriales.

3. Instrucciones para el evaluador experto

Antes de diligenciar el formato, se solicita al experto:

- Revisar brevemente la descripción del proyecto y su arquitectura (capítulo "Desarrollo de la Aplicación" del documento de grado).
- Interactuar con el prototipo web en la URL: <https://proyecto-grado-backup.vercel.app/>.
- Explorar al menos las siguientes secciones: dashboard principal, estadísticas, alertas, recomendaciones e impacto ambiental.
- Revisar el instrumento de evaluación propuesto (ítems U1–U6, Q1–Q6, G1 y preguntas abiertas O1–O3).

Posteriormente, evalúe cada ítem del instrumento de acuerdo con los criterios de sintaxis, semántica, completitud, coherencia y pertinencia, siguiendo las definiciones que se presentan a continuación.

Definiciones de criterios:

- **SINTAXIS:** la redacción del ítem es gramaticalmente correcta y permite su comprensión.
- **SEMÁNTICA:** el contenido temático, palabras y expresiones usadas en el ítem son claras y comprensibles para el usuario objetivo.
- **COMPLETITUD:** el ítem contiene todos los elementos necesarios para poder emitir una respuesta adecuada.
- **COHERENCIA:** el ítem mantiene una relación lógica interna, sin producir contradicciones en su contenido.

- PERTINENCIA: el ítem es adecuado para recolectar información sobre la usabilidad y la calidad técnica del prototipo en el contexto de gestión energética en PYMES.

Para cada ítem, marque "Sí" o "No" en cada criterio.

4. Datos del evaluador

Nombre del Evaluador: Diego Alexander Corchuelo Ayala

Formación académica: Tecnólogo en desarrollo de software

Área de experiencia principal: Developer Analyst

Años de experiencia profesional: 1 año y 3 meses

Tabla 1. Evaluación de ítems de usabilidad percibida (U1–U6)

Ítem	Redacción del ítem	Sintaxis (Sí/No)	Semántica (Sí/No)	Compleitud (Sí/No)	Coherencia (Sí/No)	Pertinencia (Sí/No)
U1	Considero que me gustaría usar este sistema con frecuencia.	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No
U2	Encontré el sistema innecesariamente complejo.	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No
U3	Creo que el sistema es fácil de usar.	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No
U4	Creo que necesitaría apoyo técnico para poder usar este sistema.	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No
U5	Las diferentes funciones del sistema (dashboard, estadísticas, alertas, recomendaciones) están bien integradas entre sí.	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No
U6	Percibí inconsistencias entre las diferentes pantallas o secciones del sistema.	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No

Tabla 2. Evaluación de ítems de calidad técnica y adecuación al contexto (Q1–Q6)

Ítem	Redacción del ítem	Sintaxis (Sí/No)	Semántica (Sí/No)	Compleitud (Sí/No)	Coherencia (Sí/No)	Pertinencia (Sí/No)
Q1	La información mostrada (kWh, costos, EnPIs, alertas) se presenta de forma clara y comprensible para el usuario objetivo.	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No
Q2	El tiempo de respuesta del sistema (carga de pantallas, gráficos, datos) es adecuado para un uso operativo en una PYME.	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No
Q3	Durante la prueba encontré errores, fallos críticos o bloqueos que impidieran el uso normal del sistema.	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No
Q4	El diseño visual del dashboard facilita la interpretación de los indicadores energéticos y tendencias de consumo.	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No
Q5	El lenguaje utilizado (términos, unidades, nomenclatura) es adecuado para el contexto de PYMES industriales colombianas.	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No
Q6	En general, considero que la calidad técnica del prototipo es suficiente para ser utilizado en una prueba piloto con usuarios reales.	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No

Tabla 3. Evaluación de ítem de valoración global (G1)

Ítem	Redacción del ítem	Sintaxis (Sí/No)	Semántica (Sí/No)	Compleitud (Sí/No)	Coherencia (Sí/No)	Pertinencia (Sí/No)
G1	En términos generales, considero que el sistema aporta valor como herramienta de apoyo a la gestión energética en PYMES industriales.	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No

6. Observaciones globales del experto sobre el instrumento

Por favor, registre a continuación sus comentarios globales sobre el instrumento (claridad general, longitud, orden de los ítems, aspectos no cubiertos, etc.):

El aplicativo cumple con lo propuesto en general, pese a que trabaja con datos ficticios la representación muestra datos relevantes para el ahorro y manejo del consumo de energía en las empresas que decidieran usar un software como este.

Firma del experto: Diego Corchuelo Fecha: 09/05/2026

INSTRUMENTO DE VALIDACIÓN: MÉTODO DELPHI (RONDA 1)

VERSIÓN TÉCNICA AVANZADA

Proyecto: Sistema Digital de Gestión Energética para la Mitigación de Riesgos Económicos en PYMES Industriales en Bogotá D.C.

1. PERFIL DEL EXPERTO VALIDADOR

Nombre Completo: Sebastián Gómez
Años de experiencia en Gestión Energética o Industrial: 1 año
Certificaciones vigentes (ISO 50001 / Auditor / CMVP / CEM): Auditor Interno ISO 50001 y aspirante a CEM.
Empresa / Sector de desempeño: Consultoría en Eficiencia Energética / Sector Manufacturero (Bogotá).

Para empresas que están empezando y no tienen medidores en cada área, lo mejor es usar un método "Bottom-Up". El sistema pide una lista básica de los equipos, su potencia en kW, el tiempo que se usan al mes y un factor de carga estimado. Con estos datos se calcula un consumo teórico y se aplica la regla de Pareto: los equipos que concentran el 80% del consumo total se marcan como USEs. Este método es totalmente válido para auditorías de Nivel 1 bajo la norma ISO 50002.

2.2 Evaluación de las Recomendaciones Automáticas (Control Operacional)

Recomendación del Sistema	Viabilidad Técnica (1-5)	Observaciones / Ajustes Normativos
Planes de Acción: Migración progresiva a LED y renovación de equipos eficientes.	4	Es fácil de hacer. El software debe calcular el tiempo de recuperación de la inversión (ROI) para que la gerencia apruebe el gasto inicial (CAPEX).
Control Operacional: Apagado al final de la	5	No cuesta nada o requiere muy poco dinero. Cumple con la

Recomendación del Sistema	Viabilidad Técnica (1-5)	Observaciones / Ajustes Normativos
jornada y mantenimiento preventivo.		Cláusula 8. Solo hay que escribir los manuales de cómo hacerlo y asignar encargados.

3. PROFUNDIZACIÓN EN INDICADORES (EnPIs) Y LÍNEA BASE (ISO 50006)

3.1 Normalización Matemática del Desempeño

Respuesta:

La mejor opción es programar una Regresión Lineal Múltiple en el código del sistema. Así se pueden cruzar las unidades fabricadas con otros factores como los turnos de trabajo o el clima. Esto sirve para calcular el consumo fijo o "baseload" que es la energía que gasta la planta aunque no esté produciendo nada.

3.2 Medición y Verificación de Ahorros (M&V) - Cl. 9.1

Respuesta:

El programa debe calcular la "Energía Esperada" poniendo los datos de producción real en la fórmula de la línea base. El ahorro real se saca restando este resultado del consumo que llega en la factura. Usar un gráfico de sumas acumuladas sirve para ver de forma clara si los ahorros se mantienen en el tiempo.

3.3 Tratamiento de Datos Anómalos (Outliers)

Respuesta:

El algoritmo puede usar el Rango Intercuartílico (IQR) o un límite de ± 2 desviaciones estándar para hallar datos raros. El sistema no debe borrar la información por su cuenta; lo correcto es que lance una alerta para que el usuario explique qué pasó. Si hay una razón válida (como una parada de planta por daño), ese mes se saca del cálculo de la Línea Base.

4. RESTRICCIONES OPERATIVAS Y CONTEXTO REGULATORIO (CREG)

4.1 Traslado de Cargas y Restricciones

Respuesta:

El software necesita un módulo para meter costos de personal. En Colombia, el recargo nocturno es del 35% y puede salir más caro que el beneficio de cambiar el turno a un horario con tarifa de luz más barata. El programa debe comparar: (Ahorro en kWh x Diferencia de tarifa) contra (Número de trabajadores x Costo del recargo nocturno).

4.2 Penalización por Energía Reactiva**Calificación (1-5): 4**

Justificación: Con las reglas de la Resolución CREG 015, si una empresa se pasa en el consumo de energía reactiva, le cobran una multa que sube mes a mes (Factor M) y que afecta mucho el dinero disponible del negocio. Avisar sobre el factor de potencia es fundamental desde el principio.

5. AUDITORÍA VIRTUAL (ISO 50002) Y CICLO DE VIDA**5.1 Alcance frente a Auditorías Físicas (ISO 50002)****Respuesta:**

Hay que aclarar que la plataforma hace una Auditoría de Nivel 1, con un error estimado de entre el 10% y el 20%. Si el cliente quiere hacer cambios que requieran mucho dinero, se le debe avisar que necesita una Auditoría de Nivel 2 con revisiones y mediciones directamente en la fábrica.

5.2 Evaluación de Compras y Diseño (Cl. 8.2 y 8.3)**Respuesta:**

La herramienta debe calcular el Costo del Ciclo de Vida (LCC). Esto suma el precio de compra (CAPEX), el gasto de luz a futuro (OPEX) y lo que cuesta el mantenimiento. De esta forma se puede ver si sale mejor comprar un equipo barato que gasta mucha luz o uno caro que ahorra energía.

Firma del Experto Validador: Sebastián Gómez

Fecha: 11 / 05 / 2026

INSTRUMENTO DE VALIDACIÓN: MÉTODO DELPHI (RONDA 1)

VERSIÓN TÉCNICA AVANZADA

Proyecto: Sistema Digital de Gestión Energética para la Mitigación de Riesgos Económicos en PYMES Industriales en Bogotá D.C. [cite: 1090]

1. PERFIL DEL EXPERTO VALIDADOR [cite: 1090]

Nombre Completo: Juliana Pinilla cepeda

Años de experiencia en Gestión Energética o Industrial: 2 años

Certificaciones vigentes (ISO 50001 / Auditor / CMVP / CEM): Auditora Líder ISO 50001 y Especialista en Gestión de la Energía.

Empresa / Sector de desempeño: Sector Industrial y Manufactura (Auditoría Externa).

1.1 Identificación de Usos Significativos de la Energía (USE) - Cl. 6.3

Respuesta:

Para las pequeñas y medianas empresas que no cuentan con medidores individuales, usar la regla de Pareto (80/20) cruzando la potencia de las máquinas con las horas estimadas de trabajo funciona muy bien como diagnóstico inicial. Sin embargo, el programa no debería guiarse solo por el gasto de luz. Es buena idea dejar que el usuario configure a mano qué tan crítico es cada equipo. Hay máquinas que casi no gastan energía, pero si se apagan o fallan, frenan toda la producción. Esto encaja perfectamente con el análisis de riesgos que exige la norma ISO 50001.

1.2 Evaluación de las Recomendaciones Automáticas (Control Operacional)

Recomendación del Sistema	Viabilidad Técnica (1-5)	Observaciones / Ajustes Normativos
Planes de Acción: Cambio gradual a luminarias LED y renovación por equipos de alta eficiencia.	5	Es una tarea prioritaria. Valdría la pena cruzar estos datos con la línea base para calcular también cuántas toneladas de CO2 se dejan de emitir. De este modo, la empresa puede usar los resultados en sus reportes de sostenibilidad.
Control Operacional:	5	Son medidas sencillas que cuidan el

Recomendación del Sistema	Viabilidad Técnica (1-5)	Observaciones / Ajustes Normativos
Apagar equipos al terminar el turno y estructurar mantenimientos preventivos.		bolsillo rápidamente. Para que funcionen en el día a día, la plataforma debería enviar alertas automáticas o listas de tareas digitales a los operarios de turno.

2. REVISIÓN DE INDICADORES (EnPIs) Y LÍNEA BASE (ISO 50006)

2.1 Normalización Matemática del Desempeño

Respuesta:

El modelo matemático que mejor se adapta a esta situación es la regresión múltiple. En cualquier fábrica, el consumo de energía eléctrica no sube o baja solo por la cantidad de productos que se hacen. También influyen cosas como el clima exterior (si hay sistemas de enfriamiento) o los días que realmente se trabajó en el mes. El software tiene que limpiar estas variables para que los directivos entiendan si los ahorros son por una buena gestión o por factores externos.

2.2 Medición y Verificación de Ahorros (M&V) - Cl. 9.1

Respuesta:

La plataforma tiene que seguir los pasos del estándar IPMVP. Lo ideal es tomar el consumo real de los meses posteriores a las mejoras y compararlo con lo que la regresión decía que se iba a gastar (que sería la Línea Base Ajustada). Esa diferencia nos da el ahorro real de energía, dejando de lado si ese mes se produjo más o menos de lo normal.

2.3 Tratamiento de Datos Anómalos (Outliers)

Respuesta:

Se pueden usar herramientas estadísticas sencillas como el Z-score para encontrar registros extraños de forma automática. Eso sí, el programa nunca debe borrar un dato por su cuenta. Primero debe saltar una notificación para que el encargado revise si hubo un daño en un transformador o un pico de arranque. Si se confirma el problema, ese dato se saca del cálculo de la Línea Base para no dañar las proyecciones.

3. LÍMITES EN LA OPERACIÓN Y MARCO DE LA CREG

3.1 Traslado de Cargas y Restricciones

Respuesta:

Aparte del gasto extra en la nómina por turnos nocturnos, el sistema tiene que vigilar la capacidad eléctrica instalada. Si se pasan todos los procesos pesados a la noche para aprovechar tarifas más baratas, se corre el riesgo de saturar la red y superar el límite de potencia que se tiene contratado con el operador. Por eso, el usuario debe registrar en el programa cuál es el tope de potencia de su planta.

3.2 Penalización por Energía Reactiva

Calificación (1-5): 5

Justificación: Es un punto clave. Muchas industrias medianas y pequeñas en Bogotá pagan un montón de dinero por penalizaciones de energía reactiva en su factura (a veces entre el 20% y el 30% del total) sin darse cuenta. Poner este aviso desde el principio ayuda a frenar ese cobro extra de inmediato, sin tener que cambiar la forma en que opera la fábrica.

4. AUDITORÍAS EN LA NUBE (ISO 50002) Y CICLO DE VIDA DE LOS EQUIPOS

4.1 Alcance frente a Auditorías Físicas (ISO 50002)

Respuesta:

Para un balance que sale de una simulación, un desfase del 15% al 25% es normal y aceptable. El aviso legal de la aplicación debe dejar claro que la herramienta es para hacer un seguimiento y un prediagnóstico. No reemplaza los estudios de ingeniería en campo que se necesitan cuando se van a invertir sumas muy grandes de dinero.

4.2 Evaluación de Compras y Diseño (Cl. 8.2 y 8.3)

Respuesta:

Para calcular el retorno de inversión hay que mirar el Costo Total de Propiedad (TCO). Esto significa revisar el precio de compra, lo que costará deshacerse del equipo al final de su vida útil y cómo va perdiendo eficiencia con los años. Comprar lo más barato sin revisar el consumo futuro es una falla típica en las pymes, y la calculadora puede ayudar a corregir ese mal hábito.

Firma del Experto Validador: Juliana Guerrero

Fecha: 11 / 05 / 2026

