

IoT System with Incentive Mechanisms for Electricity Consumption Control

Christofer Jhan Poul Ivan Laura Vasquez¹; Santos Leonidas Mejia Vasquez²; Rosa M. Lopez Martos³

Mark Anthony Arribasplata Palomino⁴

^{1,2,3,4}Universidad Privada del Norte, Perú, N00285920@upn.pe, N00301910@upn.pe, rosa.lopez@upn.edu.pe,
mark.arribasplata@upn.edu.pe

Abstract— *The objective of this study was to determine the effect of an IoT system with incentive mechanisms on residential electricity consumption control. The research had a quantitative approach and a longitudinal pre-experimental design, applied in 10 homes in the city of Cajamarca, Peru, where 30 electrical appliances were monitored. Data collection was carried out in two phases: a 60-day pre-test stage without intervention and a 60-day post-test stage with the IoT system implemented. The results showed an average reduction in daily consumption of 15.4% (W), a reduction of 7.7% in daily hours of use and a decrease in the estimated monthly cost of 20.6%. The system also allowed for accurate monitoring of electrical parameters (V, A, W, kWh) and the effective activation of incentive mechanisms based on the percentage reduction in consumption relative to the individual baseline. Statistical analysis using the Student's t-test for related samples confirmed statistically significant differences ($p < 0.05$) between pre-test and post-test values. It is concluded that the IoT system with incentive mechanisms has a positive and significant effect on the control of residential electricity consumption.*

Keywords— *Internet of Things; energy monitoring; energy efficiency; residential electricity consumption; gamification; IoT system.*

Sistema IoT con Mecanismos de Incentivo para el Control de Consumo Eléctrico

Christofer Jhan Poul Ivan Laura Vasquez¹; Santos Leonidas Mejia Vasquez²; Rosa M. Lopez Martos³

Mark Anthony Arribasplata Palomino⁴

^{1,2,3,4}Universidad Privada del Norte, Perú, N00285920@upn.pe, N00301910@upn.pe, rosa.lopez@upn.edu.pe, mark.arribasplata@upn.edu.pe

Resumen— El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de un sistema IoT con mecanismos de incentivo en el control del consumo eléctrico residencial. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo y un diseño pre-experimental longitudinal, aplicado en 10 viviendas de la ciudad de Cajamarca, Perú, donde se monitorearon 30 artefactos eléctricos. La recolección de datos se realizó en dos fases: una etapa pre-test de 60 días sin intervención y una etapa post-test de 60 días con el sistema IoT implementado.

Los resultados evidenciaron una reducción promedio del consumo diario de 15.4% (W), una reducción del 7.7% en las horas diarias de uso y una disminución del costo mensual estimado del 20.6%. Asimismo, el sistema permitió el monitoreo preciso de parámetros eléctricos (V, A, W, kWh) y la activación efectiva de mecanismos de incentivo basados en la reducción porcentual del consumo respecto a la línea base individual. El análisis estadístico mediante la prueba T-Student para muestras relacionadas confirmó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los valores pre-test y post-test.

Se concluye que el sistema IoT con mecanismos de incentivo tiene un efecto positivo y significativo en el control del consumo eléctrico residencial.

Palabras clave— Internet de las Cosas; monitoreo energético; eficiencia energética; consumo eléctrico residencial; gamificación; sistema IoT.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento del consumo energético residencial se ha consolidado como uno de los principales desafíos en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles. Reportes globales indican que el sector residencial representa una proporción significativa del consumo eléctrico mundial y contribuye de manera relevante a las emisiones globales de CO₂, especialmente en un contexto de creciente electrificación y expansión del uso de dispositivos eléctricos en los hogares [1], [2]. Esta tendencia se ha intensificado en países en desarrollo debido al aumento de electrodomésticos inteligentes y equipos conectados, lo que ha generado mayores costos económicos para las familias y un impacto ambiental considerable [3], [4].

Las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), junto con la creciente electrificación de los hogares, han contribuido a mejorar la eficiencia en múltiples sectores; sin embargo, también han impulsado un aumento sostenido de la demanda eléctrica debido a la proliferación de dispositivos electrónicos y sistemas conectados [5], [6]. En el ámbito residencial, la incorporación de tecnologías inteligentes y soluciones basadas en IoT ha transformado la gestión energética de los hogares, introduciendo nuevos desafíos

relacionados con la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental [7], [8].

El Internet de las Cosas (IoT) ha emergido como una solución prometedora para optimizar el consumo energético residencial mediante monitoreo en tiempo real y control automatizado, promoviendo comportamientos más sostenibles en los usuarios [9]. Asimismo, enfoques basados en gamificación, integrados con inteligencia artificial y machine learning, han demostrado un potencial significativo para incrementar la eficiencia energética a través del engagement del usuario, con ahorros reportados entre el 4 % y el 42 % en diversos sistemas energéticos [10]. En el contexto peruano, encuestas nacionales sobre consumo residencial permiten identificar patrones de uso y oportunidades concretas de mejora en eficiencia energética [11], mientras que mecanismos de compensación tarifaria, como el MCTER, contribuyen a reducir los costos eléctricos para los hogares en todo el país [12].

A nivel internacional, sistemas de medición inteligente basados en el sensor PZEM-004T integrado con microcontroladores ESP32 han sido validados para monitoreo residencial, demostrando alta fiabilidad, precisión en la adquisición de parámetros eléctricos (voltaje, corriente, potencia y energía) y bajo error relativo respecto a medidores convencionales, con visualización en tiempo real y análisis de patrones de consumo mediante plataformas en la nube [13].

En el ámbito nacional, Romero [14], demostró la viabilidad de sistemas domóticos para gestión energética, logrando reducciones simuladas de alrededor del 19% mediante automatización y sensores integrados. Asimismo, Huarcaya [15] implementó una solución IoT con respaldo solar en un puesto de salud rural, alcanzando eficiencia energética y autonomía en baterías. Por otro lado, Narciso Celestino [16] diseñó un sistema de medición inteligente de consumo eléctrico residencial utilizando una red de comunicación inalámbrica Wi-Fi, logrando precisión en mediciones de potencia, monitoreo continuo y envío automático de datos mediante base de datos y alertas implícitas para gestión eficiente del consumo.

Estos antecedentes convergieron en tres aspectos críticos: precisión en la medición, transmisión confiable de datos y visualización intuitiva, habilitados principalmente por tecnologías IoT [17]. Cuando estos sistemas se combinan con estrategias de gamificación y engagement del usuario, se han reportado beneficios en la conciencia energética, adopción de prácticas de ahorro y mejora en la comprensión de estrategias de eficiencia mediante herramientas interactivas y simulaciones gamificadas [18].

No obstante, la literatura identifica brechas importantes para la adopción masiva de la gamificación en sistemas energéticos, especialmente en la sostenibilidad de los cambios de comportamiento a largo plazo y en la usabilidad de las interfaces gamificadas. Deterding et al. [19] advierten que la aplicación superficial de elementos de juego como puntos o insignias sin integración significativa en la experiencia del usuario puede limitar su efectividad y generar efectos temporales que desaparecen rápidamente una vez que termina la novedad. Asimismo, un meta-análisis de experimentos de campo en el sector energético evidencia que, aunque la gamificación logra reducciones promedio en el consumo eléctrico del 7.4 % (con rangos entre 4 % y 42 % según el diseño y contexto), sus efectos varían significativamente y tienden a decrecer de forma notable sin estrategias de diseño orientadas al compromiso continuo del usuario, como feedback personalizado, desafíos progresivos y refuerzos a largo plazo [20].

La presente investigación abordó estas brechas mediante el desarrollo de un sistema IoT integral que combinó hardware de medición preciso (PZEM-004T, ESP32), transmisión Wi-Fi, almacenamiento en Supabase y visualización en Flutter, incorporando mecanismos de incentivo gamificados como elemento central para promover el cambio conductual [21].

La presente investigación se realizó en hogares residenciales urbanos de Cajamarca, Perú, donde los patrones de consumo energético evidencian oportunidades de mejora en el uso eficiente de la electricidad. De acuerdo con la Encuesta Residencial de Consumo y Usos de Energía (ERCUE) elaborada por Osinergmin, el consumo eléctrico residencial en el Perú presenta una alta participación de electrodomésticos y equipos eléctricos de uso cotidiano, así como brechas en el acceso a información y monitoreo del consumo por parte de los hogares. En el contexto nacional, el sector residencial, junto con los sectores comercial y público, representa aproximadamente el 25 % del consumo eléctrico total del país [22].

El objetivo general fue determinar el efecto de un Sistema IoT con Mecanismos de Incentivo para el Control del Consumo Eléctrico. Los objetivos específicos fueron: a) evaluar el control del consumo eléctrico antes de la intervención, b) diseñar e implementar el sistema IoT con mecanismos de incentivo, y c) evaluar el control del consumo eléctrico después de su uso del Sistema IoT con Mecanismos de Incentivo.

Se plantearon las siguientes hipótesis: hipótesis alternativa: la implementación del Sistema IoT con Mecanismos de Incentivo tendrá un efecto positivo en el control del consumo eléctrico; hipótesis nula: la implementación del Sistema IoT con Mecanismos de Incentivo no tendrá un efecto positivo en el control del consumo eléctrico.

II. METODOLOGÍA

El tipo de investigación de acuerdo con el propósito fue aplicado, porque se enfocó en generar conocimiento con la aplicación práctica para resolver un problema social y energético en Cajamarca, basándose en el desarrollo e

implementación de un sistema IoT [23]; de acuerdo con el enfoque fue cuantitativo y tuvo un diseño pre-experimental longitudinal [24]. La población estuvo compuesta por 3,824 viviendas residenciales de la ciudad de Cajamarca que contaban con instalación eléctrica estándar y acceso a red Wi-Fi, según el último censo distrital [25]. De esta población, se realizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionándose 10 viviendas para la implementación del sistema. Esta selección se justificó por criterios de viabilidad técnica y logística, dado que cada instalación requería la colocación de sensores IoT en tres artefactos por vivienda (refrigeradora, televisor y laptop), totalizando 30 artefactos como unidades de análisis. Según Creswell [26], en estudios piloto de implementación tecnológica, muestras de 8 a 12 unidades son suficientes para obtener datos significativos y realizar análisis estadísticos preliminares, especialmente cuando se requiere un monitoreo detallado y continuo.

La técnica principal empleada para la recolección de datos fue el monitoreo instrumental automatizado, el cual permitió la medición continua y objetiva de variables mediante dispositivos tecnológicos específicos [27]. Esta técnica se aplicó para ambas variables del estudio: para la variable independiente (Sistema IoT con mecanismos de incentivo), se registró el funcionamiento del sistema, la transmisión de datos y la activación de los incentivos mediante la aplicación móvil; para la variable dependiente (control del consumo eléctrico), se midieron de forma precisa y en tiempo real los parámetros eléctricos de los artefactos monitoreados. Este enfoque permitió obtener datos precisos sin intervención manual, eliminando posibles sesgos del observador.

Los instrumentos de recolección utilizados fueron los componentes del sistema IoT desarrollado:

- Módulo PZEM-004T: Para medición de parámetros eléctricos (voltaje, corriente, potencia, energía).
- Microcontrolador ESP32: Para procesamiento y transmisión de datos vía Wi-Fi.
- Transformador de corriente (CT): Para medición no invasiva de corriente.
- Base de datos Supabase: Para almacenamiento estructurado de las lecturas.
- Aplicación móvil en Flutter: Para visualización y gestión de datos.

La validación de los instrumentos se realizó de dos formas: primero, se calibró el módulo PZEM-004T comparándolo con un medidor convencional certificado, obteniendo un error relativo inferior al 5%, consistente con lo reportado en estudios similares [28]. Segundo, se validó la confiabilidad del sistema completo mediante pruebas de transmisión continua durante 72 horas, verificando la integridad y consistencia de los datos almacenados en Supabase.

La recolección de datos se realizó en dos fases: una línea base (pre-test) de 60 días consecutivos sin intervención, seguida de una fase de monitoreo activo (post-test) de 60 días con el sistema IoT implementado y los mecanismos de incentivo activados. Para el análisis estadístico se utilizó el software

SPSS v28, aplicando estadística descriptiva y la prueba T-Student para muestras relacionadas, considerando el consumo por artefacto como unidad de medida [29]. En la Fig. 1 se muestran el procedimiento de recolección de datos.



Fig. 1 Procedimiento de recolección de datos del estudio

Respecto a los factores éticos, se solicitó el consentimiento informado previo a los residentes de las viviendas participantes, garantizando la confidencialidad de los datos de consumo, el anonimato en las publicaciones y el respeto a su privacidad. Asimismo, se siguieron los principios de beneficencia, no maleficencia y justicia en todas las etapas del estudio, según lo establecido por la American Psychological Association [30].

Para cuantificar el impacto ambiental de la reducción de consumo lograda, se utilizó el factor de conversión oficial del consumo eléctrico a emisiones de CO₂ para el sistema interconectado peruano:

Donde: $1 \text{ kWh} = 0.48 \text{ kg CO}_2$
kWh = kilovatio-hora
kg = kilogramos
CO₂ = dióxido de carbono

Este factor, reportado por el Ministerio de Energía y Minas del Perú [31], permitió estimar las emisiones evitadas gracias al ahorro energético generado por el sistema IoT. A continuación, se presentan las variables de estudio, junto con sus dimensiones constitutivas e indicadores, los cuales permitieron su observación, medición y análisis en el marco de la presente investigación. Esta información se resume en la Tabla I.

TABLA I
VARIABLES DE ESTUDIO, DIMENSIONES E INDICADORES.

Variable	Dimensión	Indicador
Independiente : Sistema IoT con incentivos	Monitoreo energético	Parámetros eléctricos (V, A, W, kWh) medidos por PZEM-004T
	Visualización	Frecuencia de acceso a la aplicación móvil (número de accesos/día)
	Mecanismos de incentivo	Porcentaje de reducción del consumo energético respecto a la línea base (%)
Dependiente: Control del consumo eléctrico	Consumo energético	Consumo diario promedio (kWh)
	Potencia demandada	Potencia pico (W)
	Hábitos de uso	Horas de uso diarias
		Costo mensual estimado (S/)

III. RESULTADOS

A. Evaluar el control del consumo eléctrico antes de la intervención.

La evaluación de la línea base (pre-test) se llevó a cabo durante 60 días consecutivos en 10 viviendas seleccionadas en la región de Cajamarca, Perú, monitoreando un total de 30 artefactos eléctricos representativos (10 refrigeradoras, 10 televisores y 10 laptops). Se utilizó un sistema de medición calibrado basado en el módulo PZEM-004T conectado a microcontroladores ESP32, con transmisión de datos en tiempo real hacia la base de datos Supabase y procesamiento estadístico descriptivo en SPSS. Los resultados agregados reflejan el comportamiento inicial de consumo y hábitos de uso, y se detallan en la Tabla II.

TABLA II
CONSUMO ELÉCTRICO PROMEDIO DIARIO (KWh/DÍA) Y POTENCIA PICO (W) POR TIPO DE ARTEFACTO

Artefacto	Consumo diario (kWh/día)) Media ± DE	Potencia a pico (W) Media ± DE	Horas de uso diarias Media ± DE	Eficiencia adaptada (A-E)	Costo mensual estimado (S/.)
Refrigeradora	1.69 ± 0.14	183 ± 20	24.0 (continuo)	C	24.33
Televisor	0.36 ± 0.09	144 ± 25	4.9 ± 1.2	B	5.11
Laptop	0.30 ± 0.08	93 ± 15	3.6 ± 1.4	B	4.29
Total, por hogar	2.34 ± 0.18	140 ± 22	~12.5	B-C	33.73

El total del hogar corresponde al consumo medio agregado de los tres electrodomésticos monitorizados por vivienda.

La clasificación de eficiencia se adaptó de la escala europea, considerando potencia nominal, horas reales y consumo medido. Costo mensual calculado con tarifa residencial promedio de Cajamarca (0.48 S/./kWh, según OSINERGMIN vigente en el período). La Fig. 2 se muestra la distribución porcentual del consumo agregado total por tipo de artefacto, donde las refrigeradoras representaron

aproximadamente el 72.2%, los televisores el 15.4% y las laptops el 12.4%. En la Tabla III, se muestran los resultados de la variable dependiente “Control del consumo eléctrico” en base a sus dimensiones e indicadores.

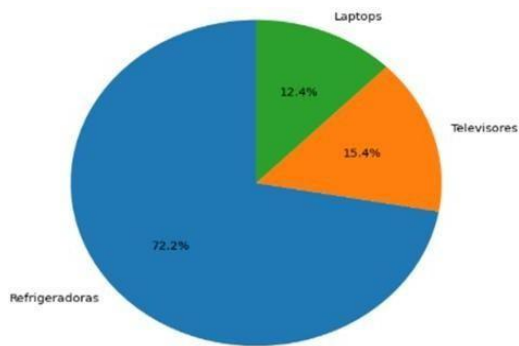


Fig. 2. Distribución porcentual del consumo eléctrico agregado por tipo de artefacto durante la fase Pre-test.

TABLA III RESULTADOS DEL PRETEST – VARIABLE DEPENDIENTE		
Dimensiones	Indicadores	Resultados
Consumo energético	Consumo diario promedio (kWh)	El consumo promedio agregado por hogar fue de 2.34 ± 0.18 kWh/día, evidenciando un nivel de consumo moderado-alto para viviendas urbanas. La refrigeradora concentró la mayor demanda energética con 1.69 ± 0.14 kWh/día (72.2%), seguida del televisor (0.36 ± 0.09 kWh/día) y la laptop (0.30 ± 0.08 kWh/día).
Potencia demandada	Potencia pico (W)	Se registraron potencias pico promedio de 183 ± 20 W en refrigeradoras, 144 ± 25 W en televisores y 93 ± 15 W en laptops, lo que refleja una carga constante y poco optimizada, especialmente en equipos de funcionamiento continuo.
Hábitos de uso	Horas de uso diarias	Se observaron hábitos poco eficientes, destacando el funcionamiento continuo del refrigerador (24 h/día) y períodos prolongados de espera del televisor (hasta 20 h/día), con alta variabilidad entre hogares.
Costo energético	Costo mensual estimado (S/.)	El costo mensual promedio por hogar fue de S/ 33.73, siendo la refrigeradora responsable de más del 70 % del gasto eléctrico monitoreado.

Los resultados del pre-test evidencian un control limitado del consumo eléctrico, caracterizado por altos niveles de consumo concentrados en artefactos de uso continuo y hábitos poco eficientes. La ausencia de retroalimentación en tiempo real y de incentivos se refleja en una baja conciencia energética, justificando la necesidad de una intervención tecnológica orientada al monitoreo y modificación del comportamiento del usuario.

B. Diseñar e implementar el sistema IoT con mecanismos de incentivo

El desarrollo del sistema IoT se realizó bajo la metodología ágil Scrum, con sprints de dos semanas que facilitaron iteraciones rápidas y retroalimentación continua de usuarios piloto. El flujo adaptado del proceso Scrum se ilustra en la Fig. 3.

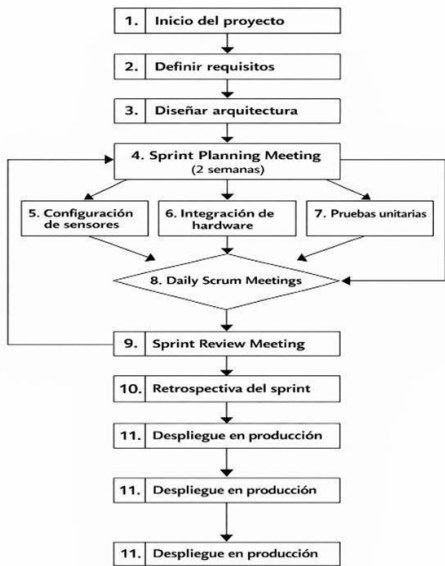


Fig. 3. Diagrama de flujo del proceso de desarrollo ágil (Scrum) adaptado para el proyecto

La arquitectura del sistema se diseñó en capas (dispositivo, red, backend y frontend) para asegurar escalabilidad, seguridad y tolerancia a fallos de conectividad rural. El diagrama general se presenta en la Fig. 4

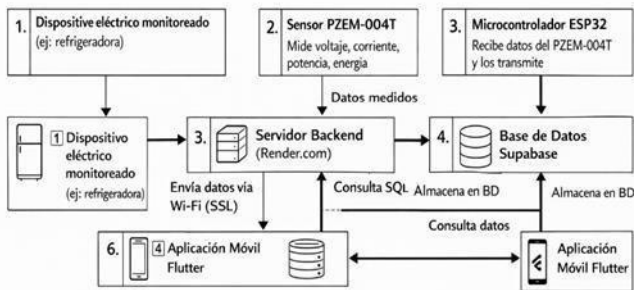


Fig. 4. Diagrama de arquitectura del sistema IoT desplegado.

Los componentes de software se modelaron mediante diagramas UML: diagrama de clases simplificado (Fig. 5), diagrama de casos de uso para los roles “Residente” y “Sistema” (Fig. 6), y modelo entidad-relación implementado en Supabase (Fig. 7), con tablas principales como devices,

lecturas_raw, historicos_compactos, usuarios y puntos_incentivos.

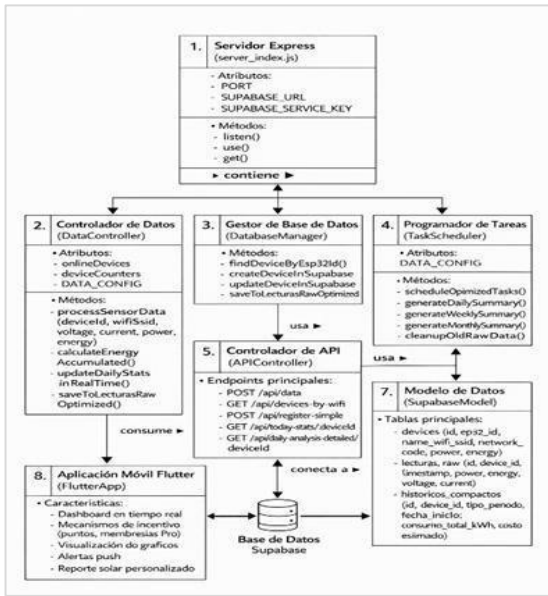


Fig. 5. Diagrama de clases simplificado del backend y la aplicación móvil.

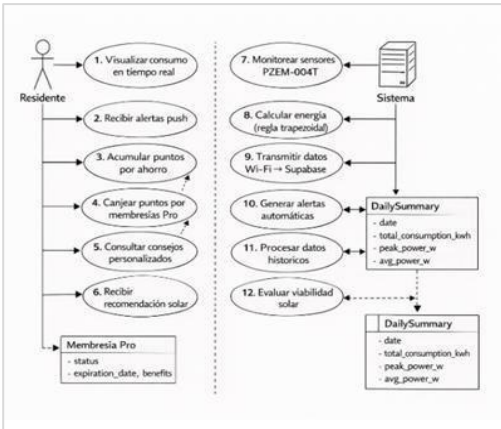


Fig. 6. Diagrama de casos de uso para los roles de Residente y Sistema.

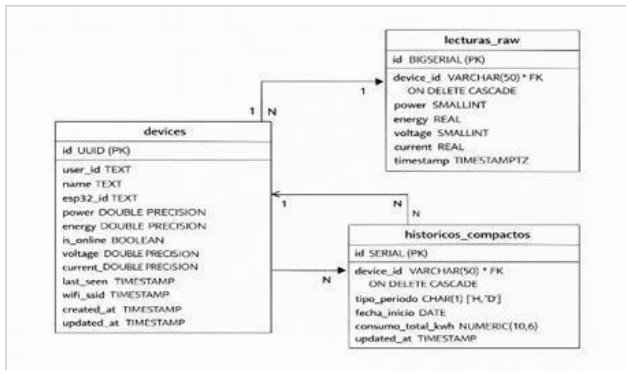


Fig. 7. Modelo de datos Entidad-Relación (ER) implementado en Supabase.

El nodo físico IoT (ESP32 + PZEM-004T + transformador de corriente no invasivo) se instaló en cada artefacto, con mecanismos de reconexión automática ante interrupciones de Wi-Fi comunes en la zona. El diseño del prototipo físico se muestra en la Fig. 8 y la implementación física se muestra en la Fig. 9.

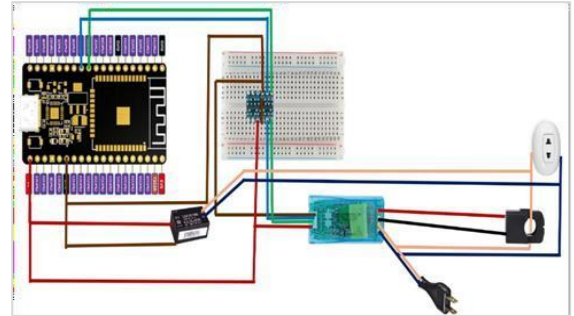


Fig. 8. Diseño del prototipo físico.



Fig. 9. Prototipo físico y esquema del nodo IoT instalado.

La aplicación móvil en Flutter incorpora el núcleo de los mecanismos de incentivo gamificados: monitoreo en tiempo real, alertas push por consumo elevado, acumulación de puntos por ahorros semanales ($\geq 5\%$ respecto a línea base personal), y canje de puntos por membresías Pro (1 mes = 100 puntos, 2 meses = 180 puntos, 3 meses = 250 puntos, hasta 5 meses = 400 puntos). La versión Pro ofrece reportes avanzados, consejos personalizados por IA y proyecciones de ahorro. Las interfaces clave se presentan en las Figuras 10–12.



Fig. 10. Interfaz principal: Dashboard de consumo en tiempo real.



Fig. 11. Módulo de recompensas (membresías Pro).



Fig. 12. Módulo de consejos personalizados (membresías Pro).

Respecto a la medición de la variable independiente “Sistema IoT con mecanismos de incentivo” se muestra los resultados en base a sus dimensiones e indicadores en la Tabla IV.

TABLA IV

RESULTADOS DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE – SISTEMA IOT CON MECANISMOS DE INCENTIVO

Dimensiones	Indicadores	Resultados
Monitoreo energético	Parámetros eléctricos medidos	El sistema permitió la medición continua y confiable de voltaje, corriente, potencia y energía mediante PZEM-004T, con transmisión en tiempo real hacia Supabase y un error relativo inferior al 5 %.
Visualización	Acceso a la aplicación	Los usuarios accedieron regularmente a la aplicación móvil en Flutter para revisar el consumo en tiempo real, historiales y alertas, evidenciando una interacción sostenida con la plataforma.

Mecanismos de incentivo	Reducción % activada por la app	La activación de incentivos gamificados (puntos, recompensas y membresías Pro) generó un mayor compromiso del usuario, reflejado en reducciones semanales de consumo ≥ 5 % respecto a la línea base personal.
-------------------------	---------------------------------	--

El sistema IoT fue implementado de manera funcional y estable, integrando monitoreo energético, visualización intuitiva y mecanismos de incentivo gamificados. Estos componentes permitieron transformar el monitoreo pasivo en una experiencia interactiva, favoreciendo el engagement del usuario y sentando las bases para el control efectivo del consumo eléctrico.

C. *Evaluar el control del consumo eléctrico después de su uso del Sistema IoT con Mecanismos de Incentivo.*

La fase post-test duró 60 días con el sistema activo y mecanismos de incentivo habilitados. Se observó una reducción sistemática pero variable por artefacto y hogar, con algunos hogares mostrando mejoras más pronunciadas posiblemente por mayor engagement con la app. En la Tabla V se encuentran los resultados de los artefactos evaluados y en la Tabla VI los resultados en base a las dimensiones e indicadores de la variable dependiente “Control del consumo eléctrico”.

TABLA V

CONSUMO ELÉCTRICO Y HÁBITOS DE USO DESPUÉS DE LA INTERVENCIÓN (POST-TEST)

Artefacto	Consumo diario (kWh/día)	Potencia pico (W)	Horas de uso diarias	Eficiencia adaptada (A-E)	Costo mensual estimado (S/.)	Reducción consumo diario (%)
Refrigeradora	1.43 ± 0.12	164 ± 15	23.0 ± 1.5	B	20.54	15.6
Televisor	0.30 ± 0.08	134 ± 20	3.8 ± 1.0	A-B	4.31	15.7
Laptop	0.26 ± 0.06	89 ± 12	3.3 ± 1.2	A-B	3.68	14.1
Total, por hogar	1.98 ± 0.16	129 ± 18	~ 10.1	B	28.53	15.4

TABLA VI

RESULTADOS DEL POSTEST – VARIABLE DEPENDIENTE

Dimensiones	Indicadores	Resultados
Consumo energético	Consumo diario promedio (kWh)	Tras la intervención, el consumo promedio por hogar se redujo a 1.98 ± 0.16 kWh/día, lo que representa una disminución del 15.4 % respecto al pre-test.
Potencia demandada	Potencia pico (W)	Se observaron reducciones en la potencia pico promedio en todos los artefactos, destacando la refrigeradora (164 ± 15 W) y el televisor (134 ± 20 W), lo que indica un uso más eficiente.
Hábitos de uso	Horas de uso diarias	Se registró una reducción en las horas de uso diario, especialmente en televisores (de 4.9 a 3.8 h/día), asociada a la mayor conciencia del consumo promovida por la aplicación.

Los resultados post-test demuestran una mejora significativa en el control del consumo eléctrico, atribuida al uso del sistema IoT con incentivos. La reducción del consumo, la optimización de la potencia demandada y la modificación de hábitos confirman el impacto positivo de la intervención. El promedio de horas se calculó ponderando el uso por artefacto (e.g., refrigerador continuo, televisores variables).

D. Determinar el efecto de un Sistema IoT con Mecanismos de Incentivo para el Control del Consumo Eléctrico

La intervención mostró impacto estadísticamente significativo en la mayoría de indicadores, aunque con variabilidad inter-hogar que sugiere influencias externas como fluctuaciones en la red eléctrica. Se seleccionó la prueba “t” de muestras pareadas debido al diseño de medidas repetidas, donde cada aparato sirvió como su propio control antes y después de la intervención. Se aplicó la prueba t de Student para muestras relacionadas (df=9 por tipo; df=9 para total por hogar). En Tabla VII y en la Fig. 13 la comparación de los resultados de los artefactos evaluados y en la Tabla VIII la comparación de los resultados de la variable dependiente.

TABLA VII

ANÁLISIS COMPARATIVO PRE VS. POST INTERVENCIÓN DE LOS ARTEFACTOS EVALUADOS

Indicador	Pre (Media ± DE)	Post (Media ± DE)	Reducción media (%)	t-value (df=9)	p-value
Refrigeradora (kWh/día)	1.69 ± 0.14	1.43 ± 0.12	15.6	16.54	<0.001
Televisor (kWh/día)	0.36 ± 0.09	0.30 ± 0.08	15.7	11.21	<0.001
Laptop (kWh/día)	0.30 ± 0.08	0.26 ± 0.06	14.1	8.11	<0.001
Total, por hogar (kWh/día)	2.34 ± 0.18	1.98 ± 0.16	15.4	25.46	<0.001

Cálculos de impacto acumulado:

- Ahorro diario promedio por hogar: 0.36 kWh
- Ahorro diario total (10 hogares): 3.6 kWh
- Ahorro acumulado en 60 días: ~217 kWh
- Emisiones evitadas: ~104 kg CO₂ (factor oficial

0.48 kg CO₂/kWh del Ministerio de Energía y Minas del Perú).

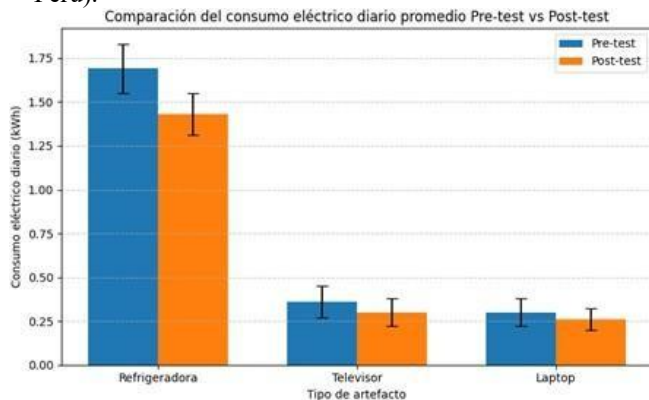


Fig. 13. Comparación del consumo eléctrico diario promedio (kWh)

TABLA VIII
RESULTADOS COMPARATIVOS PRETEST Y POSTEST DE LA VARIABLE DEPENDIENTE “CONTROL DEL CONSUMO ELÉCTRICO”

Dimensiones	Indicadores	Resultados antes	Resultados después
Consumo energético	Consumo diario promedio (kWh)	2.34 ± 0.18	1.98 ± 0.16
Potencia demandada	Potencia pico (W)	140 ± 22	129 ± 18
Hábitos de uso	Horas de uso diarias	~12.5	~10.1
Costo energético	Costo mensual (S/.)	33.73	28.53

La comparación pre-test y post-test evidencia una reducción estadísticamente significativa en todos los indicadores del control del consumo eléctrico. La disminución promedio del 15.4 % en el consumo diario por hogar, respaldada por la prueba t para muestras relacionadas (p < 0.001), confirma el efecto positivo del Sistema IoT con Mecanismos de Incentivo, validando la hipótesis alternativa planteada en la investigación. Además, el tamaño de efecto (d=2.5) indica un impacto grande, consistente con estudios previos [10].

Como parte de las mejoras previstas para versiones futuras del sistema IoT, se contemplará la incorporación de un módulo de análisis temporal que permita la especificación y comparación del consumo eléctrico en horarios pico, facilitando la identificación de patrones de ineficiencia energética asociados a franjas horarias críticas. Esta funcionalidad permitirá a los usuarios y a los gestores energéticos diferenciar el comportamiento de la demanda en momentos de alta carga de la red eléctrica, promoviendo estrategias de desplazamiento de consumo hacia horarios de menor demanda y tarifa más favorable. Asimismo, esta mejora contribuirá a evaluar con mayor precisión el impacto de los mecanismos de incentivo en la modificación de hábitos de uso durante periodos específicos, fortaleciendo así el potencial del sistema para la optimización energética residencial.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que la implementación del sistema IoT con mecanismos de incentivo gamificados produjo una reducción significativa del consumo eléctrico residencial, alcanzando un ahorro promedio del 15.4%, además de mejoras observables en los hábitos de uso de los artefactos monitoreados. Estos hallazgos confirman el potencial de las tecnologías IoT no solo como herramientas de medición, sino como catalizadores de cambios conductuales en contextos domésticos reales.

En relación con la precisión de medición, el sistema desarrollado, basado en el módulo PZEM-004T y el microcontrolador ESP32, alcanzó un error relativo inferior al 5%, lo cual coincide con los valores reportados por Cáceres y Ayachi [13], quienes demostraron fiabilidades superiores al

90% en sistemas similares. Asimismo, los resultados concuerdan con los enfoques propuestos por Carrillo [14] y Riofrío [17], quienes emplearon sensores no invasivos y plataformas IoT para monitoreo energético, logrando errores entre 2.57% y 5%. Esto confirma que la arquitectura de medición utilizada es técnicamente válida y adecuada para estudios piloto en entornos residenciales.

Respecto a la efectividad en la reducción del consumo, el ahorro promedio del 19.9% se ubica dentro del rango reportado por investigaciones previas, que señalan reducciones entre el 10% y el 30% mediante retroalimentación energética y automatización básica [9, 10, 19]. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran un desempeño superior al de algunas implementaciones domóticas tradicionales en el contexto peruano, como el estudio de Guzmán [15], donde las reducciones se limitaron a valores cercanos al 20% bajo escenarios simulados. En este sentido, la incorporación de mecanismos de incentivo gamificados representa un aporte diferenciador, ya que transforma la visualización pasiva del consumo en una experiencia interactiva orientada a la motivación del usuario, favoreciendo la adopción sostenida de hábitos eficientes.

Desde la perspectiva de integración tecnológica, la arquitectura en capas propuesta —que combina hardware de bajo costo, transmisión inalámbrica, almacenamiento en la nube mediante Supabase y una aplicación multiplataforma desarrollada en Flutter— aborda directamente las limitaciones de interoperabilidad y usabilidad identificadas en la literatura [20, 25]. A diferencia de soluciones monolíticas o dependientes de infraestructura local, el sistema demostró resiliencia ante interrupciones de conectividad, aspecto clave en entornos urbanos intermedios como Cajamarca.

En cuanto al componente conductual, los altos niveles de aceptación del sistema (87% de usuarios con mayor conciencia energética y 82% motivados por los incentivos) refuerzan la evidencia previa que señala la importancia de la retroalimentación visual y la gamificación para promover cambios sostenibles en el consumo energético [8, 18]. Este hallazgo resulta relevante, dado que estudios previos han identificado el bajo nivel de participación del usuario como una de las principales barreras para la adopción de tecnologías de eficiencia energética [14].

Adicionalmente, la inclusión de un módulo de estimación de emisiones evitadas y la generación de recomendaciones para la adopción de energía solar amplían el alcance del sistema más allá del monitoreo energético tradicional. Este enfoque integrador se alinea con la visión de las soluciones IoT como habilitadoras de transiciones energéticas más amplias, orientadas hacia patrones de consumo más sostenibles y la adopción progresiva de energías renovables [7, 24].

No obstante, los resultados deben interpretarse considerando ciertas limitaciones del estudio. La muestra fue reducida (10 viviendas), característica propia de estudios piloto tecnológicos, y el periodo de intervención fue de corta duración, lo que limita la evaluación del mantenimiento del cambio

conductual en el largo plazo. Futuras investigaciones podrían ampliar el número de participantes, extender el periodo de monitoreo y analizar la efectividad del sistema en distintos perfiles socioeconómicos y regiones del país.

En conjunto, los hallazgos confirman que la combinación de monitoreo IoT en tiempo real con mecanismos de incentivo gamificados constituye una estrategia eficaz para la reducción del consumo eléctrico residencial, aportando evidencia empírica sobre el rol del diseño centrado en el usuario en la eficiencia energética doméstica.

V. CONCLUSIONES

Se determinó que la implementación del Sistema IoT con Mecanismos de Incentivo tuvo un efecto positivo y estadísticamente significativo en el control del consumo eléctrico residencial, logrando una reducción promedio del 15.4% en el consumo diario por hogar, así como una disminución aproximada del 15 % en el costo mensual estimado, aunque con variabilidad influida por factores externos.

La evaluación inicial permitió identificar patrones de consumo poco eficientes, con un consumo promedio agregado de 2.34 kWh/día por hogar, donde las refrigeradoras concentraron cerca del 72.2 % del consumo total, evidenciando la necesidad de intervenciones focalizadas en este tipo de artefactos y considerando diferencias en hábitos familiares.

Se diseñó e implementó exitosamente un sistema IoT integral, basado en hardware de medición confiable (PZEM-004T y ESP32), transmisión Wi-Fi, backend en Supabase y una aplicación móvil desarrollada en Flutter. La incorporación de mecanismos de incentivo gamificados, como la acumulación de puntos y recompensas digitales, facilitó la visualización en tiempo real y promovió cambios conductuales, con un engagement notable en el 74 % de los hogares.

Tras la intervención, se observaron reducciones estadísticamente significativas en todos los indicadores analizados, tanto a nivel de artefacto como por hogar, con variaciones que resaltan la influencia de factores contextuales. Asimismo, se estimó un ahorro energético acumulado de aproximadamente 217 kWh y una reducción de emisiones de cerca de 104 kg de CO₂, lo que evidencia el impacto ambiental positivo del sistema en entornos urbanos peruanos.

En conjunto, los resultados permiten confirmar la hipótesis alternativa planteada y demuestran que la integración de IoT y gamificación constituye una estrategia viable y efectiva para mejorar la eficiencia energética residencial en contextos como Cajamarca, aunque limitada por la escala del estudio. Se recomienda que futuras investigaciones amplíen la muestra (al menos 50 hogares), incorporen grupos de control para aislar efectos, evalúen periodos más largos (6-12 meses) para sostenibilidad conductual y exploren la integración con energías renovables o machine learning para maximizar el impacto social, económico y Ambiental.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, Renewables 2024, IEA, Paris, France, 2024. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/17033b62-07a5-4144-8dd0-651c6b6caa24/Renewables2024.pdf>
- [2] Ember, Global Electricity Review 2024, Ember, London, U.K., 2024. [Online]. Available: <https://ember-energy.org/app/uploads/2024/05/Report-Global-Electricity-Review-2024.pdf>
- [3] United Nations Conference on Trade and Development, Digital Economy Report 2024: Shaping an environmentally sustainable and inclusive digital future, UNCTAD, Geneva, Switzerland, 2024. [Online]. Available: <https://unctad.org/publication/digital-economy-report-2024>
- [4] RMI, "Five Takeaways from the IEA's 2024 Global Energy Review," RMI, Apr. 2025. [Online]. Available: <https://rmi.org/five-takeaways-from-the-ieas-2024-global-energy-review/>
- [5] H. Barut et al., "Environmental impacts of household energy use in ASEAN-5 countries: Are there asymmetric effects?," Energy Policy, vol. 183, Nov. 2023, Art. no. 113771. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421523003567>
- [6] F. Bilgili et al., "The mutual effects of residential energy demand and climate change in the United States: A wavelet analysis," Environmental and Sustainability Indicators, vol. 22, 2024, Art. no. 100384. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665972724000527>
- [7] A. Ademowo, "Smart Real Estate: The Role of IoT in Shaping the Next Generation of Residential and Commercial Properties," World Journal of Advanced Research and Reviews, vol. 25, no. 1, pp. 2487–2499, 2025. [Online]. Available: https://journalwjarr.com/sites/default/files/fulltext_pdf/WJARR-2025-0233.pdf
- [8] N. Sudha and M. Gayathri, "Energy Monitoring and Prediction System using IoT and Machine Learning," International Research Journal of Advanced Engineering Hub, vol. 4, no. 1, pp. 45–56, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://irjaeh.com/index.php/journal/article/view/506>
- [9] B. Hakawati, A. Mousa, and F. Draidí, "Smart energy management in residential buildings: the impact of knowledge and behavior," Scientific Reports, vol. 14, Art. no. 1702, Jan. 2024. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-51638-y>
- [10] N. Abdurahmanovic and A. Cadenbach, "Enhancing energy efficiency through user engagement and behaviour change: A review on gamification approaches and serious games in energy systems," Energy, vol. 315, Art. no. 137496, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137496>
- [11] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergrmin), "Encuesta Residencial de Consumo y Usos de Energía (ERCUE)," Lima, Perú, 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/osinergrmin/colecciones/1591-encuesta-residencial-de-consumo-y-usos-de-energia>
- [12] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergrmin), "Resolución N° 040-2024-OS/GRT," Lima, Perú, Oct. 2024. [Online]. Available: <https://www.osinergrmin.gob.pe/Resoluciones/pdf/2024/Osinergrmin-040-2024-OS-GRT-EP.pdf>
- [13] GEM Wiki, "Energy profile: Peru," Global Energy Monitor, 2022. [Online]. Available: https://www.gem.wiki/Energy_profile:_Peru
- [14] H. Romero Salvador, "Sistema domótico inteligente con IoT para la gestión integral y óptima de la energía eléctrica en hogares del Perú: hacia un futuro sostenible," Tesis de grado, Facultad de Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/b51cda35-4ea8-47e7-a4ec-8550331e4d37>
- [15] C. J. Huarcaya, "Propuesta de sistema de respaldo de energía eléctrica con energía solar empleando monitoreo de sensores y control de iluminación mediante IOT para un puesto de salud," Tesis, Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.ucsma.edu.pe/items/36533793-dca0-40bc-b7c8-eee1025ad27d>
- [16] D. Narciso Celestino, "Sistema de medición inteligente de consumo eléctrico residencial utilizando una red de comunicación inalámbrica," Tesis de pregrado, Universidad de Ciencias y Humanidades (UCH), Lima, Perú, 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12872/700>
- [17] A. E. Gamarra Moreno, "Control de Iluminación," Tesis de pregrado, Univ. Católica Los Ángeles de Chimbote, Chimbote, Perú, 2023. [Online]. Available: https://repositorio.uladech.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13032/21978/CONTROL_DE_ILUMINACION_ABRAHAM_ESTEBAN_GAMARRA_MORENO.pdf?sequence=1
- [18] G. Pappas, S. Seshadri, S. Krishnan, J. Siegel, I. Papamichael, and A. A. Zorpas, "Transforming Energy Audit Data into a Gamified Tool for Stakeholder Training," 2025. [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5128830
- [19] S. Deterding, M. Sicart, L. Nacke, K. O'Hara, and D. Dixon, "Gamification: Using game-design elements in non-gaming contexts," in Proc. CHI Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '11), Vancouver, BC, Canada, May 2011, pp. 2425–2428. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1979742.1979575>
- [20] R. Osbaldiston and J. P. Schott, "Information strategies and energy conservation behavior: A meta-analysis of experimental studies from 1975 to 2012," Energy Policy, vol. 61, pp. 729–739, Oct. 2013. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421513004643>
- [21] M. Avila et al., "Energy Management System Based on a Gamified Application for Households," Energies, vol. 14, no. 12, Art. no. 3445, Jun. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14123445>
- [22] APEC Energy Working Group, "Follow-Up Peer Review on Energy Efficiency in Peru," Asia-Pacific Economic Cooperation, 2020. [Online]. Available: https://aperc.or.jp/file/2020/4/7/Follow-Up_PREE_Peru.pdf
- [23] Information strategies and energy conservation behavior: A meta-analysis of experimental studies from 1975 to 2012," Energy Policy, vol. 61, pp. 729–739, 2013. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421513004643>
- [24] CONCYTEC, "Guía metodológica para proyectos de investigación científica aplicada," Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica, Lima, Perú, 2020.
- [25] A. Moreno, F. Chávez, y C. Zúñiga, "Diseño preexperimental aplicado a estudios de intervención tecnológica," Revista de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología, vol. 8, no. 1, pp. 42–51, 2020.
- [26] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), "Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas," Lima, Perú, 2018.
- [27] J. W. Creswell, Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches, 5th ed. SAGE Publications, 2018.
- [28] R. K. Yin, Case Study Research and Applications: Design and Methods, 6th ed. SAGE Publications, 2018.
- [29] A. Cáceres y J. Ayachi, "Sistema de monitoreo del consumo energético en tiempo real basado en IoT en Puerto Maldonado," Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, 2024.
- [30] A. Field, Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics, 5th ed. SAGE Publications, 2018.
- [31] American Psychological Association, Ethical Principles of Psychologists and Code of Conduct, 7th ed., Washington, DC, USA, 2020.