

Desarrollo y Validación de un Prototipo AMI de Bajo Costo con Modelado de  
Escalabilidad para Aplicación Residencial en Bogotá, Colombia

Juan Sebastián Gómez González

Daniel Camilo Villanueva Sierra

Juliana Andrea Pinilla Cepeda

Facultad de Ingeniería, Universidad EAN

Proyecto de Grado

Chacón Rivera Lina María

20 de noviembre, 2025

## Tabla de Contenido

RESUMEN EJECUTIVO .....	5
INTRODUCCION.....	7
OBJETIVOS.....	9
General.....	9
Específicos.....	9
DEFINICIÓN DE PROBLEMA .....	10
JUSTIFICACIÓN.....	12
ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS.....	13
Requerimientos técnicos.....	13
Requerimientos Software .....	17
Requerimientos ambientales.....	19
Requisitos sociales.....	20
MARCO REFERENCIAL .....	22
MARCO LEGAL Y NORMATIVO .....	29
ANÁLISIS DE RESTRICCIONES.....	30
Restricciones de Hardware .....	30
Limitación de rango de medición de sensores.....	30
Capacidad de procesamiento y memoria del ESP32 .....	30
Restricciones de Software y Plataforma IoT .....	31
Limitaciones de la plataforma Blynk (versión gratuita).....	31
Restricciones Económicas .....	31
Costos de implementación.....	31

Restricciones de Hardware y Software.....	32
Microcontrolador ESP32 .....	32
Plataforma Blynk.Io .....	32
Restricciones Normativas .....	32
Cumplimiento obligatorio .....	32
Restricciones de Operación .....	32
Vida útil y mantenimiento .....	32
Restricciones Ambientales.....	33
ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	33
DISEÑO METODOLOGICO .....	35
Generación de alternativas de solución .....	35
Revisión De Factibilidad Y Coherencia Técnica.....	36
Comparación Con Hechos Conocidos.....	36
Evaluación de alternativas y justificación de la solución.....	37
Desarrollo y validación de la solución seleccionada.....	37
RESULTADOS DE DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	38
Esquema general del sistema.....	38
Desarrollo de Software y Arquitectura de Programación.....	40
Arquitectura del Sistema .....	40
Librerías Principales.....	40
Algoritmo de Medición .....	40
Calibración y Ajuste .....	41
Mecanismos de Protección.....	41
Interfaz IoT y visualización.....	41

Ensamblaje físico.....	42
Resultados del prototipo a pequeña escala .....	42
Modelado a escala residencial .....	43
ANÁLISIS DE COSTOS .....	46
Análisis De Mercado .....	51
TAM – Mercado Total Disponible.....	52
SAM – Mercado Accesible.....	52
SOM – Mercado Objetivo Real .....	52
ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD.....	52
Sostenibilidad Ambiental.....	52
Sostenibilidad Social .....	53
Sostenibilidad Económica .....	54
DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	55
PLAN DE IMPLEMENTACIÓN.....	57
CONCLUSIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA .....	61
ANEXOS .....	66

## RESUMEN EJECUTIVO

En Colombia, existe una lenta transición hacia sistemas de medición inteligente (AMI), esto ha limitado la eficiencia en la gestión de energía eléctrica, en el sector residencial de Bogotá, aun predomina el uso de medidores electromecánicos y electrónicos no inteligentes. Esta situación genera dificultades para todos los agentes que hacen parte de la red de servicio eléctrico, tanto a los usuarios que carecen de información en tiempo real para visualizar analizar y entender su consumo, como a las empresas comercializadoras de energía, que enfrentan diariamente problemas para medición de perdidas técnicas, no técnicas, detección de fallas, problemas para la lectura de consumo y desconfianza por parte de los consumidores.

En el presente proyecto de grado se tiene como objetivos presentar un prototipo a pequeña escala de un medidor AMI y un modelo de aplicación a gran escala, para esto se llevaron a cabo dos etapas complementarias: en la primera, se construyó un prototipo funcional a pequeña escala basado en un microcontrolador ESP32, sensores de corriente SCT-013-5A y de voltaje ZMPT101B, y la plataforma Blynk.io como entorno de visualización de datos en tiempo real; y en la segunda, se elaboró un modelo de aplicación a gran escala, adaptado a las condiciones eléctricas de una vivienda promedio.

El sistema propuesto permite la medición continua de variables eléctricas fundamentales —voltaje, corriente, potencia, energía consumida y costo— con transmisión inalámbrica hacia una plataforma en la nube accesible desde dispositivos móviles o computadoras. A partir de los resultados obtenidos, se comprobó la viabilidad técnica del prototipo y su potencial de expansión hacia una implementación doméstica completa, capaz

de integrarse al Sistema Único de Información (SUI) y de cumplir con la Resolución CREG 101-1 de 2022, el RETIE (Resolución 40117 de 2024) y la NTC 6079.

El trabajo contribuye a la democratización del acceso a la medición inteligente en Colombia, favoreciendo la eficiencia energética, la transparencia en el consumo eléctrico y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, 11 y 12, relacionados con energía asequible, comunidades sostenibles y consumo responsable.

## INTRODUCCION

En Colombia, la demanda de energía eléctrica ha demostrado un crecimiento sostenido en los últimos años. Por ejemplo, según las proyecciones de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), la demanda total del país pasó de aproximadamente 85,336 GWh en 2022 a cerca de 87,516 GWh en 2023, con un crecimiento anual estimado de entre 2,5 % y 2,6 % como lo indican los Administradores del mercado eléctrico (XM, 2025) . Este incremento obliga a las autoridades y actores del sector energético a intensificar los esfuerzos en la planificación, monitoreo y mejora de la eficiencia energética, con el fin de garantizar la seguridad del suministro eléctrico y promover la sostenibilidad del sistema. (XM, 2025)

En el territorio nacional el consumo final de energía se tiene evidencia que el sector residencial representa una porción bastante importante. Según indica el Balance Energético Útil (BEU) y el Balance Energético Colombiano (BECO), alrededor del 20% del consumo total corresponde a los hogares colombianos. El Plan Energético Nacional 2024-2054 confirma una cifra similar, estimando en 19 % la participación del segmento residencial. Esta considerable presencia resalta la necesidad de impulsar medidas de gestión y eficiencia energética en los hogares, como el uso de medidores inteligentes.

En el ámbito urbano, Bogotá presenta indicadores de consumo residencial que revelan una marcada variedad por estrato, lo que reafirma el increíble potencial impacto de soluciones de medición inteligente. En 2020, según (Secretaria de Planeacion, 2020) el consumo anual de energía eléctrica residencial fue de aproximadamente 3963 millones de kWh los cuales son distribuidos de la siguiente manera: estrato 1: 269 millones; estrato 2: 1 333 millones; estrato 3: 1 340 millones; estrato 4: 549 millones; estrato 5: 225 millones;

estrato 6: 246 millones kWh. Por otro lado, en 2018 el sector residencial tuvo una representación cercana del 71,7 % del consumo total de energía eléctrica en Bogotá, muy por encima del sector comercial (~13,6 %) o industrial (~10,5 %). Estas diferencias visibles sugieren que el monitoreo en tiempo real, adaptado al nivel socioeconómico y hábitos de consumo de cada zona, pueden optimizar tanto las decisiones de los usuarios como la planificación energética local. (Secretaria de Planeación, 2020)

A nivel institucional, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) administra el Sistema Único de Información (SUI), plataforma destinada al reporte para la posterior supervisión de datos del sector energético. Esta estructura refleja la importancia de que los proyectos de medición remota y Sistemas de Medición Inteligente se articulen con los marcos regulatorios vigentes, garantizando interoperabilidad, trazabilidad y cumplimiento normativo.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo ofrecer una alternativa viable, económica y técnicamente sólida para el monitoreo inteligente del consumo eléctrico residencial, a través del desarrollo de un prototipo AMI de bajo costo complementado con un modelo de escalabilidad a nivel residencial real. De esta manera el presente proyecto no solo contribuye a la modernización del sistema de medición nacional, promueve la eficiencia energética en los hogares, sino que también fortalece los lineamientos gubernamentales de la transición energética justa.

## OBJETIVOS

### General

Validar un prototipo a pequeña escala de un medidor AMI de bajo costo con conectividad IoT, mediante su construcción y modelamiento de su escalabilidad para su aplicación en entornos residenciales de Bogotá.

### Específicos

Diseñar la arquitectura hardware y software del sistema AMI, integrando sensores de corriente y voltaje, un microcontrolador ESP32 y una plataforma IoT (Blynk.io) para la adquisición y transmisión en tiempo real de variables como corriente, voltaje, potencia y energía consumida.

Validar experimentalmente el prototipo a pequeña escala, realizando mediciones de corriente, voltaje, potencia y energía consumida en condiciones controladas, con el fin de comprobar la precisión y estabilidad del sistema.

Modelar la escalabilidad del sistema mediante Google sketchup y draw. Io para su aplicación en el sector residencial en Bogotá, Colombia; proponiendo modificaciones técnicas en los sensores y la fuente de alimentación.

## DEFINICIÓN DE PROBLEMA

El sistema eléctrico colombiano ha dependido tradicionalmente de medidores electromecánicos y sistemas de lectura manual para la facturación del servicio de energía eléctrica en el sector residencial. Esta infraestructura, implementada desde mediados del siglo XX, se caracteriza por procesos operativos que requieren la intervención humana directa para la toma de lecturas, registro de consumos y detección de anomalías(Enel Colombia, s/f)

Los sistemas de medición tradicionales en el sector residencial en Bogotá a lo largo de los años han presentado múltiples deficiencias estructurales. Una de ellas tiene que ver con la dependencia a la intervención humana, ya que hasta el día de hoy para realizar la lectura de la energía cada mes los técnicos tienen que acceder físicamente a cada medidor para registrar el consumo, lo que hace que la calidad de la medición dependa exclusivamente de la precisión del operario, además, de que se corre el riesgo de errores humanos en el registro y transmisión de los datos (Garcia, E.M. 2015, p.2).

Por otro lado, según el concejal Marco Acosta (Concejo de Bogotá D.C s/f) afirma que el sistema de facturación de la energía en Bogotá y Cundinamarca se ha visto afectado seriamente con problemas de facturación, cobros abusivos, doble facturación e incrementos de hasta el 400% del cobro de la factura. (Párr.2)

Por su parte, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) ha reconocido la necesidad de modernizar la infraestructura de medición eléctrica mediante la expedición de la Resolución 101-1 de 2022, que establece las condiciones para la implementación de AMI en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). La cual define que, los costos de los medidores inteligentes deben ser asumidos por los proveedores, reconoce a los usuarios como dueños de sus datos, y establece fases de implementación (18 meses para grandes consumidores y

60 meses para cobertura total), con un límite anual del 15% del costo base de comercialización. En conjunto, impulsa la digitalización del sector eléctrico y la protección de derechos de los usuarios. (Resolución 101 001 de 2022. Por la cual se establecen las condiciones para la implementación de la infraestructura de medición avanzada en el SIN. 31 de mayo 2019. DO. N°51.972.)

La propuesta presentada en este trabajo rompe este paradigma al invertir el enfoque de diseño: en lugar de desarrollar un medidor para empresas que eventualmente beneficie al usuario, se diseña un sistema AMI centrado en el empoderamiento del consumidor residencial, que democratiza el acceso a la información energética mediante tecnología de bajo costo y arquitectura abierta. Actualmente en Colombia, el sector energético se enfrenta por un nuevo desafío relacionado con la implementación de nuevas tecnologías en cuanto a la medición de la energía eléctrica, según lo establecido por el ministerio de minas y energía en la resolución 40483 de 2019, se ha fijado una meta de implementación a 2030 con un cumplimiento del 75% de usuarios con «AMI» en el Sistema Interconectado (Resolución 101 001 de 2022. Por la cual se establecen las condiciones para la implementación de la infraestructura de medición avanzada en el SIN. 31 de mayo 2019. DO. N°51.972.)

Sin embargo, se encuentra que no hay un cumplimiento de la meta ya que, de acuerdo con Asocodis (La Asociación Colombiana de Distribuidores de Energía Eléctrica), hasta diciembre del 2024 se han instalado unos 200.000 medidores inteligentes, equivalente a cerca de 1% de los hogares del país (Portafolio, s/f).

Así las cosas, es fundamental explorar nuevas alternativas que impulsen la implementación de la Infraestructura de Medición Avanzada para el sector residencial en

Bogotá, ya que, debido a la lenta transición que se ha tenido de medidores tradicionales a esta nueva tecnología, se han detectado diferentes problemáticas como la dependencia de intervención humana en los procesos de medición de la energía, lo cual hace que este proceso sea poco confiable y causa cierta desconfianza de los usuarios frente a las empresas que comercializan la energía.

## JUSTIFICACIÓN

Dado de que el despliegue de esta tecnología avanza lento en Colombia, con menos del 1% de cobertura a inicios de 2024 (SSPD, 2024), y debido a los altos costos asociados a las soluciones importadas; el desarrollo de la propuesta presentada en este trabajo está más que justificado; el diseño de un prototipo a pequeña escala, de bajo costo y la modelación de su escalabilidad adaptado a las características del sector residencial en Bogotá, pretende facilitar el acceso y cerrar la brecha existente, como primera contribución. La investigación busca ser relevante, no solo por lo ambicioso del reto, sino por lo acertado y necesario de la propuesta. Como se argumentó en la introducción, el contexto del Sistema de Gestión de la Demanda es más relevante que nunca, y extendido a todo el territorio, de manera que se beneficie el usuario final, que podrá realizar un seguimiento en tiempo real para corregir sus hábitos (optimizando sostenidamente el costo de la factura).

La propuesta presentada en este trabajo rompe este paradigma al invertir el enfoque de diseño: en lugar de desarrollar un medidor para empresas que eventualmente beneficie al usuario, se diseña un sistema AMI centrado en el empoderamiento del consumidor residencial, que democratiza el acceso a la información energética mediante tecnología de bajo costo y arquitectura abierta. Esta investigación es relevante por tres dimensiones complementarias. Técnicamente,

demuestra la viabilidad de integrar hardware de bajo costo con plataformas IoT en la nube, cumpliendo con los estándares normativos colombianos (NTC 6079, RETIE, Resolución CREG 101-1 de 2022). Socialmente, transfiere el control de los datos de consumo al usuario final, tal como lo establece la normativa vigente, permitiéndole realizar seguimiento en tiempo real, identificar patrones de gasto y tomar decisiones informadas que reduzcan el costo de su factura mensual. Estratégicamente, proporciona un modelo replicable y escalable que puede acelerar el cumplimiento de las metas nacionales de cobertura AMI, facilitando la transición energética justa al reducir la dependencia de soluciones importadas de alto costo.

## **ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS**

### **Requerimientos técnicos**

La infraestructura de medición avanzada (AMI) en Colombia, está compuesta por dos elementos esenciales: la unidad de medida (UM) y la unidad concentradora (UC).

La unidad de medida (UM) está conformada por los elementos: medidor de energía eléctrica, dispositivos de conexión/desconexión, visualizador, medio o dispositivo que permita al cliente visualizar la información sobre el consumo, dispositivos del cliente final y dispositivo multiservicios. La medición bidireccional es una funcionalidad clave para el sistema AMI y por tanto se considera esencial.

Los requisitos para la Unidad de Medida (UM) están agrupados por requisitos eléctricos, mecánicos y metrológicos, requisitos de operación y mantenimiento, requisitos del visualizador, requisitos de identificación de datos, requisitos de desconexión conexión/conexión, y finalmente, requisitos de seguridad.

Según la Norma Técnica Colombiana en su publicación NTC 5019 que tiene por título Selección de componentes del sistema de medición de energía eléctrica, esta menciona que para el sector residencial se necesita como mínimo las siguientes situaciones para los requisitos eléctricos:

- La capacidad del bobinado secundario del transformador de corriente debe tener una capacidad de 5A nominal.
- Factor de sobrecarga continua de los transformadores de corriente 2,0.
- Potencia reactiva por fase y promedio de las tres fases.
- Energía activa importada, exportada, total y neta (kWh).
- Energía reactiva importada, exportada, total y neta (kVARh).
- Frecuencia (Hz).
- Tensión fase neutro y promedio para las tres fases (V).
- Tensión fase a fase y promedio para las tres fases (V).
- Corriente por fase y promedio para las fases (A).

Como características particulares para el proyecto se necesitan:

- Los medidores deben contar con una interfase ESP 232, un optoacoplador o PLC.
- El medidor debe tener una pantalla de lectura de cristal líquido o similar.
- El límite térmico de los medidores no debe ser mayor a 2,0 In

Para los requisitos mecánicos en la norma NTC 6079:2021 expresa:

- En la Unidad de Medida (UM) los requisitos mecánicos generales, para la caja del medidor (conjunto base y tapa principal), ventana, bloque de terminales, tapa del

bloque de terminales, distancias de seguridad y de fuga, medidor de caja aislada con protección clase II, resistencia al calor y fuego, protección contra penetración de polvo y agua, visualización de los valores medidos, dispositivos de salida, identificador del medidor y condiciones climáticas, deben ser tomados de la NTC 5226 (IEC 62052-11).

- La Unidad de Medida debe ser clase de protección II

Para los requisitos metrológicos:

- Para los límites de error de variación en corriente y a factores de influencia, arranque y funcionamiento sin carga, constante del medidor y condiciones de los ensayos, los requisitos se deben tomar de las normas NTC 4052 (IEC62053-21), NTC 2147 (IEC62053-22), NTC 4569 (IEC62053-23) y NTC 6232 (IEC62053-24) según el índice de clase correspondiente para cada tipo de medidor.
- Para los ensayos de rutina de los requisitos metrológicos para los medidores de energía eléctrica activa y reactiva, se deben tomar los requisitos presentados en la NTC 4856 para cualquiera de las clases.

La unidad concentradora (UC) la conforman los elementos de: concentrador, los mecanismos de operación y mantenimiento del concentrador y mantenimiento del controlador.

Los requisitos generales para la Unidad Concentradora (UC) se presentan a continuación:

- Debe garantizar la comunicación entre la Unidad de Medida (UM) y el Sistema de Gestión y Operación (SGO).

- Los datos comunicados por la Unidad Concentradora (UC) se deben poder recuperar a través de los mecanismos de operación y mantenimiento local, cuando esta cuente con almacenamiento interno
- Para funciones de operación y mantenimiento debe contar con interfaces de comunicación de acceso local
- La conectividad local no debe afectar la conectividad remota y el acceso a la Unidad Concentradora (UC) debe contar con mecanismos de seguridad de datos y mecanismos de protección contra accesos no autorizados.
- Toda actualización de software y/o firmware debe ser validada y generar un registro del evento con el resultado de actualización y verificación.
- Las actualizaciones de software y/o firmware no deben dar lugar a la modificación o supresión de los datos de medición, parámetros de configuración o parámetros operativos del equipo.
- La Unidad Concentradora (UC) debe detectar y reportar información de registro y eventos propios.
- La Unidad Concentradora (UC) debe detectar y reportar información de registro y eventos de la Unidad de Medida (UM) (si aplica).
- En los casos en que la Unidad Concentradora (UC) posea reloj interno éste debe estar sincronizado a la hora legal de Colombia. En el escenario que la Unidad Concentradora (UC) no posea reloj interno el Sistema de Gestión y Operación (SGO) debe ser el encargado de esta función.

La Unidad Concentradora (UC) debe proporcionar funcionalidad para:

- Almacenar durante un periodo de tiempo la información de lecturas y eventos de todas las Unidades de Medida (UM) asociadas a este, si aplica
- Enviar la información almacenada de todos los medidores de energía al Sistema de Gestión y Operación (SGO) ya sea a petición del software o por iniciativa de la Unidad Concentradora (UC) después del restablecimiento de la comunicación, si aplica

### **Requerimientos Software**

Para el sistema de medición, es necesaria una capa de software sólida que asegure la recopilación, transmisión, administración y examen de los datos que provienen de los medidores inteligentes. Para tal fin, se escoge la plataforma Blynk.Io de IoT, que posibilita la integración con dispositivos de medición mediante protocolos estándares, el almacenamiento en la nube y la visualización en interfaces móviles y web.

#### **Requerimientos Funcionales:**

Recepción regular de datos: El software debe garantizar que los datos de consumo se reciban en periodos de tiempo establecidos (cada 2 segundos) y que sean almacenados y procesados en la nube para estar disponibles bajo demanda.

Análisis y visualización: La plataforma tiene que tener módulos gráficos que posibiliten a los usuarios examinar tendencias de consumo en términos horarios, diarios o mensuales.

Exportación de información: Los datos tienen que ser exportables en formatos abiertos (como Excel o CSV), lo cual hará más fácil su análisis desde afuera.

## **Requerimientos No Funcionales**

**Alta disponibilidad:** La plataforma debe garantizar disponibilidad superior al 99%, esto con el objetivo de asegurar la continuidad operativa del sistema de medición.

**Interfaz intuitiva:** Debe ofrecer una interfaz gráfica accesible desde navegadores web y aplicaciones móviles (Android e iOS), adaptable a distintos perfiles de usuario.

## **Especificaciones Técnicas de la Plataforma IoT (Blynk.Io)**

**Capacidad del servidor:** La plataforma Blynk.Io funciona con un modelo en la nube (cloud-based), con servidores distribuidos que aseguran redundancia y disponibilidad elevada. La versión gratuita está limitada a 2.000 puntos de datos diarios, pero los planes pagos (Blynk Plus o Business) permiten un volumen escalable en función de la suscripción, con soporte para miles de dispositivos al mismo tiempo.

**Almacenamiento y memoria:**

- **Conservación histórica:** En el plan gratuito, hasta 30 días; en los planes superiores, sin límites.
- **Memoria temporal en el aparato:** El ESP32 tiene 520 KB de RAM y 4 MB de memoria flash, que se emplea para guardar datos temporalmente antes de enviarlos a la nube.

**Tipo de procesador:**

En la nube: Blynk.Io hace uso de centros de datos distribuidos que cuentan con balanceo de carga y son capaces de procesar datos en tiempo real, empleando infraestructura basada en procesadores x86-64 para manejar flujos masivos de datos.

En el aparato: Microcontrolador ESP32 de doble núcleo a 240 MHz, diseñado para optimizar el uso de la energía en aplicaciones de IoT.

### **Requerimientos ambientales**

Para este proyecto se necesitan incorporar consideraciones ambientales que generen eficiencia energética en cada una de sus etapas, empezando por el diseño y terminando en la operación. Por lo cual se establece una adopción de una política de gestión energética, que está encargada de contemplar el uso racional de los recursos eléctricos, alentando a la reducción de consumo y la minimización de pérdidas técnicas y no técnicas.

La política enmarca en las directrices de la norma ISO 50000-1 del 2018 la cual provee lineamientos internacionales para la implementación de sistemas de gestión energética orientados a la mejora continua del desempeño.

En el área operativa, el sistema deberá ofrecer la capacidad de medir el consumo de electricidad de forma minuciosa en intervalos regulares, además de reunir estos datos en plataformas analíticas que ayuden a establecer indicadores de rendimiento energético y comparar con líneas base de consumo. Estos registros serán útiles no solo para analizar la eficiencia del sistema, sino también para detectar patrones de consumo ineficiente entre los usuarios finales. En este contexto, el AMI podrá generar alertas y notificaciones enfocadas en corregir comportamientos de uso

que lleven a un gasto excesivo o innecesario de energía, promoviendo así una cultura de sostenibilidad y ahorro energético.

El desarrollo de los dispositivos y componentes relacionados con el sistema deberá tener en cuenta indicios de eficiencia energética, priorizando equipos que consuman poco en modo de espera, utilizando modos operativos optimizados y funciones que minimicen las pérdidas eléctricas. Además, la red necesitará ser actualizada con la implementación de comunicaciones bidireccionales, balanceo de carga y detección anticipada de sobrecargas o desfases, con el fin de reducir las pérdidas reactivas y permitir la futura integración de fuentes de generación distribuida o sistemas de almacenamiento de energía.

Por último, el proyecto deberá estar en línea con prácticas de gestión ambiental que consideren el ciclo de vida, analizando el impacto energético y ambiental de los dispositivos durante su fabricación, transporte, funcionamiento y disposición final. Esto significa dar prioridad a tecnologías que tengan una menor huella de carbono, una mayor capacidad de reciclaje y un diseño que busque minimizar el impacto ambiental. De este modo, los requisitos ambientales establecidos garantizan que el sistema AMI no solo optimice la gestión técnica de la red eléctrica, sino que también contribuya de manera activa a los objetivos globales de sostenibilidad y eficiencia energética.

### **Requisitos sociales**

Además de los aspectos técnicos y ambientales descritos anteriormente es importante responder a requerimientos sociales que permitan la adecuada inserción en el contexto colombiano, para así poder garantizar beneficios tanto para los usuarios como para

las empresas de comercialización eléctrica. Primeramente, se reconoce una necesidad considerar la diversidad de clientes en el sector residencial en Bogotá, donde el uso de energía eléctrica está directamente relacionado con las condiciones socioeconómicas de los hogares. Por este motivo el sistema debe permitir la clasificación del consumo energético teniendo de base el estrato socioeconómico, para que estos datos permitan a facilidad para la implementación de políticas públicas en materia de eficiencia energética.

Para analizar la perspectiva de los comercializadores de energía, el sistema deberá generar beneficios sociales derivados en las mejoras de detección de fallas y reducciones de pérdida eléctrica, considerando el ámbito técnico y el no técnico. Al contar con mediciones en tiempo real las 24 horas del día, se habilita la capacidad de identificar la interrupción temprana del servicio, conexiones irregulares, y alguna situación de fraude, lo cual aseguraría en una prestación del servicio de energía eléctrica domiciliario más confiable. Por otro lado, la reducción de pérdidas no solo impacta en la sostenibilidad financiera de las comercializadoras, sino que también permitiría a los usuarios gozar de costos de la energía estables, contribuyendo al bienestar social y la equidad en el acceso al servicio.

## MARCO REFERENCIAL

La Infraestructura AMI se considera hoy en día como una de las mayores innovaciones en el sector de la energía eléctrica, ya que estos dispositivos permiten la captura, transmisión y análisis de datos en tiempo real, lo cual permite optimizar la operación de los sistemas eléctricos. Su funcionamiento se basa en sensores capaces de registrar de manera continua variables eléctricas como corriente, voltaje, potencia activa y reactiva, así mismo la energía consumida por los usuarios finales toda esta información es transmitida en tiempo real a través de protocolos de comunicación IoT hacia plataformas en la nube( IBM, s/f).

Estos medidores abren las puertas a un nuevo sistema de la medición de la energía, ya que sus capacidades superan ampliamente a la de los medidores tradicionales, permitiendo diferentes funciones como un control dinámico del consumo energético, una comunicación bidireccional entre el consumidor y el comercializador de energía eléctrica, la detección de anomalías y la implementación de estrategias de eficiencia energética. (Enel Colombia, s/f); (Daza E, 2024).

El funcionamiento técnico de un AMI se basa en un conjunto de sensores que detectan la corriente y voltaje, estos sensores son calibrados bajo estándares internacionales y nacionales (ICONTEC, NTC 6079), lo que garantiza precisión en las mediciones y compatibilidad con la normativa vigente en Colombia. Dichos sensores envían toda la información recolectada hacia un microcontrolador central, para el presente proyecto el **ESP32**, que funciona como núcleo del sistema por su capacidad de procesamiento, conectividad inalámbrica y bajo consumo energético(Espressif , s/f)

La información transmitida por el microcontrolador es organizada en plataformas digitales con protocolos de comunicación IoT donde se generan reportes automáticos que

permiten analizar los patrones de consumo, identificar hábitos ineficientes. Estos reportes constituyen herramientas fundamentales para fomentar la eficiencia energética en los hogares y, a su vez, para que las empresas distribuidoras optimicen la operación del sistema eléctrico ( Enel Colombia, s/f)

Sobre los tipos de medidores que se encuentran instalados en el sector residencial de Bogotá y en general en Colombia, hay actualmente instalados 3 tipos: Electromecánico unidireccional, electrónicos no inteligentes, medidores AMI (monofásicos y bifásicos)(Enel, 2020).

Los medidores electromecánicos unidireccional son a aquellos que han sido los más utilizados durante varias décadas en Colombia; estos funcionan mediante un disco giratorio que mide únicamente la energía activa consumida, por otro lado; se encuentran los medidores electrónicos los cuales se diferencian en que son más precisos y son capaces de registrar factores como la energía activa como reactiva e incluso multitarifas; estos dos presentan las mismas limitación como la necesidad de lectura manual, errores frecuentes y vulnerabilidad frente a fraudes. Por último, se encuentran medidores AMI, se distinguen los unidireccionales, que únicamente registran el consumo de energía, y los bidireccionales, que además contabilizan la energía inyectada a la red en contextos de generación distribuida, como sucede con sistemas solares fotovoltaicos. (Camilo et al., n.d.)

Entre las ventajas que pueden llegar a ofrecer la aplicación de medidores AMI en el sector residencial en Bogotá, entre ellas destacan la posibilidad de facturar en tiempo real basada en consumo del usuario, la reducción de pérdidas técnicas y no técnicas, y la generación de información útil para mejorar la planificación del sistema eléctrico (Daza E, 2024). No obstante, una de las dificultades que enfrentan los comercializadores a la hora de

implementar estos, es el elevado costo de inversión en el abastecimiento e instalación, los retos de la actualización en red eléctrica de transmisión y los riesgos asociados a la ciberseguridad y la protección de datos.(Daza E, 2024)

Estos dispositivos desde el punto de vista técnico tienen una vida útil que se estima entre 10 y 15 años, esto está sujeto a diferentes condiciones ya sea ambientales o por obsolescencia programada, además de que la calidad de los componentes electrónicos tiene un gran impacto en la resistencia y una menor probabilidad a que no a ocurran fallos técnicos. No obstante, es importante que Durante su vida útil, se realicen mantenimientos preventivos y calibraciones periódicas que garanticen la precisión de las mediciones.(Sustainability Directory/f)

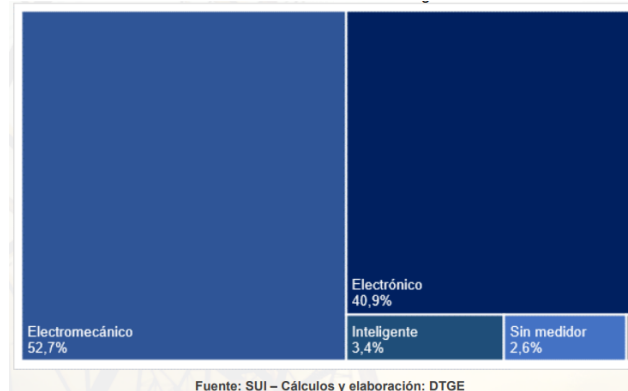
Koukouvinos et al. (2025) considera que los medidores inteligentes son más eficientes frente a otros del mercado, esto se debe principalmente a que tiene capacidades más avanzadas en comparación con los dispositivos electromecánicos tradicionales. Ya que, estos nuevos dispositivos ofrecen un rendimiento superior a la hora de minimizar las pérdidas de energía y mejorar la confiabilidad en la red, los cuales son aspectos significativos en la cadena de suministro de la energía. En un estudio realizado por (Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2025), se demostró que los medidores inteligentes, como el modelo EDMI Mk10A, superan a los sistemas tradicionales (medidores electromecánicos unidireccional) en términos de precisión, velocidad y exactitud en la transmisión de datos y optimización energética general. Esta precisión mejorada y manejo de datos en tiempo real permiten un monitoreo y administración más efectivos del consumo de energía, contribuyendo a su mayor eficiencia en el sector energético.

La necesidad de implementar una propuesta de medidores AMI se basa en la necesidad de aportar en la transición energética justa la cual busca diversificar la matriz energética hacia un modelo más sostenible, con este proyecto se busca modernizar la red de medición de la energía eléctrica en Colombia dejando atrás los sistemas tradicionales. Actualmente Colombia la matriz de medidores en Colombia se presenta de la siguiente manera: aproximadamente el 52.7 % corresponde a medidores electromecánicos unidireccionales, el 40.9 % a medidores electrónicos no inteligentes, mientras que los medidores inteligentes unidireccionales (AMI) alcanzan cerca del 3.4% y los bidireccionales (AMI) a llegan al 2.6 % del total instalado. (SSDP, 2021, P.20).

Como se evidencia en la ilustración 1 alrededor del 94 % de sistema de medición de energía son del tipo electromecánico y electrónico, anteriormente en

este documento se presentó que estos dos dispositivos tienen algo en particular y es que ambos requieren de una lectura manual, por ende, los datos pueden llegar a tener problemas como errores humanos, cobros indebidos y poca confiabilidad en la información (Guillermo et al., s/f.)

Ilustración 1  
*Distribución de los medidores de energía eléctrica en el SIN*



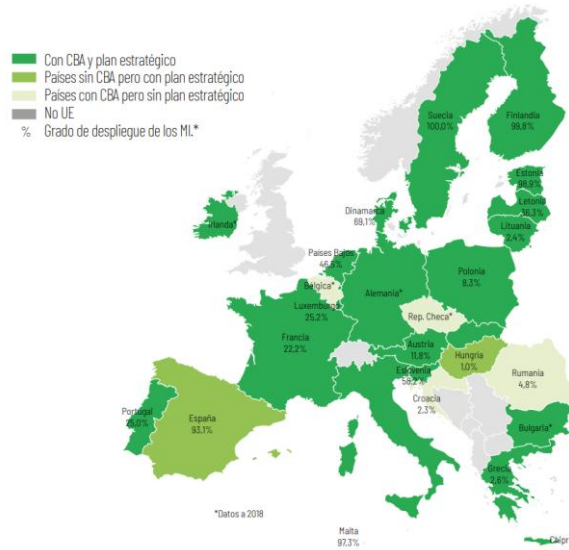
Nota. Distribución de medidores de energía en el Sistema Interconectado Nacional [SIN], Tomado de (Superservicios, 2021)

En el contexto internacional, el continente europeo es el líder en cuanto al despliegue y masificación de la medición inteligente con tasas superiores al 70% de implementación.

En 2009 La Unión Europea estableció como meta alcanzar el 80% de consumidores con medidores inteligente en el año 2020. (Recomendaciones regulatorias para incentivar el despliegue de la medición inteligente a nivel nacional, 2023, P. 61-66)

*Ilustración 2*

Grado de despliegue de AMI en los países europeos



Nota. Tomado de (Noé & Pérez, n.d.)

Mientras que en América Latina se destacan países como Chile, ya que cuenta con una mayor preparación en cuanto a un despliegue masivo de la medición inteligente: establecieron una estrategia y han realizado amplios desarrollos regulatorios en la materia, incluyendo una normativa técnica que define todos los parámetros que ha de cumplir un medidor inteligente. Aun que, para 2019 no habían comenzado con un despliegue masivo, se empezaron a implementar pilotos por parte de distribuidoras como Enel, el cual instaló 250.000 medidores en Santiago de Chile. En contraste con el panorama internacional, Colombia se encuentra en una etapa inicial, con una implementación marginal que revela la necesidad de democratizar el acceso a estas tecnologías mediante alternativas de bajo

costo.(Recomendaciones Regulatorias Para Incentivar El Despliegue de La Medición Inteligente a Nivel Nacional, 2023)

La modelación se entiende como el proceso de aprendizaje que acompaña al trabajo con modelos, no solo a la hora de construirlos, sino también de aplicarlos, revisarlos, modificarlos o, llegado el caso, cambiarlos por otros distintos (Justi & Gilbert, 2002). En el contexto de este proyecto la modelación permite recrear la interacción entre el suministro eléctrico residencial, los sensores de medición, el microcontrolador y la plataforma IoT, facilitando la evaluación de su viabilidad técnica y su escalabilidad hacia viviendas reales.

Para representar espacialmente la vivienda tipo y la ubicación del medidor inteligente, se utilizó el software SketchUp, una herramienta de modelado 3D que permite construir entornos arquitectónicos con precisión y simplicidad.

Para diseñar la arquitectura lógica del sistema (flujo de datos, comunicación y almacenamiento) se empleó la herramienta draw.io. Esta aplicación permite crear diagramas de infraestructura, redes IoT y arquitectura de sistemas de forma intuitiva y basada en plantillas. Su versatilidad ha sido documentada en el ámbito de la ingeniería para representar componentes y relaciones complejas en diagramas estructurados (Draw.io, s/f). En el proyecto del medidor AMI se generó un diagrama que muestra la conexión entre sensores de corriente y voltaje, el microcontrolador ESP32, la plataforma Blynk y el usuario final, permitiendo que todos los actores y flujos queden claramente identificados

Con este proyecto se propone un prototipo pequeña escala de sensores y plataforma IoT de bajo costo y la modelación de este a gran escala, con el que se busca democratizar el

acceso a la medición inteligente en el sector residencial, creando un puente hacia la transición energética justa.

## MARCO LEGAL Y NORMATIVO

El presente proyecto se encuentra en el marco del contexto normativo colombiano. A continuación, se presentan las principales disposiciones legales y técnicas que orientan el diseño e implementación del sistema medidor AMI de bajo costo para el sector residencial en Bogotá, asegurando su viabilidad técnica, cumplimiento regulatorio y pertinencia legal.

Resolución CREG 101-1 de 2022: Establece las condiciones para aplicar la Infraestructura de Medición Avanzada en el Sistema Interconectado Nacional, especificando roles, pasos de aplicación y referido en principio como propiedad del usuario de la información, motivo por el cual se decidió este abordaje/ investigación como eje para el diseño de la plataforma de gestión de la información de esta tesis (Resolución CREG 101-001, 2022)

Resolución 40483 de 2019 Ministerio de Minas y Energía: Metas de cobertura nacional para medidores inteligentes al 2030; considerado en este trabajo de bajo costo como un aporte a dicho objetivo al proponer una alternativa viable para acelerar masificación AMI en el sector residencial (Resolución 40483, 2019).

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) Resolución 40117 de 2024: establece requisitos mínimos de seguridad, confiabilidad y eficiencia, en la ejecución de las instalaciones eléctricas en Colombia; con esta norma se orientó la elección de materiales, sensores y tipos de cable, al garantizar en la fabricación del prototipo la normatividad requerida en el país para su instalación y operación (Resolución 40117 , 2024).

Normas Técnicas Colombianas (NTC - ICONTEC): NTC 6079: Esta norma se relaciona específicamente con requisitos de los sistemas de infraestructura para la medición inteligente, precisan metrológicas, de calibración y otras funcionalidades; en las demás normativas mencionadas se hace referencia a principios y características asociadas a AMI (NTC 6079, 2021,19 de mayo).

Ley 1581 de 2012: Trata sobre la Protección de Datos Personales: Debido a que el sistema AMI realiza la recopilación, transmisión y almacenamiento de información sobre el consumo de energía de los usuarios, es importante resaltar esta ley para el diseño. regula el tratamiento de información al interior de la organización (Ley 1581, 2012,17 octubre).

## **ANÁLISIS DE RESTRICCIONES**

### **Restricciones de Hardware**

#### ***Limitación de rango de medición de sensores***

El sensor de corriente SCT-013-5A utilizado en el prototipo presenta una restricción operativa crítica: su capacidad máxima de medición es de 5 amperios RMS. Esta limitación impide su aplicación directa en instalaciones residenciales reales donde la corriente nominal puede alcanzar 30A o más en circuitos principales. Para el modelado de escalabilidad, será necesario especificar sensores con capacidad de medición de al menos 60A para cumplir con los requisitos de sobrecarga establecidos en la NTC 5019.

#### ***Capacidad de procesamiento y memoria del ESP32***

El microcontrolador ESP32 tiene memoria RAM limitada (520 KB) y memoria flash de 4 MB, lo que restringe la cantidad de datos históricos que pueden almacenarse localmente antes de su transmisión a la nube. Esta limitación impone la necesidad de transmitir datos

con frecuencia mínima cada 15 minutos, generando dependencia constante de conectividad WiFi. En caso de pérdida de conexión prolongada, el sistema solo puede almacenar aproximadamente 24-48 horas de mediciones antes de alcanzar el límite de memoria disponible

## **Restricciones de Software y Plataforma IoT**

### ***Limitaciones de la plataforma Blynk (versión gratuita)***

La versión gratuita de Blynk.io presenta restricciones significativas para implementación a gran escala: límite de 2,000 datapoints por día, almacenamiento histórico máximo de 30 días, y máximo de 2 dispositivos conectados por cuenta. Para escalar el sistema a nivel residencial o comunitario, será necesario migrar a planes de pago (Blynk Plus o Business) con costos que pueden alcanzar \$6.99 USD mensuales por dispositivo, afectando la viabilidad económica del modelo de bajo costo propuesto.

## **Restricciones Económicas**

### ***Costos de implementación***

El elevado costo de medidores importados ha limitado la cobertura a menos del 1% en Colombia (2024). La Resolución CREG 101-1 de 2022 establece límite anual del 15% del costo base de comercialización. El proyecto debe desarrollar alternativa de bajo costo usando ESP32 como microcontrolador y Blynk.Io como plataforma IoT.

## **Restricciones de Hardware y Software**

### ***Microcontrolador ESP32***

Seleccionado por su capacidad de procesamiento, conectividad inalámbrica y bajo consumo energético. Debe transmitir datos mediante protocolos IoT a la nube con intervalos regulares.

### ***Plataforma Blynk.Io***

Debe garantizar almacenamiento en nube, visualización web/móvil (Android/iOS), exportación de datos en CSV/Excel, alertas automáticas y administración remota de medidores. Requiere alta disponibilidad y escalabilidad desde pilotos pequeños hasta operación masiva.

## **Restricciones Normativas**

### ***Cumplimiento obligatorio***

- RETIE (Resolución 40117 de 2024): Seguridad, confiabilidad y eficiencia en instalaciones eléctricas
- NTC 6079: Requisitos de infraestructura de medición avanzada
- Ley 1581 de 2012: Protección de datos personales en recopilación de consumo energético

## **Restricciones de Operación**

### ***Vida útil y mantenimiento***

Los dispositivos AMI tienen vida útil estimada de 10-15 años, requiriendo mantenimientos preventivos y calibraciones periódicas. La calidad de componentes electrónicos impacta directamente en la resistencia y probabilidad de fallas.

### *Restricciones Ambientales*

Debe alinearse con ISO 50001:2018 para gestión energética. El diseño debe considerar ciclo de vida completo: fabricación, transporte, funcionamiento y disposición final, priorizando tecnologías con menor huella de carbono y mayor capacidad de reciclaje.

## **ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**

Para el presente proyecto se evaluaron dos alternativas principales para el diseño del prototipo, las cuales responden a dos diferentes enfoques de implementación. La primera alternativa que se evaluó es un medidor AMI a gran escala y por otro lado, un medidor AMI a pequeña escala con una modelación escalable con aplicación en el sector residencial. Cada una de estas opciones fue analizada bajo criterios de viabilidad técnica, económica y legal.

La primera alternativa, orientada a la implementación a gran escala, implicaba el uso de sensores de alta capacidad, módulos de comunicación de largo alcance y equipos certificados bajo la normativa NTC 6079. Técnicamente, habría permitido validar la infraestructura AMI completa, incluyendo la comunicación bidireccional y la integración con sistemas de facturación. Sin embargo, su ejecución requería cumplimiento estricto del RETIE, certificaciones y conexión directa a la red pública, elevando los costos e implicaciones de seguridad, lo que hacía inviable su aplicación en el contexto de un proyecto de grado. A nivel social, su adopción estaría limitada por los altos costos de instalación y dependencia de las empresas distribuidoras, restringiendo el acceso de los usuarios residenciales.

Por otro lado, la segunda alternativa se centra en un prototipo de medidor inteligente a pequeña escala con una modelación de su escalabilidad. Esta opción de prototipo se diseñó con el fin de democratizar la información de la energía y empoderar al consumidor residencial mediante la entrega directa de información sobre su consumo energético. Este enfoque prioriza la experiencia del usuario y la eficiencia energética a través de una arquitectura tecnológica basada en el microcontrolador ESP32, sensores calibrados y una plataforma IoT (Blynk.io) para la visualización y análisis de datos en tiempo real. El sistema permite monitorear el consumo, acceder a la información en tiempo real desde dispositivos móviles y comparar el consumo energético con el facturado por la empresa comercializadora, fomentando el ahorro energético.

En cuanto a esta alternativa ofrece ventajas multidimensionales. Desde el punto de vista técnico, permite una comunicación en tiempo real con almacenamiento en la nube, facilitando un análisis histórico y la escalabilidad. En el plano económico, favorece la reducción del gasto eléctrico en los hogares y optimiza la planificación del consumo mensual. A nivel social, promueve transparencia de la información y la participación activa del ciudadano en la transición energética justa. Asimismo, cumple con las disposiciones de la Resolución CREG 101-1, la Resolución 40483 de 2019 y el RETIE 40117 de 2024, garantizando la protección de datos personales y la transparencia informativa.

Con este prototipo Colombia logrará alinearse a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 Paris, en especial con el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables). Los cuales promueven el acceso equitativo a la energía, la sostenibilidad urbana y el consumo responsable.

## DISEÑO METODOLOGICO

La elección y el desarrollo de la solución planteada se pusieron en práctica mediante un proceso sistemático de ingeniería, orientado a detectar, evaluar y validar la opción más adecuada para diseñar un prototipo funcional de medidor AMI de bajo costo a pequeña escala, que sirva como modelo base para su futura aplicación en entornos residenciales, apoyándose en el microcontrolador ESP32 y la plataforma de IoT Blynk 2.0 para asegurar el cumplimiento de la normativa anteriormente establecida.

### **Generación de alternativas de solución**

En un primer momento se hizo un análisis comparativo de una serie de configuraciones de sistema AMI, teniendo en cuenta su aplicabilidad sobre el sector residencial de Bogotá. Las alternativas que se evaluaron fueron:

- Alternativa A. Un sistema AMI a gran escala para el sector residencial en Bogotá, Colombia, que incluye módulos de gestión de la red, detección de pérdidas y de facturación automática.
- Alternativa B. Un sistema AMI de pequeña escala con su modelo escalable, con capacidad de monitoreo en tiempo real, modelado para su aplicación residencial y enfocado en la accesibilidad económica y la democratización del uso de tecnologías IoT.

Para cada alternativa se realizó el análisis en base a criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales, atendiendo a los requerimientos y limitaciones establecidos anteriormente. Así pues, la Alternativa B fue la más viable pues se obedece a los objetivos del proyecto, orientados a la democratización de la medición inteligente y el cumplimiento de los ODS.

## **Revisión De Factibilidad Y Coherencia Técnica**

Se desecharon aquellas soluciones que no tenían ningún sentido y aquellas que no respetaban las leyes físicas ni los estándares técnicos, cumpliendo así aspectos como los datos de seguridad eléctrica y metrología que permitan aplicar el RETIE y la NTC 6079. El sistema que se plantea está basado en tecnologías abiertas y de bajo consumo energético.

- ESP32: Microcontrolador dual-core que integra conectividad Wi-Fi/Bluetooth, permitiendo una transmisión de datos desde y hacia la nube de manera eficiente y segura.
- Blynk 2.0: Plataforma IoT que permite la visualización y gestión de datos desde dispositivos móviles y web, que permite la escalabilidad, ser una solución de nube y permite también configurar alertas.

## **Comparación Con Hechos Conocidos**

Se llevaron a cabo una serie de consultas de experiencias previas realizadas sobre proyectos de medición inteligente por empresas del sector, así como estudios académicos (Enel Colombia, IBM, UPME, Espressif Systems), lo que permitió identificar buenas prácticas de diseño en cuanto a calibración de sensores, transmisión segura de datos o manejo de la interfaz usuario-plataforma.

El prototipo propuesto se aleja de las soluciones convencionales, ya que permite la medición en tiempo real, la visualización remota de consumos, así como la gestión de alertas automáticas, funcionalidades que no desempeñan los tradicionales medidores electromecánicos y a los electrónicos actuales.

## Evaluación de alternativas y justificación de la solución

La evaluación de las alternativas consideró los siguientes criterios:

Tabla 1  
*Análisis de alternativas*

<b>Criterio</b>	<b>Alternativa A (sistema gran escala)</b>	<b>Alternativa B (pequeña escala y modelado)</b>
Viabilidad técnica	Alta	Alta
Costo de implementación	Elevado	Bajo
Escalabilidad	Media	Alta
Acceso a la información por el usuario	Limitado	Total
Cumplimiento normativo	Sí	Sí
Contribución a ODS	Parcial	Alta

Nota. Fuente el autor

A partir de la comparación anterior, se llega a la conclusión de que Alternativa B, que funciona a partir de ESP32 junto con Blynk 2.0, es la alternativa óptima. Los motivos son los siguientes: por una parte, el equilibrio de funcionalidad/sostenibilidad/rentabilidad; por otra parte, es la alternativa que favorece la participación del usuario final; mejora la transparencia en el uso de los datos de consumo; promueve hábitos energéticos más sostenibles.

### Desarrollo y validación de la solución seleccionada

La concepción metodológica que dio forma al prototipo se realizó bajo una consideración iterativa, la cual engloba una serie de etapas.

- **Diseño conceptual:** en esta fase se desarrolla la arquitectura del sistema, se define cuáles son las variables que se desean medir (voltaje, corriente, potencia y energía) y los componentes electrónicos a incluir.
- **Integración de hardware:** en esta fase se dedica a montar los sensores calibrados conforme a la norma NTC 6079 del microcontrolador ESP32.

- **Desarrollo de software:** en este momento lo que se hace es configurar la plataforma Blynk 2.0, de tal forma que tuviera la capacidad de recibir, almacenar y visualizar los datos energéticos.
- **Pruebas y validación:** en esta etapa se llevan a cabo las pruebas del prototipo dentro de condiciones controladas, para analizar la precisión, estabilidad y funcionamiento del sistema.
- **Modelación a escala residencial:** Simulación del comportamiento del sistema en una vivienda, analizando la escalabilidad del modelo y su potencial implementación en redes reales.
- **Evaluación de impacto:** en esta etapa se analiza la reducción del coste, la facilidad de uso y el potencial para el ahorro energético.

## **RESULTADOS DE DESARROLLO DE LA PROPUESTA**

El prototipo de pequeña escala del medidor AMI de bajo costo fue diseñado con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica y funcional de este tipo de sistemas. con el fin, de modelar su escalabilidad aplicable al sector residencial en Bogotá, Colombia.

### **Esquema general del sistema**

El diseño electrónico del sistema se basó en tres componentes funcionales:

Componente de medición:

Este apartado del sistema está compuesto por los sensores SCT-013-5A (corriente) y ZMPT101B (voltaje), esto son los encargados de convertir las señales eléctricas analógicas en valores proporcionales aptos para el procesamiento del ESP32.

Componente de procesamiento:

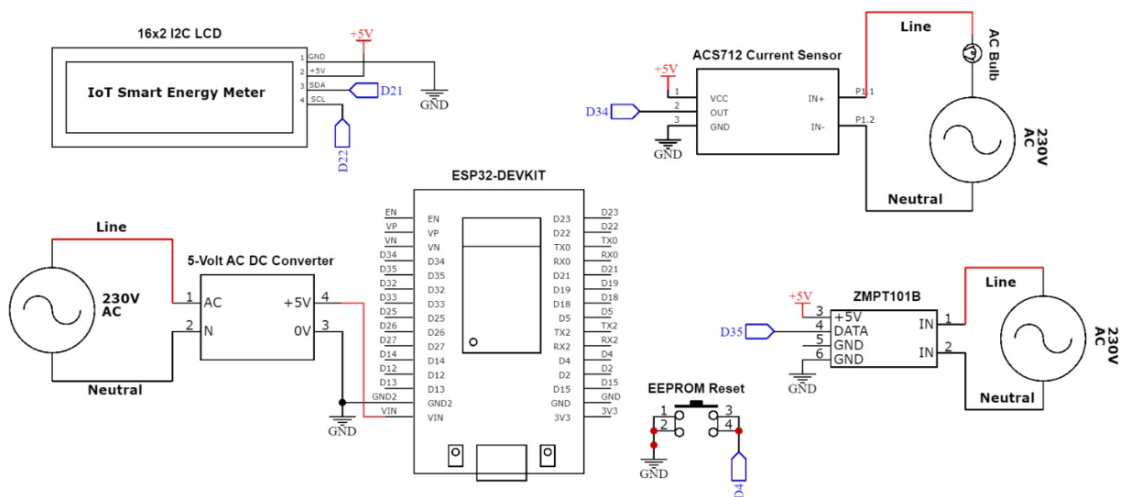
El microcontrolador ESP32 realiza la lectura analógica de los sensores, aplica filtros digitales y calcula las variables eléctricas principales: voltaje RMS, corriente RMS, potencia activa y energía consumida.

Los cálculos se ejecutan en intervalos de muestreo de 20 ciclos de la señal de 60 Hz, garantizando una medición confiable.

Componente de comunicación:

La información procesada por el microcontrolador e se envía a la nube a través de la red Wi-Fidel lugar donde se encuentre conectado el prototipo, utilizando el protocolo Blynk Cloud API.

Ilustración 3  
*Esquema del circuito eléctrico con sensores y ESP32*



Nota.Tomado de (Kandu, 2025).

## **Desarrollo de Software y Arquitectura de Programación**

### ***Arquitectura del Sistema***

El software del prototipo fue desarrollado en lenguaje C++ sobre el entorno Arduino IDE, adoptando una arquitectura modular de tres capas funcionales: capa de adquisición (lectura de sensores), capa de procesamiento (cálculos de variables eléctricas), y capa de comunicación (transmisión a Blynk y almacenamiento local).

### ***Librerías Principales***

El código integra librerías especializadas para cada función crítica:

**EmonLib:** Implementa algoritmos de cálculo RMS para señales AC, realizando muestreo digital de 20 ciclos completos (333 ms) para obtener valores estables de voltaje y corriente.

**BlynkSimpleEsp32:** Gestiona la comunicación bidireccional con la plataforma cloud mediante pines virtuales (V0-V4), transmitiendo datos cada 2 segundos.

**EEPROM:** Garantiza persistencia de datos críticos (energía acumulada y costo) en memoria no volátil, protegiéndolos ante cortes de energía.

**LiquidCrystal\_I2C:** Controla la visualización dual alternante en pantalla LCD mediante protocolo I2C (pines 21-22).

### ***Algoritmo de Medición***

El ciclo principal ejecuta dos tareas prioritarias mediante temporizadores: medición y transmisión cada 2 segundos con `sendEnergyDataToBlynk()`, y alternancia de visualización en LCD entre valores instantáneos (V, A, W) y acumulados (kWh, costo).

La secuencia de medición sigue este flujo: muestreo multicíclico con  $\text{emon.calcVI}(20, 2000)$  → cálculo de energía mediante integración temporal de potencia → actualización de costo con tarifa de 6.5 \$/kWh → transmisión a Blynk y guardado en EEPROM → actualización del display LCD.

### ***Calibración y Ajuste***

Los factores de calibración  $v\text{Calibration} = 41.5$  y  $\text{currCalibration} = 1.80$  fueron determinados experimentalmente comparando lecturas con un multímetro de referencia, logrando un error inferior al 5% en condiciones controladas.

### ***Mecanismos de Protección***

El código incorpora validaciones críticas: timeout de conexión WiFi (20 segundos), rechazo de deltas temporales anómalos (>10 min), verificación de valores NaN en EEPROM, y condicionales `Blynk.connected()` para evitar bloqueos por pérdida de red

### ***Interfaz IoT y visualización***

En **Blynk.io** se diseñó un panel de control (dashboard) el cual es accesible desde dispositivos móviles y navegadores web.

El panel incluye las siguientes características:

Medidores digitales para voltaje (V), corriente (A) y potencia (W).

Indicador de energía acumulada (kWh).

Costo de la energía consumida (pesos colombianos)

#### Ilustración 4

*Visualización de la Medición en la plataforma Blynk.io*



Nota. Fuente el Autor

#### ***Ensamblaje físico***

El sistema se montó sobre una protoboard experimental, con conexiones protegidas y alimentación de 5V DC mediante una fuente externa.

Los sensores se calibraron comparando las lecturas del prototipo con un multímetro de referencia, ajustando el factor de calibración de la librería EmonLib hasta obtener un error de medición inferior al 5%.

#### **Resultados del prototipo a pequeña escala**

Las pruebas experimentales se realizaron con cargas resistivas (bombillos de 15 W, 40 W y 60 W) conectadas a una fuente de 120 V AC. Los datos obtenidos fueron comparados con mediciones de referencia de un multímetro, los resultados fueron los siguientes.

Tabla 2  
*Resultados Cargas prototipo Prueba A*

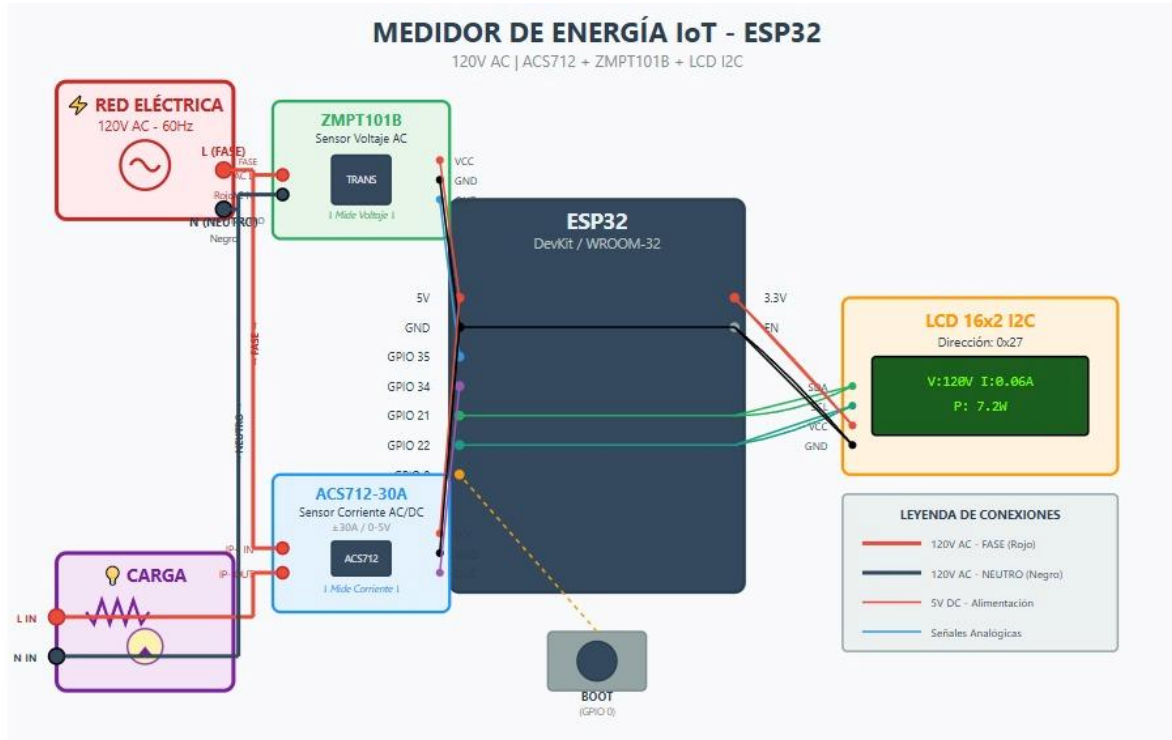
Cargas resistivas (bombillos led)	Prototipo (A)	Multímetro (A)
15W	0.06 A	0.062A
40W	0.18A	0.185A
50W	0.28A	0.285A

Tabla 3  
*Resultados Cargas prototipo Prueba V*

Cargas resistivas (bombillos led)	Prototipo (V)	Multímetro (V)
15W	109.2 V	109.5V
40W	108.8V	109.1V
50W	108.3V	108.6V

### **Modelado a escala residencial**

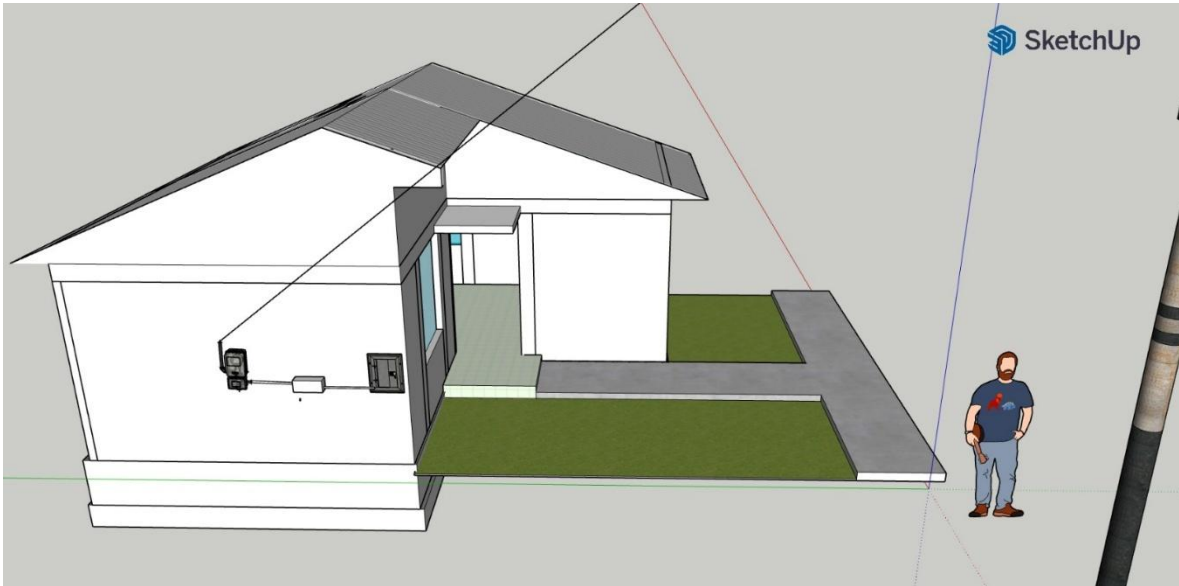
Para el diseño del modelado escalable del medidor AMI de bajo costo se realizó el diagrama de funcionamiento de circuito, donde este compuesto por la carga de la red eléctrica, conexión a sensores de corriente (ZMPT 101B) y voltaje (ACS712-30A), transmitiendo estos datos a la ESP32 la cual los carga al software blynk.io, como a su vez



Nota. Elaboración Propia

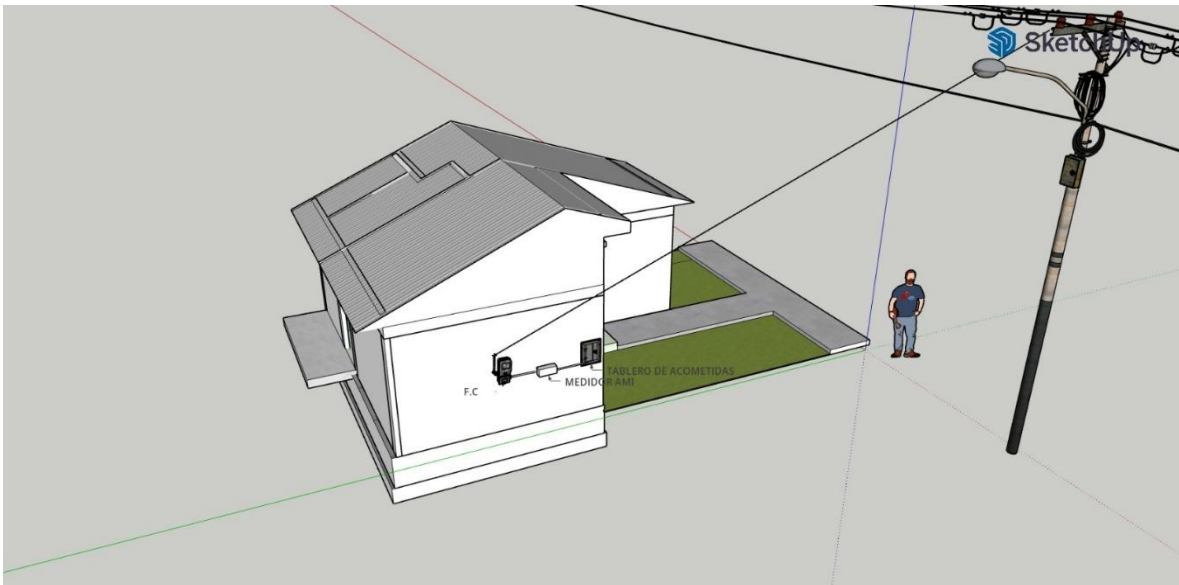
Para tener un visión más claro de cómo se vería el medidor instalado en una vivienda residencial de Bogotá, Colombia se propone el siguiente modelado donde se describe la instalación de el medidor. Desde la red eléctrica pasa por la frontera comercial hacia el medidor AMI conectado a la IoT y termina en el tablero de distribución eléctrica

Ilustración 6  
*Modelación a escala residencial medidor AMI*



Nota. Elaboración Propia

Ilustración 7  
*Modelación a escala residencial medidor AMI*



Nota. Elaboración Propia

## ANÁLISIS DE COSTOS

En este apartado se presenta el análisis económico para estimar los requerimientos financieros asociados al proceso de implementación del medidor de energía IoT con ESP32, integrando costos iniciales de inversión, gastos operativos y capital de trabajo necesarios para la operación básica y pruebas del sistema.

Tabla 4  
*Costos directos y operativos medidor IoT*

Cantida	Concepto	Costo Unitario (COP)	Envío (COP)	Subtotal (COP)
1	Mano de obra	\$ 60,000	-	\$ 60,000
1	ESP32 DevKit	\$ 43,000	\$ 12,000	\$ 55,000
1	Sensor ZMPT101B	\$ 15,900	\$ 12,000	\$ 27,900
1	Sensor SCT-013-5A	\$ 8,000	\$ 12,000	\$ 20,000
1	LCD 16x2 I2C	\$ 19,000	\$ 12,000	\$ 31,000
1	Protoboard y cables	\$ 8,000	\$ 12,000	\$ 20,000

		\$		\$
1	Filamento PLA	50,000	-	50,000
1	Servicio de impresión 3D	75,000	-	75,000
-	Servicio eléctrico	3,000	-	3,000
-	Mantenimiento	4,000	-	4,000
-	Otros	10,000	-	10,000
Total				\$ 355,900

**Nota.** Elaboración propia con precios de tiendas electrónicas colombianas.

Como se observa en la Tabla 2, el costo directo del medidor IoT a un circuito es de \$355.900 COP, integrando componentes electrónicos, carcasa 3D, mano de obra de montaje y gastos menores de prueba.

Resume los costos asociados a los equipos de apoyo necesarios para el diseño, programación y pruebas del medidor IoT. Estos recursos no hacen parte del hardware final del sistema, pero sí representan una inversión esencial dentro del proceso de desarrollo y validación del prototipo.

Tabla 5

*Recursos de apoyo utilizados durante el desarrollo del proyecto*

Cantidad	Concepto	Descripción	Costo total (COP)
1	Uso de computador	Desarrollo, programación y pruebas (estimado)	64.000
1	Herramientas	Multímetro, pinzas, soldadura, prototipado	40.000
1	Insumos operativos	Materiales consumibles menores del laboratorio	20.000
—	Total recursos de apoyo		124.000

**Nota.** Los recursos de apoyo representan insumos, herramientas y equipos utilizados durante el diseño, programación y pruebas del prototipo. Estos valores no corresponden al hardware del medidor, sino a los elementos requeridos para el desarrollo del proyecto. Para el escalado, este total se distribuye proporcionalmente entre los diez medidores implementados. Fuente: Elaboración propia con precios reales diciembre 2025.

La Tabla 4 presenta el capital de trabajo estimado para el funcionamiento inicial del prototipo durante su fase de pruebas. Incluye insumos menores, energía y reemplazo básico de componentes que puedan deteriorarse durante la etapa de validación.

*Tabla 6*

*Capital de trabajo del proyecto*

<b>Concepto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo total (COP)</b>
Insumos menores	Materiales para ensayos, cables, conectores, cinta, consumibles de prototipado	10.000
Servicios	Energía utilizada durante las pruebas y soporte técnico básico	5.000
Mantenimiento	Reposición de componentes menores dañados durante el proceso de validación	5.000
—	<b>Total capital de trabajo del proyecto</b>	<b>20.000</b>

**Nota.** El capital de trabajo corresponde a los insumos y servicios necesarios para garantizar el funcionamiento de cada medidor durante su fase de pruebas y operación inicial. Fuente: Elaboración propia.

Escalado individual por vivienda con suscripción compartida

Para implementar el sistema en 10 viviendas, cada hogar cuenta con un medidor individual, pero comparten una única suscripción anual a Blynk.

Los costos indirectos (recursos de apoyo + capital de trabajo) se prorratean entre las viviendas:

144.000 COP / 10 = **14.400 COP por vivienda.**

*Tabla 7  
Costos Escalado a Nivel Residencial*

<b>Concepto</b>	<b>Valor por vivienda (COP)</b>
Hardware / montaje del medidor IoT	355.900
Suscripción Blynk (dividida entre 10 viviendas)	34.800
Prorrateso de recursos de apoyo + capital de trabajo (1/10)	14.400
<b>Subtotal por vivienda</b>	<b>405.100</b>
OPEX anual (mantenimiento + consumo energético)	7.000
<b>Total primer año por vivienda</b>	<b>412.100</b>

**Nota.** Elaboración propia

El análisis realizado permite determinar que la implementación del medidor IoT presenta un costo accesible tanto en el desarrollo del prototipo como en su escalado a múltiples viviendas. El modelo de suscripción compartida reduce significativamente los gastos recurrentes, manteniendo la independencia de medición por hogar. Los valores

obtenidos muestran que el sistema es económicamente viable y puede ser adoptado por comunidades con recursos limitados, especialmente si se amplía la producción o se gestionan acuerdos colectivos de servicio.

### **Análisis De Mercado**

Para evaluar la viabilidad económica del sistema IoT en un conjunto residencial de diez viviendas, se proyectó un flujo de caja a cinco años con base en la inversión inicial y el ahorro energético acumulado generado por el monitoreo en tiempo real. La inversión total requerida asciende a **4.121.000 COP**, mientras que el ahorro anual estimado del conjunto es de **672.000 COP**, considerando una reducción conservadora del 8% del consumo eléctrico.

El análisis financiero arroja una **Tasa Interna de Retorno (TIR) estimada entre 11% y 13%**, lo cual demuestra que el proyecto posee una rentabilidad positiva aun bajo un escenario conservador. Esta TIR resulta significativa para un proyecto de eficiencia energética comunitaria, pues supera el rendimiento promedio de inversiones residenciales tradicionales y se logra sin costos adicionales por infraestructura, dado que los medidores IoT utilizan redes existentes y no requieren modificaciones eléctricas mayores.

El uso de medidores IoT permite reducir entre 8% y 12% el consumo eléctrico gracias al monitoreo en tiempo real. Considerando una factura promedio de 70.000 COP al mes y un ahorro conservador del 8%:

- Ahorro mensual por vivienda: **5.600 COP**
- Ahorro anual por vivienda: **67.200 COP**

- Ahorro anual del conjunto (10 viviendas):

**Ahorro total anual = 672.000 COP**

### ***TAM – Mercado Total Disponible***

Corresponde a todas las viviendas que podrían utilizar el sistema IoT. Bogotá cuenta con cerca de 2.6 millones de viviendas, y aproximadamente el 95% dispone de medición eléctrica individual.

**TAM  $\approx$  2.470.000 viviendas**

### ***SAM – Mercado Accesible***

Se refiere al segmento del TAM que puede atenderse realmente con la solución. Incluye conjuntos residenciales, edificios multifamiliares y unidades cerradas con infraestructura eléctrica organizada. Representan alrededor del 30% del total.

**SAM  $\approx$  741.000 viviendas**

### ***SOM – Mercado Objetivo Real***

Es el mercado que puede captarse en la fase inicial del proyecto. Se seleccionó un conjunto residencial de 120 viviendas, con una prueba piloto de 10 viviendas.

**SOM inicial = 10 viviendas**

**SOM potencial = 120 viviendas**

## **ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD**

### **Sostenibilidad Ambiental**

El sistema IoT de monitoreo energético contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental al permitir que los usuarios identifiquen y gestionen su consumo

eléctrico en tiempo real. Esta visibilidad mejora la eficiencia energética del hogar, pudiendo reducir entre un **8%** y **15%** el consumo anual, lo que disminuye la demanda energética y la huella de carbono asociada a la generación.

Los componentes electrónicos utilizados son de bajo consumo y tienen una vida útil prolongada, reduciendo la necesidad de reemplazos frecuentes. Además, varios de ellos pueden ser reutilizados en futuras versiones o reciclados mediante procesos de disposición adecuada. La carcasa impresa en 3D también puede fabricarse con materiales biodegradables como PLA, reforzando la sostenibilidad del dispositivo.

### **Sostenibilidad Social**

El proyecto promueve una cultura de uso responsable de la energía dentro de los hogares. Al visualizar el consumo en tiempo real, los usuarios pueden tomar decisiones informadas, cambiar hábitos y reducir gastos. En conjuntos residenciales, esto fomenta prácticas colectivas de ahorro y mejora la transparencia en el uso de servicios compartidos.

El sistema también aporta a la seguridad del hogar: permite detectar sobrecargas, fallos eléctricos y patrones anómalos que podrían representar riesgos. Su facilidad de uso y accesibilidad lo vuelven adecuado para hogares de diferentes niveles socioeconómicos, promoviendo la inclusión tecnológica y disminuyendo desigualdades en el acceso a soluciones inteligentes.

## **Sostenibilidad Económica**

Desde el punto de vista económico, el proyecto es sostenible tanto en el corto como en el largo plazo.

Para los usuarios:

- El ahorro energético anual contribuye a recuperar la inversión inicial.
- La reducción de consumos innecesarios disminuye la tarifa final mensual.

## **Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**

El proyecto contribuye directamente a varios ODS definidos por Naciones Unidas:

### **ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante**

Promueve la eficiencia energética residencial y reduce el desperdicio eléctrico.

### **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura**

Integra tecnologías IoT para mejorar infraestructura doméstica digital.

### **ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles**

Facilita la gestión inteligente de recursos en conjuntos residenciales.

### **ODS 12: Producción y Consumo Responsables**

Impulsa prácticas de consumo consciente mediante monitoreo en tiempo real.

### **ODS 13: Acción por el Clima**

Disminuye emisiones indirectas de CO<sub>2</sub> al reducir la demanda eléctrica.

Esta alineación con los ODS fortalece el impacto social, ambiental y económico del proyecto.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante la validación experimental del prototipo de medidor AMI a pequeña escala, demostraron un comportamiento estable, consistente y técnicamente adecuado para la primera fase del diseño de este medidor orientado al uso en el sector residencial en Bogotá, Colombia

Al comparar las mediciones realizadas por el prototipo con los valores de referencia obtenidos mediante un multímetro certificado, se observa que el sistema presenta un margen de error reducido, con desviaciones promedio del 0.017% en corriente y menos del 0.002% en voltaje, parámetros que se encuentran dentro del rango esperado para sensores económicos como el SCT-013 y el ZMPT101B.

Este desempeño confirma que la arquitectura basada en (microcontrolador ESP32, sensores calibrados de voltaje y corriente, plataforma IoT Blynk) es adecuada para la adquisición y transmisión de datos eléctricos en tiempo real.

Para tener una validación mucho más concreta y certera, el prototipo fue validado con cargas de baja potencia (bombillos LED entre 15 W y 50 W), la reiteración de las mediciones, la estabilidad del muestreo y la consistencia con el multímetro evidencian que la metodología de medición es sólida, lo que permite concluir que, al escalar el sistema con sensores de mayor capacidad, sería posible replicar el desempeño en aplicaciones residenciales reales.

Otro aspecto relevante es el desempeño del sistema IoT, el prototipo es capaz transmitir datos de manera continua hacia la plataforma Blynk sin interrupciones significativas, demostrando tener una comunicación inalámbrica estable y confiable.

La modelación desarrollada mediante SketchUp y Draw.io permitió deducir el funcionamiento del prototipo a pequeña escala hacia un escenario de aplicación real en una vivienda residencial. Los resultados obtenidos en esta etapa demuestran que la arquitectura propuesta es técnicamente escalable y que los principios operativos validados en laboratorio pueden adaptarse a condiciones reales de operación dentro de un entorno doméstico.

El modelo construido en SketchUp permitió representar de forma tridimensional la disposición de los elementos del sistema AMI, incluyendo el medidor inteligente, la acometida eléctrica, el tablero de distribución y la ubicación de cargas típicas del hogar. Este ejercicio evidenció que el sistema puede integrarse en la infraestructura residencial tradicional sin requerir modificaciones significativas en la instalación eléctrica, lo cual constituye un aspecto clave para su viabilidad técnica y económica.

Por su parte, los diagramas realizados en Draw.io permitieron detallar la arquitectura funcional del sistema en escala real, representando el flujo de energía y datos entre el medidor, el usuario y la plataforma IoT. Los resultados de esta modelación mostraron que el sistema mantiene su coherencia operativa al escalarse: la lógica de adquisición, procesamiento y transmisión de datos es la misma que la utilizada en el prototipo, solo que con sensores de mayor capacidad y un sistema de aislamiento eléctrico más robusto. Esto confirma que la estructura del prototipo es replicable a gran escala sin comprometer la integridad del proceso de medición.

Finalmente, al comparar la operación del prototipo y su versión modelada a escala residencial, nos muestra una limitación en baja potencia, especialmente las asociadas al sensor de corriente podrían mitigarse con sensores de mayor exactitud y con una

calibración adaptada a cargas domésticas reales. En conjunto, los resultados muestran que la modelación respalda la factibilidad técnica, la escalabilidad y la aplicabilidad práctica del sistema propuesto, constituyendo una transición lógica entre la prueba experimental a pequeña escala y su implementación potencial en viviendas residenciales

## **PLAN DE IMPLEMENTACIÓN**

La implementación de un sistema AMI de bajo costo para el sector residencial en Bogotá requiere un proceso desde el cual se evolucione el prototipo funcional desarrollado a pequeña escala hacia una solución mucho más integral. Desde el punto de vista técnico, este debe ser más robusto, seguro, escalable y comercializable. A partir de la validación experimental del prototipo a pequeña escala basado en un microcontrolador ESP32, sensores de corriente y voltaje, y la plataforma IoT Blynk, se establece un plan integral que contempla fases de optimización técnica, validación en viviendas residenciales, cumplimiento regulatorio y estrategia de mercado. Esto se lleva con el fin de garantizar que la solución no solo cumpla con los requisitos esenciales de precisión y confiabilidad, sino que en el futuro esta pueda competir y coexistir con las tecnologías AMI ya existentes en Colombia, ofreciendo un costo accesible y una experiencia de usuario centrada en el empoderamiento energético.

En la primera etapa, se realizará una optimización técnica del prototipo, en la cual se busca transformar el sistema actual, el cual está solo orientado al funcionamiento con cargas pequeñas y en condiciones controladas, lo que se busca con la actualización es una solución apta para operar en viviendas reales. Para ello es necesario sustituir los sensores de baja capacidad utilizados en el prototipo por sensores de mayor rango (entre 30 A y 100 A), los cuales son aptos y están diseñados para la medición de electrodomésticos y circuitos

residenciales. Asimismo, se deben integrar otros factores los cuales no estaban planteados en el prototipo inicial como protecciones eléctricas, aislamiento galvánico y una fuente de alimentación certificada, de acuerdo con los lineamientos del RETIE y las normas NTC 5019 y NTC 6079. Este proceso implica rediseñar parcialmente la electrónica, modificar los sensores de voltaje y corriente, además de, construir un gabinete seguro, resistente y que se alinee a las exigencias de instalaciones eléctricas residenciales. Con estas modificaciones, el prototipo evoluciona hacia una primera versión preliminar (V1.0) capaz de realizar mediciones reales bajo condiciones de red.

El siguiente paso por realizar, corresponde a la fase de validación piloto en viviendas residenciales, esto con el objetivo de verificar como se desempeña el nuevo del sistema bajo condiciones de uso cotidiano. Para llevar a cabo esta fase se seleccionarán un conjunto de entre cinco y diez hogares en Bogotá, donde se realizará la instalación del medidor bajo las medidas de seguridad correspondientes. Durante un periodo aproximado de cuatro a ocho semanas (el registro de 2 facturaciones por parte del comercializador) se registran variables como estabilidad de la transmisión de datos, precisión de la medición, continuidad de la conectividad Wi-Fi y experiencia del usuario al interactuar con la plataforma IoT. Todo esto con el fin de identificar aquellos ajustes necesarios antes de avanzar hacia la producción.

Posteriormente a la validación del prototipo preliminar, se continua a la fase de certificación, esta es de suma importancia ya que es necesaria para garantizar que la solución propuesta pueda ser implementada legalmente en viviendas residenciales en Bogotá, Colombia. Este proceso implica cumplir con la legislación vigente, entre ellas la NTC 6079 para infraestructura de medición inteligente, la NTC 5019 para medidores de energía activos, el RETIE como norma de seguridad eléctrica, y la Resolución CREG 101-11a cual presenta

los lineamientos para sistemas AMI en el país. Adicionalmente es necesario elaborar manuales técnicos, protocolos de instalación y guías de mantenimiento.

Una vez ya terminado el proceso de pruebas técnicas para certificación del sistema, se planteará una estrategia para su comercialización, esta va a ir orientada principalmente a dos mercados objetivos (usuarios residenciales y aliados estratégicos). En el primer mercado objetivo al cual queremos llegar los cuales son los usuarios residenciales, entre los estratos 3 a 6 se propone vender el dispositivo acompañado de una aplicación móvil (Blynk) directamente al usuario. Este modelo busca proporcionar una herramienta económica que permita a las familias monitorear su consumo energético y reducir costos en su factura mensual. Para nuestro segundo mercado objetivo los aliados estratégicos, como empresas de servicios públicos, constructoras de vivienda VIS y entidades gubernamentales, se plantea la venta por lotes. Este enfoque multiplica el impacto del sistema y facilita su incorporación en proyectos de infraestructura energética local.

Para concluir, este plan de implementación permite modificar el prototipo a pequeña escala funcional a una solución viable e innovadora para el mercado colombiano, alineada con las políticas de eficiencia energética, con la democratización del acceso a la tecnología AMI y con los objetivos nacionales de modernización del sistema eléctrico.

## CONCLUSIONES

El desarrollo y validación del prototipo AMI de bajo costo demostraron la viabilidad tanto técnica como funcional al integrar nuevas tecnologías como la IoT en sistemas de medición eléctrica residenciales. La arquitectura basada en el microcontrolador ESP32, junto con los sensores SCT-013-5A (voltaje) y ZMPT101B (corriente), permitió obtener mediciones precisas y estables de corriente, voltaje, potencia y energía consumida, evidenciando que los componentes de bajo costo pueden ofrecer resultados confiables cuando se integran adecuadamente bajo un diseño electrónico y de software estructurado.

Desde el punto de vista técnico, el sistema logró transmitir datos eléctricos en tiempo real hacia la plataforma Blynk.io, confirmando su capacidad de comunicación inalámbrica estable y la posibilidad de escalamiento hacia viviendas residenciales en Bogotá, Colombia. La modelación desarrollada mediante las herramientas SketchUp y Draw.io validó la factibilidad de implementar el sistema en sector residencial de Bogotá, asegurando su compatibilidad con las condiciones eléctricas y normativas locales.

Finalmente, el proyecto aporta una base sólida para futuras fases de escalamiento y certificación, en cumplimiento con las normas RETIE, NTC 6079, y la Resolución CREG 101-1 de 2022, fortaleciendo el camino hacia la modernización del sistema de medición en Colombia. Se concluye que este prototipo no solo cumple los objetivos planteados, sino que constituye un paso inicial hacia la democratización de la medición inteligente y la contribución directa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, 11 y 12, promoviendo una transición energética justa.

## BIBLIOGRAFÍA

Ley 1581. (2012,17 octubre). *Congreso de la República de Colombia*  
(<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=49981> ed.).  
Alejandria 2.0.

Noé, O. Á., & Pérez, A. A. (s.f.). *BID*. Obtenido de  
<https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/La-Medicion-Inteligente-en-America-Latina-y-el-Caribe-Recomendaciones-regulatorias-para-incentivar-el-despliegue-de-la-medicion-inteligente-a-nivel-nacional.pdf>

NTC 6079. (2021,19 de mayo). *Medidores de energía eléctrica – Requisitos para sistemas de infraestructura de medición avanzada*. (<https://tienda.icontec.org/gp-requisitos-para-sistemas-de-infraestructura-de-medicion-avanzada-ami-en-redes-de-distribucion-de-energia-electrica-ntc6079-2021.html>, Ed.) Alejandria 2.0.

PEN. (Diciembre de 2024). *UPME*. Obtenido de  
<https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/PEN.aspx>

Resolución 40117 . (2024,02 de abril). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas*.  
Ministerio de Energías.

Resolución 40483. (2019,30 de mayo). *Ministerio de Minas y Energía*  
([https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_minminas\\_40483\\_2019.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40483_2019.htm) ed.). Alejandria 2.0.

Resolución CREG 101-001. (2022,18 de enero). *Comision de Regulacion de Energia y Gas*

([https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_101-1\\_2022.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_101-1_2022.htm) ed.). Alejandría 2.0.

Secretaria de Planeacion. (Noviembre de 2020). Obtenido de

<https://es.scribd.com/document/772311739/indicadores-de-consumo-de-agua-y-energia-electrica-bogota-d-c-2020-vf>

Secretaría Distrital de Ambiente [SDA]. (2025). *Alcaldia Mayor de Bogota*. Obtenido de

<https://oab.ambientebogota.gov.co/consumo-residencial-de-energia-por-habitante>

SSPD. (2024). *SuperServicios*. Obtenido de <https://www.superservicios.gov.co>

Superservicios. (2021). *Superservicios.gov.co*. Obtenido de

[https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Diagnóstico\\_de\\_Medicion\\_2021%20%281%29.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Diagnóstico_de_Medicion_2021%20%281%29.pdf)

UPME. (2023). *Upme*. Obtenido de Upme:

[https://www.minenergia.gov.co/documents/11068/Informe\\_de\\_Rendicion\\_de\\_Cuentas\\_Nov2023.pdf?utm\\_source](https://www.minenergia.gov.co/documents/11068/Informe_de_Rendicion_de_Cuentas_Nov2023.pdf?utm_source)

XM. (2025). *xm*. Obtenido de <https://www.xm.com.co/consumo/pronostico-de-demanda>

*About draw.io*. (n.d.). Retrieved November 11, 2025, from

<https://www.drawio.com/about>

*Alejandría - Resolución 101\_1 de 2022 CREG*. (n.d.). Retrieved

August 17, 2025, from

[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_101-1\\_2022.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_101-1_2022.htm)

*Alejandro - Resolución 40483 de 2019 MME.* (n.d.). Retrieved

August 10, 2025, from

[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_minminas\\_40483\\_2019.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40483_2019.htm)

Alejandro, D., Urrea, O., María, Á., Forero, S., Fernando, D.,

Tovar, B., Casas, D., Nelson, B., & Castro, Y. G. (n.d.).

*Natasha Avendaño García Superintendente de Servicios*

*Públicos Domiciliarios.*

*Aprende a leer tu medidor de luz | Enel Colombia.* (n.d.).

Retrieved August 17, 2025, from

<https://www.enel.com.co/es/personas/servicio-al-cliente/enel-distribucion-educa/aprende-a-leer-tu-medidor.html>

Camilo, O., López, L., Yesid, N., Castro, G., Andrés, C., &

Guevara, A. (n.d.). *DIAGNÓSTICO SOBRE EL ESTADO DE*

*LA MEDICIÓN INDIVIDUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA*

*EN EL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL-2023*

*SUPERINTENDENCIA DELEGADA PARA ENERGÍA Y GAS*

*COMBUSTIBLE DIRECCIÓN TÉCNICA DE GESTIÓN DE*

*ENERGÍA Bogotá, octubre de 2024 ELABORÓ.*

*Concejo de Bogotá D.C. - Denuncian oscuro panorama, para los usuarios de energía en Bogotá.* (n.d.). Retrieved August 19, 2025, from <https://concejodebogota.gov.co/denuncian-oscurο-panorama-para-los-usuarios-de-energia-en-bogota/cbogota/2024-01-14/130851.php>

*Contador digital y medición inteligente | Enel Colombia.* (n.d.). Retrieved September 9, 2025, from <https://www.enel.com.co/es/medicion-inteligente.html>

Enrique Daza Dávalos Dirección, C., & Antonio Rojas Rojas, J. (n.d.). *INFRAESTRUCTURA AVANZADA DE MEDICIÓN «AMI» EN COLOMBIA.*

*ESP32-P4 High-performance SoC | Espressif Systems.* (n.d.). Retrieved September 9, 2025, from <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-p4>

Guillermo, J., Jiménez, C., & Andrés Velásquez Vélez, R. (n.d.). *Development of Smart Energy Meter for Power Grids.* Retrieved September 9, 2025, from [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

*INTEROPERABILIDAD ENTRE MEDIDORES INTELIGENTES DE ENERGÍA ELÉCTRICA RESIDENCIAL PARA EL DMQ BAJO LAS NORMAS ANSI.* (n.d.).

Justi, R. S., & Gilbert, J. K. (2002). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers.

*International Journal of Science Education*, 24(4), 369–387.

<https://doi.org/10.1080/09500690110110142>;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Koukouvinos, K. G., Koukouvinos, G. K., Chalkiadakis, P.,

Kaminaris, S. D., Orfanos, V. A., & Rimpas, D. (2025).

Evaluating the Performance of Smart Meters: Insights into Energy Management, Dynamic Pricing and Consumer Behavior. *Applied Sciences*, 15(2), 960–960.

<https://doi.org/10.3390/APP15020960>

*La implementación de la medición inteligente de energía, a paso de tortuga | Energía | Portafolio.* (n.d.). Retrieved August 10, 2025, from <https://www.portafolio.co/energia/la-implementacion-de-la-medicion-inteligente-de-energia-a-paso-de-tortuga-610947>

*medidores de energia* . (2020). 2.

<https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/documents/Medidores-y-Grupos-de-Medida.PDF>

*¿Qué es la infraestructura de medición avanzada? | IBM.* (n.d.).

Retrieved September 9, 2025, from

<https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/advanced-metering-infrastructure>

*Recomendaciones regulatorias para incentivar el despliegue de la medición inteligente a nivel nacional. (2023).*

*What Is the Expected Lifespan of a Smart Meter? → Question.*

(n.d.). Retrieved September 9, 2025, from

<https://energy.sustainability-directory.com/question/what-is-the-expected-lifespan-of-a-smart-meter/>

## ANEXOS

### Programación del sistema

A continuación, se presenta el código el cual fue desarrollado en el entorno Arduino IDE, utilizando las librerías EmonLib.h para el procesamiento de señales eléctricas y BlynkSimpleEsp32.h para la comunicación IoT.

El algoritmo realiza el cálculo de las magnitudes eléctricas y las envía periódicamente a la nube.

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID  
"TMPL2EFdI1zdu"
```

```
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME  
"IoT medidor de energia"  
#define BLYNK_AUTH_TOKEN  
"0SxLfGaswy3zGIb0JL39wzDttQB44IB  
7"
```

```
#include "EmonLib.h"  
#include <EEPROM.h>  
#include <WiFi.h>  
#include <BlynkSimpleEsp32.h>  
#include <Wire.h>  
#include <LiquidCrystal_I2C.h>  
#include <HTTPClient.h>  
#include <ArduinoJson.h>
```

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); //  
cambia por 0x3F si tu módulo devuelve  
esa dirección en el escáner
```

```
// Define your Telegram bot token and  
chat ID (rellena)  
const char* telegramBotToken =  
"TU_TELEGRAM_BOT_TOKEN";  
const char* telegramChatID =  
"TU_CHAT_ID";
```

```

// Constants for calibration
const float vCalibration = 41.5;
const float currCalibration = 1.80;

// Blynk and WiFi credentials (rellena)
const char auth[] =
BLYNK_AUTH_TOKEN;
const char ssid[] = "Familia
Gomez_2.4G";
const char pass[] = "*ClS160666";

EnergyMonitor emon;
BlynkTimer timer;

float kWh = 0.0;
float cost = 0.0;
const float ratePerkWh = 6.5;
unsigned long lastMillis = 0;

const int addrKWh = 12;
const int addrCost = 16;

int displayPage = 0;
const int resetButtonPin = 4;

// forward declarations
void sendEnergyDataToBlynk();
void readEnergyDataFromEEPROM();
void saveEnergyDataToEEPROM();
void updateLCD();
void changeDisplayPage();
void sendBillToTelegram();
void resetEEPROM();

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(100);

  // I2C init para ESP32 (SDA, SCL)
  Wire.begin(21, 22); // SDA = 21, SCL =
22

  // Inicializa LCD
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();

  // inicializar WiFi
  Serial.println("Conectando a WiFi...");
  WiFi.begin(ssid, pass);
  unsigned long startWiFi = millis();
  while (WiFi.status() !=
WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
    if (millis() - startWiFi > 20000) { //
timeout 20s
      Serial.println("\nNo se pudo conectar
a WiFi (timeout). Sigue ejecutando y
reintentará.");
      break;
    }
  }

  if (WiFi.status() ==
WL_CONNECTED) {
    Serial.println("\nWiFi conectado. IP:
");
    Serial.println(WiFi.localIP());
  }

  // Inicializa Blynk (no bloqueante
internamente)
  Serial.println("Iniciando Blynk...");
  Blynk.begin(auth, ssid, pass);

  // Inicializar EEPROM
  EEPROM.begin(64); // más espacio por
seguridad

  // Botón reset
  pinMode(resetButtonPin,
INPUT_PULLUP);

  // Leer EEPROM
  readEnergyDataFromEEPROM();

  // Configurar entradas del medidor de
energía
  emon.voltage(35, vCalibration, 1.7); //
ajuste de fase si aplica
  emon.current(34, currCalibration);

  // Timers periódicos

```

```

timer.setInterval(2000L,
sendEnergyDataToBlynk);
timer.setInterval(2000L,
changeDisplayPage);
timer.setInterval(60000L,
sendBillToTelegram);

// inicializar lastMillis
lastMillis = millis();

// Mensaje inicial en LCD
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Iniciando...");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Esperando datos");
}

void loop() {
  Blynk.run();
  timer.run();

  if (digitalRead(resetButtonPin) ==
LOW) {
    delay(200);
    resetEEPROM();
    // mensaje en LCD
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("EEPROM reseteado");
    delay(1000);
  }
}

void sendEnergyDataToBlynk() {
  emon.calcVI(20, 2000);
  float Vrms = emon.Vrms;
  float Irms = emon.Irms;
  float apparentPower =
emon.apparentPower;

  unsigned long currentMillis = millis();
  // Evitar sumar si lastMillis es 0 o si
  pasó mucho (protección)
  if (lastMillis == 0) lastMillis =
currentMillis;
  unsigned long delta = currentMillis -
lastMillis;

```

```

if (delta > 0 && delta < 600000) { //
proteger contra saltos grandes
  kWh += (apparentPower * (delta /
3600000.0)) / 1000.0 * 1000.0; // fórmula
conservadora
  // nota: la conversión depende de
unidades; revisa si apparentPower está en
W
  // kWh += apparentPower * (delta) /
3600000.0; // versión simple si
apparentPower en W
}
lastMillis = currentMillis;

cost = kWh * ratePerkWh;

saveEnergyDataToEEPROM();

// Enviar a Blynk (si está conectado)
if (Blynk.connected()) {
  Blynk.virtualWrite(V0, Vrms);
  Blynk.virtualWrite(V1, Irms);
  Blynk.virtualWrite(V2,
apparentPower);
  Blynk.virtualWrite(V3, kWh);
  Blynk.virtualWrite(V4, cost);
}

// Actualizar LCD
updateLCD();

// Debug serial
Serial.print("V: "); Serial.print(Vrms);
Serial.print(" I: "); Serial.print(Irms);
Serial.print(" P: ");
Serial.print(apparentPower);
Serial.print(" kWh: ");
Serial.println(kWh);
}

void readEnergyDataFromEEPROM() {
  EEPROM.get(addrKWh, kWh);
  EEPROM.get(addrCost, cost);

  if (isnan(kWh) || kWh < 0 || kWh > 1e6)
  {
    kWh = 0.0;

```

```

    saveEnergyDataToEEPROM();
}
if (isnan(cost) || cost < 0 || cost > 1e9) {
    cost = 0.0;
    saveEnergyDataToEEPROM();
}
}

```

```

void saveEnergyDataToEEPROM() {
    EEPROM.put(addrKWh, kWh);
    EEPROM.put(addrCost, cost);
    EEPROM.commit();
}

```

```

void updateLCD() {
    lcd.clear();
    char buf[32];
    if (displayPage == 0) {
        // mostrar V, I, P (ajusta formatos si se
        necesita)
        snprintf(buf, sizeof(buf), "V:%.1fV
I:%.2fA", emon.Vrms, emon.Irms);
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print(buf);
        snprintf(buf, sizeof(buf), "P: %.1f W",
emon.apparentPower);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(buf);
    } else {
        snprintf(buf, sizeof(buf), "Energy:
%.3fkWh", kWh);
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print(buf);
        snprintf(buf, sizeof(buf), "Cost: %.2f",
cost);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(buf);
    }
}
}

```

```

void changeDisplayPage() {
    displayPage = (displayPage + 1) % 2;
    updateLCD();
}

```

```

}

void sendBillToTelegram() {
    // Formar el mensaje
    String message = "Total Energy
Consumed: " + String(kWh, 3) + "
kWh\nTotal Cost: " + String(cost, 2);

    if (strlen(telegramBotToken) < 5 ||
strlen(telegramChatID) < 3) {
        Serial.println("Telegram token/chat no
configurado, omitiendo envio.");
        return;
    }
}

```

```

HTTPClient http;
String url =
"https://api.telegram.org/bot";
url += telegramBotToken;
url += "/sendMessage";

http.begin(url);
http.addHeader("Content-Type",
"application/json");

```

```

DynamicJsonDocument jsonDoc(256);
jsonDoc["chat_id"] = telegramChatID;
jsonDoc["text"] = message;
String payload;
serializeJson(jsonDoc, payload);

int httpCode = http.POST(payload);
Serial.print("Telegram httpCode: ");
Serial.println(httpCode);

```

```

http.end();
}

```

```

void resetEEPROM() {
    kWh = 0.0;
    cost = 0.0;
    saveEnergyDataToEEPROM();
}

```