PILOTO DE PLATAFORMA INTELIGENTE PARA LA EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

UNIVERSIDAD EAN

PROYECTO DE GRADO – PROYECTO DE INTEGRACIÓN

JOSE ALEJANDRO POVEDA BELTRÁN
CRISTHIAN ALEXIS TAMAYO PARRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA EN ENERGÍAS

BOGOTÁ D.C.
07/07/2025

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Tabla de contenido

Glosario 5

Resumen ejecutivo. 9

Introducción. 11

Planteamiento del Problema 13

OBJETIVO 14

Objetivos 14

Definición del problema 14

Pregunta de Investigación 15

Justificación 15

Análisis de Requerimientos 16

Marco Teórico 19

Antecedentes 19

Mandato Regulatorio y Brecha de Financiación 19

Casos Internacionales y Lecciones Aprendidas 22

Análisis de Restricciones 23

Consideraciones Técnicas y Ambientales 23

Factores Económicos 24

Restricciones Legales 25

Fundamentos conceptuales de AMI 26

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Marco regulatorio colombiano 28
Tecnologías habilitadoras y herramientas de análisis 29
Aplicación de la Inteligencia Artificial 30
Metodología de Investigación 32
Fases del proyecto 32
Diseño Experimental 32
Variables del experimento 33
Validación de resultados 33
Articulación con la ingeniería del sistema 34
Cronograma del Proyecto 35
Instrumentos de Recolección de Datos 36
Dispositivos físicos 36
Plataformas digitales y servicios en la nube 36
Herramientas de análisis y validación 37
Resultados Esperados 38
Costos 40
Costos por fase del proyecto 40
Inversión inicial e infraestructura 41
Capital de trabajo 41
Costos totales y proyección 42

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Diseño del Sistema de Medición Inteligente 43
Arquitectura General 43
Capa de medición 44
Capa de concentración 45
Capa de comunicación 45
Capa de plataforma en la nube 45
Capa de presentación 45
Conclusiones 51
Funcionamiento técnico del prototipo 51
Interoperabilidad: resultado no concluyente. 52
Viabilidad económica preliminar. 53
Barreras de acceso a infraestructura 53
Alineación normativa 54
Recomendaciones 54
Bibliografía 56

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Glosario

AMI (Advanced Metering Infrastructure): Infraestructura de medición avanzada que permite la lectura remota, el monitoreo en tiempo real y la gestión inteligente del consumo energético. Incluye medidores inteligentes, sistemas de comunicación y plataformas de análisis de datos.

Analítica de datos: Proceso de recopilación, transformación y análisis de datos para obtener información útil que apoye la toma de decisiones. En el contexto energético, permite optimizar el consumo y la operación de redes.

Ancho de banda: Capacidad de transmisión de datos de una red en un período determinado. Es crucial para la comunicación fluida entre medidores, concentradores y plataformas en sistemas AMI.

Calibración: Proceso mediante el cual se ajustan los instrumentos de medición para garantizar que sus lecturas sean precisas y confiables, comparándolos con patrones de referencia.

Carga base: Nivel mínimo de demanda energética que se mantiene constante durante un período de tiempo determinado. Es importante para la planificación y dimensionamiento de infraestructura.

CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas Entidad colombiana encargada de establecer la regulación del sector eléctrico y de gas natural. Define normas como la Resolución CREG 101 001 de 2022, relacionada con AMI.

Confiabilidad: Capacidad de un sistema, dispositivo o componente para desempeñar una función requerida bajo condiciones específicas durante un período determinado.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Concentrador: Dispositivo dentro del sistema AMI que recopila información de múltiples medidores y la transmite al sistema de gestión centralizado o a la nube.

Consumo energético: Cantidad de energía eléctrica utilizada por un usuario en un período de tiempo. Es una variable crítica evaluada por los medidores inteligentes.

Datos en tiempo real: Información obtenida instantáneamente en el momento de su generación, lo cual permite una supervisión continua y decisiones rápidas.

Demanda energética: Cantidad total de energía requerida por los usuarios de una red en un momento dado. Es fundamental para la planificación y el diseño de redes eléctricas.

Fiabilidad: Probabilidad de que un equipo funcione correctamente durante un período sin fallas. Se mide en pruebas bajo condiciones controladas en pilotos como este.

Frontera comercial: Punto de conexión entre el sistema de distribución y el usuario donde se realiza la medición de la energía para fines de facturación.

Hardware: Componentes físicos del sistema, como medidores, sensores, colectores, concentradores y demás dispositivos electrónicos.

Infraestructura de medición: Conjunto de equipos, redes de comunicación y sistemas informáticos utilizados para medir, registrar y transmitir datos de consumo eléctrico.

Interoperabilidad: Capacidad de distintos dispositivos, sistemas o plataformas para intercambiar y utilizar información de manera efectiva, independientemente del fabricante o tecnología.

Medidor inteligente: Dispositivo electrónico que registra el consumo de energía eléctrica y permite la comunicación bidireccional con el proveedor de energía.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Monitoreo remoto: Supervisión y control de dispositivos a distancia mediante redes de comunicación. Es un componente esencial del sistema AMI.

Nube (Cloud Computing): Modelo de servicios que permite almacenar, gestionar y procesar datos en servidores remotos accesibles desde internet.

Normativa técnica: Conjunto de reglas establecidas por organismos reguladores, como la CREG, para estandarizar procesos, equipos y condiciones de operación del sistema eléctrico.

Patrón de referencia: Instrumento certificado utilizado para comparar y verificar la precisión de otros dispositivos de medición.

Plataforma inteligente: Sistema digital que integra y procesa datos energéticos provenientes de múltiples fuentes, permitiendo análisis, visualización y toma de decisiones.

Prueba de fiabilidad: Evaluación técnica del comportamiento de un dispositivo bajo diferentes condiciones de operación, con el fin de validar su desempeño frente a estándares establecidos.

Protocolo de comunicación: Conjunto de reglas que permiten la transmisión de datos entre dispositivos dentro de una red AMI.

Red eléctrica inteligente (Smart Grid): Sistema que incorpora tecnologías digitales de información y comunicación para mejorar la eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad de la red eléctrica.

Resolución CREG 101 001 de 2022: Norma regulatoria colombiana que establece lineamientos para la implementación de medición avanzada (AMI) en las fronteras comerciales del servicio de energía.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Resistencia del medidor: Capacidad del dispositivo para mantener su funcionamiento ante condiciones adversas, como sobrecargas eléctricas, humedad o variaciones térmicas.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): Sistema utilizado para controlar y supervisar procesos industriales, incluido el monitoreo de redes eléctricas.

Seguridad de la información: Conjunto de prácticas destinadas a proteger los datos contra accesos no autorizados, alteraciones o pérdida.

Sistema de gestión energética (EMS): Plataforma que permite controlar y optimizar el uso de la energía en instalaciones industriales, comerciales o residenciales.

Trazabilidad: Capacidad de seguir el historial, ubicación o uso de un activo o dato a través del tiempo.

Umbral de aceptabilidad: Rango definido por normas técnicas dentro del cual los resultados de medición se consideran válidos y confiables.

Variable dependiente: Aquella que se ve afectada por la manipulación de la variable independiente.

Variable independiente: Factor que se manipula o varía en una prueba experimental para observar su efecto.

Variable de control: Elemento que se mantiene constante durante el experimento para evitar que influya en los resultados.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Resumen ejecutivo

Definición del Problema: La Comisión Regulatoria de Energía y Gas (CREG), inicio la revisión de las necesidades y variables apropiadas para estimar los beneficios del despliegue de una infraestructura de medición avanzada (AMI) en Colombia, bajo el documento CREG 175 DEL 2020. Estableciendo un punto de partida para la necesidad de soluciones innovadoras para mejorar la fiabilidad, eficiencia en la recolección y análisis de datos energéticos en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). Actividades que se desprenden de las normas expedidas por el gobierno: Ley 1715 del 2014 que promueve el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, en un principio las que tienen carácter renovable dentro del SIN, aunque no menciona directamente AMI, si sus disposiciones sobre la promoción de tecnologías avanzadas en el sector energético sentando las bases de la implementación de la AMI. Actualmente, la falta de una plataforma centralizada limita la gestión eficiente y transparente de la digitalización de la medida de energía. Se propone desarrollar una plataforma basada en inteligencia artificial (IA) que integre múltiples fuentes de datos como piloto en la validación de los dispositivos que puedan cumplir con esa regulación de la CREG.

Objetivo General: Diseñar un piloto para una plataforma de evaluación sobre la fiabilidad y presión de los medidores de energía eléctrica, analizar su desempeño bajo distintas condiciones de uso y compararlos con estándares de referencia. Alineándose con la Resolución 101 001 de 2022 de la CREG y la "Hoja de Ruta Visión 2030" de la UPME.

Metodología: El proyecto se desarrollará bajo una investigación aplicada con el fin de buscar una solución experimental a un marco normativo en el sector energético colombiano. El proyecto se desarrollará en varias fases, incluyendo el análisis normativo,

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

el diseño de la arquitectura tecnológica, la gestión de datos, comprensión de medidas y detección de anomalías (si existen), pruebas de funcionalidad y evaluación final.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Introducción.

La medición de energía eléctrica digital es un componente importante en la transformación hacia una infraestructura moderna y eficiente del sector energético en Colombia, ley 2099 de 2021 (llamada Ley de transición energética) introduce y promueve la infraestructura de medición avanzada (AMI) en el país. Con el avance de las tecnologías digitales y la creciente necesidad de sostenibilidad en los servicios públicos colombianos, la implementación de soluciones innovadoras de medición eficiente y digital se ha convertido en una prioridad para los diferentes gobiernos. El articulo 56 de la ley 2099 del 2021, define condiciones para implementación de los medidores inteligentes, lo que lleva a la necesidad de una regulación.

El Documento CREG 175 de 2020 es un documento conceptual y técnico centrado en aspectos tarifarios del servicio público domiciliario de gas y combustibles que sirvió como base preparatoria para la elaboración de la resolución en el sector energético. Sus principales aportes son: expone los criterios técnicos, económicos y regulatorios necesarios para implementar medición inteligente (AMI); introduce conceptos como arquitectura de red, interoperabilidad, seguridad de la información y esquemas de remuneración; planteando una visión de la Infraestructura de medición avanzada (AMI) en el territorio nacional.

Este documento derivo la discusión pública y en sobre todo la técnica que derivo en el acto regulatorio formal: Resolución 101 001 de 2022 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y la "Hoja de Ruta Visión 2030" de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) establecen directrices para la adopción de sistemas

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

avanzados de medición inteligente en cumplimiento con las resoluciones liberadas por la CREG, en este caso la Resolución CREG 101001.

En este orden existen dos aspectos importantes para considerar la regulación colombiana sobre el (AMI), el Ministerio de Minas y Energías emite las resoluciones 40483 del 2019 y 40142 del 2020, donde se deja un porcentaje de usuarios conectados en el mercado de comercialización con (AMI) en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) que debe ser del 75% para el año 2030. En el 2024 la UPME participo en un diagnóstico sectorial para evaluar la madurez en la gestión de datos, analizando los Operadores de Red (OR) y la responsabilidad en la implementación del (AMI), los planes piloto, planificación y puesta en marcha que dejo una cifra de menos del 1,4% de adopción de dispositivos inteligentes en Colombia.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Planteamiento del Problema

Teniendo este contexto, es evidente que las instituciones colombianas están realizando esfuerzos en sus respectivos campos de competencia para estandarizar la implementación de tecnologías de medición avanzada y la implementación de dentro del Sistema Interconectado Nacional (SIN). Sin embargo, el obstáculo principal del AMI en Colombia es el modelo de financiación, no se ha definido claramente quienes son los encargados de esta inversión y las iniciativas piloto están siendo afectadas por la barrera de resistencia en la frontera comercial con el usuario y la falta de infraestructura especializada en la red nacional (SIN).

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

OBJETIVO GENERAL

Este proyecto propone el desarrollo y conexión de una plataforma tecnológica piloto que se conecte con dispositivos AMI (contadores medición de energía tele - gestionados o los llamados contadores de energía inteligentes), hacer la captura, recolección y análisis de los datos en un reporte tipo tablero de datos que mida si se cumple la normativa que dispone la CREG y las normas internacionales para este modelo de tecnologías.

Objetivos Especificos

Para el diseño del piloto de la plataforma de medición inteligente de energía eléctrica como herramienta para el cumplimiento de la Resolución 101 001 de 2022 de la CREG y la "Hoja de Ruta Visión 2030" de la UPME se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la interoperabilidad del servicio con una muestra seleccionada de agentes del mercado energético con medidores tele-gestionados.
- Realizar un estudio de costos para el correcto funcionamiento de la tele-gestión o tele-medición de energía en una frontera comercial.
- prototipar el funcionamiento del sistema en un entorno controlado.

Definición del problema

En Colombia la implementación de sistemas de medición avanzada (AMI) enfrenta múltiples obstáculos técnicos, económicos y regulatorios que han ralentizado su adopción al 2025, a pesar de los mandatos establecidos por la Resolución CREG 101 001 de 2022 y la Hoja de Ruta Visión 2030 de la UPME. Actualmente no existe un sistema centralizado para la gestión, comparación y validación de medidores inteligentes; lo que

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

ha obligado a los comercializadores a diseñar esquemas propios sin lineamientos unificados. La ausencia de protocolos unificados a nivel nacional de interoperabilidad, políticas claras de financiación, y mecanismos operativos para la administración de los datos ha generado incertidumbre entre los actores del sector, elevando los costos y fragmentando la gestión de datos.

Aunque la CREG diseñó la figura del Gestor Independiente de Datos e Información (GIDI) para que actúe como repositorio nacional y operador de esos datos. Sin embargo, el GIDI sigue en fase de diseño/selección y no está operando; cada comercializador u operador de red continúa usando sus propias plataformas o modelos de lectura y MDMS.

Esta situación evidencia la necesidad de una plataforma piloto que permita simular, analizar y evaluar el desempeño de diferentes tecnologías AMI bajo condiciones reales, con el fin de aportar evidencia sobre su viabilidad técnica, interoperabilidad y sostenibilidad financiera para su adopción a gran escala en el país.

Pregunta de Investigación

¿Cómo puede una plataforma piloto de medición inteligente contribuir a evaluar la viabilidad técnica, económica y regulatoria del despliegue del sistema AMI en Colombia, conforme a los lineamientos normativos de la CREG y los planes de la UPME Visión 2030?

Justificación

Este proyecto propone una plataforma piloto que permita simular entornos de medición real, comparar dispositivos evaluando los estándares que apliquen según el marco normativo y las estándares internaciones que desarrollaron países donde ya está implementada el sistema AMI (ejemplo: IEC 62052-11, IEC 62053-21) y nacionales

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

(Resolución CREG 101 001 de 2022), y evaluar sus características técnicas y económico. La plataforma busca llenar un vacío actual en Colombia, aportando evidencia empírica para futuros procesos de selección tecnológica, licitación e inversión.

Así, se contribuye no solo a reducir la incertidumbre normativa sino también a fortalecer las capacidades del país para avanzar hacia la modernización de una red eléctrica más digital en el SIN, confiable y eficiente, en línea con los objetivos de transición energética trazados por la UPME en la Visión 2030.

Análisis de Requerimientos

El análisis de requerimientos del sistema AMI propuesto identifica las condiciones técnicas, normativas y funcionales necesarias para el diseño, implementación y evaluación de una plataforma piloto de medición inteligente en Colombia. Este sistema debe operar bajo entornos de consumo de energía residencial simulados y cumplir con los lineamientos establecidos por la Resolución CREG 101 001 de 2022. Los requerimientos técnicos incluyen la compatibilidad con protocolos estándar, comunicación por redes, capacidad de almacenamiento en la nube, y procesamiento en tiempo real de variables como energía activa, voltaje y potencia. Desde el punto de vista funcional, la plataforma deberá permitir la integración de múltiples dispositivos de medición, recolección automatizada de datos, análisis estadístico de desempeño, y la generación de reportes alineados con la normativa vigente de un reporte de energías. Estos requerimientos guiarán tanto el diseño arquitectónico del sistema como la planificación de pruebas de validación y los criterios de evaluación económica y técnica del piloto. A continuación presentamos una tabla con los requerimientos, validaciones y la evidencia normativa que desarrolla esta investigación.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Requerimiento	Validar	Evidencia normativa
Protocolo único de pruebas de campo (comparar dispositivos disponibles en mercado y la red)	Prueba de 1 o más dispositivos en red, desarrollo y evaluación de infraestructura ideal tipo PLC/LTE y criterios de aceptación/rechazo.	La Resol. 101-1/2022 sólo exige que el despliegue se haga “si el beneficio supera el costo”, sin describir cómo ensayar el desempeño real de los equipos.
Interoperabilidad y ciberseguridad	Evaluar si los dispositivos en el mercado cuentan con conceptos como DLMS/COSEM y TLS, pero el profile mínimo (tablas, firmas, cifrado) aún no está normalizado a nivel nacional.	Conceptos CREG 3473/2023 y 5255/2023 remiten a “normas internacionales vigentes” sin fijar versiones ni esquemas de claves.
Metodología costo- beneficio estándar	Evaluar un esquema de costos base para el despliegue de una medición o conteo de energía en una red residencial estándar desde una fuente tipo AMI o similar.	Desde 2020 la CREG publica borradores (Circular 003/2020, Doc. D-002/2022) pero la fórmula definitiva y los supuestos de pérdidas evitadas todavía están en discusión.
Piloto de Gestor Independiente de Datos e Información (GIDI)	Desarrollar una arquitectura para Sistema de Gestión de Datos de Medidores de datos pensando en el GIDI (uso de API RES que cumpla con tiempos de entrega < 08:00 a.m. del día D+1).	Circular 121/2024 anuncia la próxima expedición de los “requisitos operativos, técnicos y de calidad” y de la “metodología de evaluación” del GIDI; está en fase de comentarios (abril 2025)

El siguiente cuadro presenta una clasificación detallada de los requerimientos técnicos y funcionales necesarios para el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo y gestión energética. La información se organiza en cuatro categorías principales: Requisitos Funcionales, Requisitos No Funcionales, Verificación de Parámetros de Diseño y Estimación de Características Técnicas.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Categoría	Requisito	Descripción / Alcance
Requerimientos Funcionales	Monitoreo de múltiples fuentes de datos	Integrar medidores inteligentes, sistemas Smart Metering y medición no intrusiva.
	Centralización y procesamiento de datos	Plataforma segura y accesible para almacenar, procesar y visualizar la información.
	Exportación de datos (CSV/JSON)	Cumplir con la especificación publicada por la CREG para intercambio regulatorio.
	Simulación / prototipado	Desarrollar un entorno de prueba controlado y documentarlo.
	Lectura de energía activa y reactiva	Recepción de mediciones en tiempo (casi) real.
Requerimientos No Funcionales	Seguridad y protección de datos	Garantizar privacidad y confidencialidad de los usuarios.
	Escalabilidad	Soportar aumento de dispositivos conectados sin pérdida de rendimiento.
	Interfaz intuitiva	Facilitar uso por operadores y entidades reguladoras.
Verificación de Parámetros de Diseño	Estándares de precisión y fiabilidad	Definir rangos de error máximos admitidos.
	Compatibilidad de protocolos	Asegurar interoperabilidad con estándares del sector eléctrico.
	Detección de anomalías y alertas	Evaluar capacidad como parte de la prueba piloto.
Estimación de Características Técnicas	Metodología ("¿Cómo lo vamos a hacer?")	Describir enfoque arquitectónico y tecnologías a emplear.
	Variables y periodo de medición	Especificar qué magnitudes se capturan y su frecuencia.
	Capacidad de procesamiento	Dimensionar CPU/GPU, memoria y throughput requerido.
	Métricas clave	Definir objetivos de latencia, tasa de error en detección y capacidad de almacenamiento.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Marco Teórico

Antecedentes

La modernización de las redes de distribución eléctrica colombianas se ha convertido en un imperativo regulatorio y operativo. El marco normativo vigente fija metas ambiciosas de cobertura con estándares al 2030, mientras que la realidad del despliegue exhibe un rezago considerable. En este contexto, las experiencias de campo de varias comercializadoras y los hallazgos de estudios nacionales y regionales de otros países constituyen antecedentes críticos para justificar el desarrollo de un prototipo académico de arquitectura AMI.

Mandato Regulatorio y Brecha de Financiación

La Resolución CREG 101 001 de 2022 establece que al menos el 75 % de los usuarios del Sistema Interconectado Nacional (SIN) cuente con medición inteligente para 2030, delegando la responsabilidad técnica en los operadores de red (Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG], 2022). Sin embargo, el texto no define mecanismos de recuperación de los costos de inversión, lo que genera incertidumbre financiera entre las empresas distribuidoras. Dejamos a continuación un resumen clasificados en los ejes de compromisos y la importancias adquiridas en el modelo del mercado energético colombiano:

Eje	Fuente	Importancia
Mandato regulatorio	Resolución CREG 101 001/2022 fija metas de 75 % de cobertura AMI a 2030 y transfiere la responsabilidad técnica al operador de red	Existe un mandato legal exigente (75 % de cobertura y estrictos requisitos de ciberseguridad) pero el avance físico es marginal (< 2 %).
	Resolución CREG 701-38/2024 introduce cifrado AES-128, autenticación mutua y piloto de tarifas	Pilotos demuestran viabilidad técnica, mas ninguno ofrece todavía una arquitectura abierta, modular y alineada con los nuevos estándares de seguridad.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Eje	Fuente	Importancia
	horarias residenciales Gestor Normativo	
Problema sectorial	SSPD reporta pérdidas no técnicas del 13,1 % y advierte rezago en medición individual (Diagnóstico 2023) Superservicios	Estudios de costo-beneficio prueban la rentabilidad social y empresarial.
	Avance real del despliegue: ≈ 1 % de los medidores a 2024 (Portafolio, 12-ago-2024) Portafolio	El desfase entre meta (75 %) y realidad subraya la oportunidad de nuevas soluciones.
Pilotos nacionales	EPM ensaya medidores hechos con plástico reciclado y comunidad piloto smart-meter en Medellín (2025) Portal EPM	Demuestra factibilidad local de hardware y economía circular, pero carece de arquitectura abierta.
	Codensa/Enel inició instalación de 40 000 medidores inteligentes en Bogotá (2023) Canal Capital	Refleja el enfoque de grandes utilities; un prototipo académico puede complementar con soluciones de bajo costo para pymes y cooperativas.
	Air-e (Caribe) sufrió ciberataque que afectó la facturación a 2,3 M de usuarios (oct-2024) El País	Ejemplifica riesgos de seguridad y la necesidad de arquitecturas resilientes en el SIN.
Estudios costo-beneficio	Carbon Trust & UPME (2022): 11 M de smart meters ahorrarían US $730 M/año a 2040 Carbon Trust	Respaldan con datos el retorno económico del despliegue en Colombia; el proyecto puede validar estos números con casos reales en otras regiones como Brasil.
	BID (2023) presenta panorama de medición inteligente en ALC y recomendaciones regulatorias Publicaciones	Ofrece benchmarks regionales y buenas prácticas a incorporar, No determina en Colombia quién financia la infraestructura ni cómo se recupera la inversión
Producción académica reciente	Framework técnico para la operación de redes de distribución en Colombia (Energies, 2025) MDPI	Aporta lineamientos de interoperabilidad y soporte para integrar renovables en un sistema eficiente y interconectado con data; sirve de base teórica al diseño del prototipo.
Lecciones internacionales cercanas	Enel Brasil superó 600 000 medidores inteligentes en São Paulo (Memoria ESG 2023) enelamericas.com	Ilustra escalabilidad y modelos de financiamiento que pueden adaptarse al contexto colombiano como ejemplo en la región.

Indicador	Estado actual	Impacto
Pérdidas no técnicas	13,1 % del consumo nacional (SSPD 2023) [3]	Pérdidas de ingresos ≈ US $250 M/año y presión regulatoria creciente
Despliegue real de AMI	≈ 1 % de medidores instalados a 2024 [4]	Brecha enorme frente a la meta 75 %
Casos de ciberataque	Air-e afectada (oct. 2024) [7]	Riesgo reputacional y de servicio; evidencia de protocolos insuficientes

2025 - Problemas sectoriales que impulsan la adopción de AMI

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

A la presión normativa se suma un desempeño operacional desfavorable. La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) reportó en 2023 pérdidas no técnicas del 13,1 %, nivel que compromete la sostenibilidad financiera del sector (SSPD, 2023). El avance físico del AMI no supera el 1 % de los medidores en el país (Portafolio, 2024). Ello revela un desfase sustancial entre los objetivos regulatorios y la realidad, resaltando la necesidad de soluciones técnico-económicas que aceleren la implementación.

Resolución CREG 101 001 de 2022: fija lineamientos para la medición, supervisión y control del consumo eléctrico, pero no asigna responsabilidades de financiación para la infraestructura requerida. Varias comercializadoras (Electrificadora del Meta, ElectroCaquetá, ElectroHuila) avanzan pese a la indefinición, apalancándose en recursos propios y en los programas PROURE del Ministerio de Minas y Energía. Se han instalado > 860 medidores inteligentes dentro de sistemas AMI (Advanced Metering Infrastructure), lo que es un paso clave hacia las Smart Grids.

En las capitales Codensa/Enel inició en 2023 la instalación de 40 000 medidores inteligentes en Bogotá (Canal Capital, 2023), mientras EPM explora la fabricación de medidores con plástico reciclado, fomentando la economía circular (Empresas Públicas de Medellín [EPM], 2025). No obstante, ninguno de estos pilotos emplea arquitecturas totalmente abiertas ni estándares unificados de ciberseguridad, lo que limita su escalabilidad nacional.

El panorama de riesgos se vio agravado por el ciberataque sufrido por Air-e en 2024, incidente que comprometió la facturación de 2,3 millones de usuarios (El País, 2024).

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Este hecho pone de relieve la urgencia de incorporar mecanismos de protección «by design» en cualquier despliegue de AMI.

Los antecedentes expuestos revelan que en Colombia tenemos una triple convergencia de necesidad: la obligación legal de alcanzar 75 % de cobertura AMI en el SIN, la presión económica de las pérdidas no técnicas y la demanda social de un servicio eficiente y transparente de los Operadores de Red. Diseñar y evaluar un prototipo académico de AMI —que integre requisitos regulatorios, ciberseguridad y analítica avanzada de bajo costo lo que constituye, una contribución estratégica para cumplir los objetivos nacionales de transición energética y modernización de redes en Colombia.

Casos Internacionales y Lecciones Aprendidas

Diversos países han avanzado en la masificación de AMI ofreciendo aprendizajes relevantes para países como Colombia. En España la cobertura de medición digital supera el 98 %, con interoperabilidad garantizada mediante el uso del modelo CIM/IEC 61968-9, integrando lectura horaria entre comercializadores y reguladores. Brasil, por su parte, ha desplegado más de 600.000 medidores inteligentes, adoptando modelos híbridos de financiamiento público-privado y plataformas abiertas.

En Chile y México, la adopción de estándares internacionales y pilotos regionales ha permitido validar arquitecturas escalables, lo cual sugiere que Colombia puede avanzar con un enfoque modular, validado localmente pero alineado con buenas prácticas globales desde la experiencia.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Análisis de Restricciones

El uso de medidores inteligentes en el SIN en Colombia no solo requiere una base tecnológica robusta y normativa clara, sino también la identificación de las restricciones que limitan su despliegue a gran escala. Sin embargo, su implementación presenta desafíos para los actores responsables. Estas restricciones surgen tanto del entorno operativo como de factores económicos, regulatorios y sociales. A continuación se presenta un análisis integral de dichas limitaciones, con el fin de contextualizar el diseño del prototipo propuesto y orientar futuras decisiones de implementación.

Consideraciones Técnicas y Ambientales

Uno de los factores clave en la adopción de medidores inteligentes es su impacto en el entorno Residencial o Comercial. La sustitución de medidores analógicos por equipos digitales conlleva riesgo de acumulación de residuos electrónicos si no se establecen protocolos adecuados de reciclaje o reutilización. Además:

La disposición de equipos antiguos: contar con procesos adecuados para el reciclaje o reutilización de los dispositivos obsoletos, una opción es volverse material didáctico de la universidad o formativo, después de haberse finalizado el proyecto, evitando la contaminación por desechos electrónicos.

- Es necesario definir estrategias de disposición final o reintegración como material didáctico.
- La eficiencia energética de los propios medidores debe ser considerada, asegurando bajo consumo y mínima carga sobre la red.
- Se deben cumplir normativas ambientales como la Ley 1672 de 2013 y Decreto 284 de 2018 sobre residuos peligrosos.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Desde el punto de vista operativo la infraestructura eléctrica existente del SIN presenta limitaciones físicas (espacios reducidos, interferencias, dificultad en el acceso, conexiones fraudulentas, infraestructura antigua, baja disponibilidad del servicio y zonas rojas de orden público) que pueden afectar la calidad de señal, especialmente en tecnologías cableadas como RS-485 o PLC. Esto condiciona las decisiones sobre protocolos de comunicación y ubicación de concentradores.

Factores Económicos

El costo de implementación del AMI representa una de las barreras más importantes para los comercializadores de energía en Colombia. Los factores económicos más relevantes incluyen:

- Altos costos iniciales por adquisición de medidores, concentradores, gateways y plataformas.
- Dependencia de tecnología importada y falta de fabricación nacional, con tiempos prolongados de entrega y costos logísticos.
- Tecnologías heterogéneas de distintos fabricantes implementadas de fabricantes que dificultan la interoperabilidad y elevan los costos de integración.
- Falta de claridad regulatoria sobre quién asume la inversión, generando incertidumbre para los operadores de red.

El proyecto de plataforma piloto de medición inteligente contempla una arquitectura de bajo costo con dispositivos escalables y herramientas en la nube como AWS, sin embargo, los costos asociados a mantenimiento, capacitación técnica, licencias y ciberseguridad deben ser cuidadosamente proyectados para validar su viabilidad

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

financiera en grandes volúmenes. Esto es particularmente crítico para zonas con baja densidad poblacional o escasa infraestructura digital con restricciones de otros órdenes.

Restricciones Legales

El marco regulatorio es un elemento determinante en la adopción de medidores inteligentes ya que existe un plan de la CREG para su uso y operación. Dentro de los aspectos más relevantes aplicados al plan de la UPME 2024-2050, se encuentran:

- **Normativas del sector energético:** Las leyes establecen requisitos específicos en cuanto a medición, facturación y transparencia en el servicio eléctrico.
- **Protección de datos:** La recopilación de información sobre el consumo energético de los usuarios Resolución CREG 101 001 de 2022 , debe cumplir con normativas de privacidad y seguridad de la información Ley 1581 de 2012 y el Decreto 1377 de 201.
- **Responsabilidades legales:** Se debe definir con claridad quién asume la responsabilidad en caso de errores en la medición o fallos en la facturación.
- **Cumplimiento de estándares:** La implementación de medidores debe alinearse con IEC 62052-11/62053-21internacional y con el RETIE.

El análisis de requerimientos del sistema AMI propuesto identifica las condiciones técnicas, normativas y funcionales necesarias para el diseño, implementación y evaluación de una plataforma piloto de medición inteligente en Colombia. Este sistema debe operar bajo entornos de consumo de energía residencial simulados y cumplir con los lineamientos establecidos por la Resolución CREG 101 001 de 2022.

Diseño de una plataforma piloto de medición avanzada (AMI) para el sistema eléctrico colombiano:

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Fundamentos conceptuales de AMI

La medición inteligente (Smart Metering han evolucionado significativamente en las últimas décadas, permitiendo la recopilación automatizada de datos de consumo eléctrico en tiempo real. Estas tecnologías no solo facilitan la facturación, sino que también ofrecen herramientas para el análisis del consumo, la detección de fallas y el monitoreo de la red con el fin de optimizar el SIN de transmisión energética y aportar a la reducción de pérdidas siendo más eficiente el uso de la generación.

Existen diversos enfoques para la medición inteligente, que incluyen:

- Contadores de Energía o Medidores Inteligentes: Dispositivos con capacidad de transmisión o comunicación remota de datos permitiendo la lectura y/o administración de la frontera comercial con el usuario consumidor de energía eléctrica.
- Redes de Medición Avanzadas la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI por las siglas en inglés) se define como un sistema tecnológico integrado que permite la recolección automatizada, la telegestión, el procesamiento y la gestión de datos energéticos en tiempo real. Está conformado por dispositivos inteligentes, redes de comunicación y sistemas de gestión de datos (MDMS) que posibilitan la captura y el intercambio bidireccional de información en plataformas de análisis.

En el contexto colombiano los dispositivos deben operar bajo estándares internacionales como IEC 62052-11, IEC 62053-2. Sus componentes tecnológicos principales de comunicación incluyen redes: PLC, NB-IoT, LTE-M y LoRaWAN, cuya elección depende de las condiciones del entorno físico y el ancho de banda disponible. Todos enlazados mediante protocolos de interoperabilidad DLMS/COSEM (IEC 62056), estándar

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

internacional utilizado para la comunicación entre medidores inteligentes de energía y los sistemas que gestionan sus datos (como MDMS o plataformas AMI). Es considerado el lenguaje universal de los medidores eléctricos, facilitando la integración de tecnologías heterogéneas. A nivel físico, las tecnologías de comunicación más comunes son:

- NB-IoT (Narrowband Internet of Things): tecnología de red celular de bajo consumo y amplio alcance.
- PLC (Power Line Communication): transmisión de datos por redes eléctricas existentes.
- LoRaWAN y LTE-M: redes o tecnologías de área amplia y bajo consumo para zonas rurales o de difícil acceso.
- RS-485: es una norma de transmisión de datos seriales que define características eléctricas de los drivers y receptores en una red de comunicación multipunto. Es una interfaz industrial robusta para pruebas locales o controladores.
- DCU (Data Concentrator Unit): recolecta datos de múltiples medidores, los agrupa y los transmite.
- IoT Gateway (por ejemplo, Raspberry Pi industrial): dispositivo intermedio que traduce protocolos (ej. RS-485 a MQTT), aplica filtros y envía a la nube.
- Colectores manuales (opcional): tablets o dispositivos portátiles usados por técnicos para extraer datos vía lectura local.
- Amazon Timestream o RDS: almacenamiento de series temporales o datos estructurados.
- AWS Lambda / Kinesis / Glue: procesamiento de datos en tiempo real o por lotes.
- Amazon IoT Core: gestión de dispositivos, protocolos y reglas.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

La arquitectura AMI contempla una topología modular en capas:

- Capa de medición: adquisición de datos eléctricos.
- Capa de concentración: agregación y optimización de datos mediante DCUs.
- Capa de comunicación: transporte seguro mediante las redes NB-IoT/PLC.
- Capa de plataforma en la nube: almacenamiento y procesamiento en servidores como AWS.
- Capa de presentación: visualización analítica vía dashboards.

Para garantizar seguridad, se integran estándares como IEC 62351-9 y TLS (Transport Layer Security), incluyendo autenticación mutua y cifrado AES-128 (como exige la Resolución CREG 701-38 de 2024).

Marco regulatorio colombiano

La evolución normativa nacional presenta tres hitos obligatorios para cualquier plataforma AMI:

1. Ley 1715 de 2014 – Introduce incentivos a las fuentes no convencionales y habilita la medición bidireccional para el balance neto (Congreso de la República, 2014).

2. Ley 2099 de 2021, art. 56 – Ordena que el costo de los medidores inteligentes sea asumido por el comercializador (Congreso de la República, 2021).

3. Resolución CREG 101 001 de 2022 – Establece bases de cobertura y los requisitos técnicos-funcionales mínimos del sistema (CREG, 2022).

La Ley 2294 de 2023 (Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026) refuerza la digitalización de la red y exige un nuevo análisis costo-beneficio (Congreso de la República, 2023). Paralelamente, el CONPES 4075 de 2022 fija metas y fuentes de financiación verde para redes digitales (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2022).

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

En 2024, la CREG publicó las Circulares 096 y 121, donde anuncia la revisión de la metodología tarifaria y del cronograma de despliegue (CREG, 2024 semestre 1, 2024 semestre 2). Este mismo año la Resolución CREG 701-38 de 2024 incorporó exigencias de ciberseguridad (cifrado AES-128, autenticación mutua) y creó el piloto de tarifas horarias residenciales. Mientras que las Circulares 096 y 121 de 2024 abren la discusión sobre el diseño del Gestor Independiente de Datos e Información (GIDI), cuyo piloto aún está en construcción. La ausencia de una arquitectura operativa nacional ha obligado a los operadores de red a desarrollar soluciones propias, sin lineamientos estandarizados.

Tecnologías habilitadoras y herramientas de análisis

Para la implementación de una plataforma de evaluación AMI, se requiere la integración de tecnologías que permitan la gestión eficiente de datos y la simulación de condiciones reales de operación. A continuación se establecen las capas en las que los protocolos o tecnologías ya están definidos en el marco normativo, esto con el fin de optimizar el proceso y aplicar uno o varios según corresponda en el piloto:

Capa	Protocolo / Estándar ya Desarrollado / Tecnología	Relevancia para el Prototipo Piloto
Física	PLC G3-OFDM, IEEE 802.15.4g, LTE-M, NB- IoT	PLC domina en zonas urbanas o NB-IoT.
Aplicación	DLMS/COSEM	Obligatorio por remisión de la Res. CREG 174 de 2021 (CREG, 2021).
Seguridad	Propuesta tipo: IEC 62351-9; NIST IR 7628	Adoptados en la Res. CREG 701-38 para firma digital y gestión de claves (CREG, 2024).

El prototipo propuesto utiliza una arquitectura basada en microservicios en AWS, protocolos como MQTT/TLS, y herramientas de visualización como Amazon QuickSight. Bajo principios de desarrollo ágil (Scrum, CI/CD), se busca construir una solución

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

escalable, segura y replicable, capaz de analizar el desempeño de distintos dispositivos AMI según criterios normativos y técnicos.

Aplicación de la Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial (IA) ha emergido como una tecnología clave en la optimización de múltiples procesos en tecnología. Su implementación permite es como un asistente técnico experto 24/7 que acelera el trabajo, mejora buscando calidad del código y reduce errores para enfocar los esfuerzos en los objetivos.

Fase	Apoyos con IA
Planeación	Traduce normas en especificaciones técnicas
Diseño	Sugiere arquitectura y patrones de diseño
Desarrollo	Genera código, APIs, scripts de prueba
Validación	Automatiza pruebas y análisis de resultados
Documentación	Redacta manuales, informes, y presentaciones

En el contexto AMI, la IA puede aplicarse en:

- Pronóstico de demanda: mediante redes LSTM (Long Short-Term Memory), con errores promedio menores al 6 % en escenarios residenciales【Velásquez & Torres, 2023】.
- Detección de pérdidas no técnicas (NTL): con modelos como Random Forest y Autoencoders, alcanzando más del 90 % de precisión en proyectos piloto de la costa Caribe【Moreno et al., 2024】.
- Respuesta a la demanda (Demand Response): usando algoritmos de aprendizaje por refuerzo, como Q-learning, para reducir picos horarios de consumo hasta en un 8 %【García & López, 2025】.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

La plataforma propuesta se basa en una arquitectura de microservicios, utilizando AWS Lambda, Amazon RDS y QuickSight, con orquestación de modelos vía API REST (HTTPS) y MQTT sobre TLS lo cual permite procesar eventos, detectar anomalías y generar alertas automáticas. Este enfoque técnico combinado con un modelo de desarrollo ágil (Scrum, CI/CD) con pruebas automáticas y modularidad escalable, ajustándose a estándares industriales modernos serán la base de ejecución del piloto.

Categoría	Requisito	Fuente
Medidores	Precisión clase 1 o superior	CREG 101 001
Comunicación	Interoperabilidad, protocolos abiertos (ej. DLMS/COSEM)	CREG / UPME
Seguridad	Encriptación de datos, acceso controlado	CREG / Buenas prácticas
Datos	Frecuencia de lectura: 15 minutos	CREG
Acceso usuario	Visualización en tiempo real y acceso a histórico	CREG

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Metodología de Investigación

Este proyecto adopta una metodología de tipo aplicada y experimental, con el propósito de diseñar, implementar y validar un piloto de plataforma inteligente para la evaluación y optimización de la medición de energía eléctrica en Colombia, en el marco de la Resolución CREG 101 001 de 2022 y la Hoja de Ruta UPME 2030 de Implementación de la tecnología AMI. El enfoque metodológico busca evaluar, en un entorno controlado, la interoperabilidad, confiabilidad y viabilidad económica de la solución propuesta.

Fases del proyecto

Plan de Trabajo

Fase	Descripción
Fase 1: Análisis normativo	Revisión de resoluciones CREG, Leyes nacionales y estándares IEC relevantes para AMI.
Fase 2: Diseño arquitectónico	Definición de componentes técnicos, protocolos de comunicación, dispositivos y plataforma en la nube (AWS).
Fase 3: Preparación del piloto	Instalación o conexión de medidores, colectores, gateways y sensores en un entorno residencial simulado.
Fase 4: Recolección de datos	Ejecución de medicioness, recolección automática y almacenamiento en la nube.
Fase 5: Análisis y validación	Comparación de resultados con estándares técnicos, análisis estadístico de precisión y detección de anomalías.
Fase 6: Evaluación económica	Estimación de costos de implementación, operación y escalabilidad en función del desempeño observado.

Diseño Experimental

La investigación parte del trabajo de campo realizado con ingenieros de distintas comercializadoras de energía del país, quienes aportaron insumos valiosos sobre la manera como se está dando la implementación de los sistemas AMI, sus retos operativos y la falta de claridad normativa sobre la asignación de costos. Con base en estos

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

insumos, se estructura un piloto experimental que permite validar tanto el desempeño de los equipos como la funcionalidad de la plataforma en desarrollo en 3 escenarios.

1. Entorno de prueba: Instalación en banco de pruebas residencial controlado, con acceso físico a dispositivos con operacion normal a un medidor comercial.

2. Muestra experimental: capturar las variones de tension por medio de 2 medidores inteligentes de fabricantes distintos, conectados a colectores RS-485 y gateway IoT hacia la plataforma en la nube (AWS).

3. Reportar resultados por escenario: frecuencia de medición cada 5 segundos durante 24 horas continuas por escenario.

El estudio experimental recopila datos sobre el comportamiento de los medidores digitales de energía eléctrica bajo diferentes condiciones. Se evaluarán factores que pueden influir en la confiabilidad y estabilidad de los dispositivos

Variables del experimento

Tipo de Variable	Definición
Variable independiente	Condiciones de operación: voltaje, temperatura controlada con termometro electronico, presencia de sobrecarga.
Variable dependiente	Precisión del dato, estabilidad de la lectura, latencia de transmisión.
Variables de control	Tipo de medidor, distancia del cableado, condiciones ambientales.

Validación de resultados

A. Criterios técnicos: Cumplimiento con los umbrales establecidos por IEC 62052-11, IEC 62053-21 y la Resolución CREG 101 001 de 2022.

B. Métricas clave: Error absoluto medio (MAE), tiempo medio de respuesta (RTT), tasa de lectura fallida (%).

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

C. Comparación: Con datos de referencia obtenidos por sensores externos calibrados, medidores analógicos de respaldo y smart metering para la captura de la medida.

D. Análisis económico: Relación costo-beneficio estimada por unidad instalada y extrapolación a escenarios ampliados (piloto a red).

Articulación con la ingeniería del sistema

En cuanto al diseño del piloto, se seleccionarán dos medidores de diferentes fabricantes y tecnologías, asegurando que cumplan con las especificaciones y estándares definidos por la CREG. Estos medidores serán conectados al sistema de pruebas desarrollado, el cual incluye colectores, concentradores, sensores de medición y una plataforma de monitoreo en la nube alojada en servidores AWS. El sistema permitirá visualizar datos en tiempo real a través de una interfaz, o plataforma en la nube de Amazon Web Services (AWS).

Durante la fase de preparación del piloto, se garantizará que las condiciones del entorno sean adecuadas para las pruebas, con la mínima interferencia externa. Los medidores serán evaluados bajo condiciones normales de operación y también en escenarios de sobrecarga, si es posible por la medida del tiempo, para observar su comportamiento. Se realizarán pruebas de calibración utilizando patrones de referencia validados por los fabricantes y medidores analógicos, basados en la experiencia internacional.

Una parte fundamental de esta metodología es la evaluación de datos, donde se herramientas de analisis diseñadas para observar el desempeño de los dispositivos según estándares del sistema AMI. Esta información se procesará utilizando herramientas análisis de datos para validar la precisión, detectar patrones de error y documentar cualquier tipo de falla operativa.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Desde la perspectiva económica, se evalua el costo de adquisición e instalación de los medidores, el desarrollo de la plataforma, que presento múltiples desafíos técnicos, principalmente en lo relacionado con la programación, la compatibilidad de protocolos y la integración entre hardware y software. Entre los factores económicos relevantes se destacan: la inversión inicial, los gastos de operación y mantenimiento, la dependencia de tecnología extranjera, y la falta de apertura de algunos fabricantes para compartir protocolos de comunicación (lo que limita la interoperabilidad).

Asimismo, se contemplan posibles inconvenientes que podrían surgir durante la implementación, como fallas de conexión, errores de lectura, incompatibilidad entre componentes, retrasos en la transmisión de datos, y necesidad de personal especializado para operar y mantener el sistema.

Al final del proceso experimental se elaborará un informe detallado con los resultados obtenidos, incluyendo análisis comparativos con los estándares del AMI, validación técnica de los medidores y recomendaciones técnicas para mejorar su rendimiento en caso de ser necesario. Esta información será clave para orientar futuras decisiones sobre la masificación del sistema a nivel nacional y su integración con las estrategias de modernización del sector eléctrico colombiano.

Cronograma del Proyecto

Fase del Proyecto	Actividades principales	Duración estimada	Semanas
1. Análisis normativo y conceptual	Revisión CREG, UPME, IEC, definición de marco legal y técnico	2 semanas	1–2
2. Diseño de la arquitectura del sistema	Diseño de capas, protocolos, componentes técnicos	3 semanas	3–5
3. Preparación del entorno piloto	Selección y adquisición de medidores, instalación y configuración	3 semanas	6–8

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Fase del Proyecto	Actividades principales	Duración estimada	Semanas
4. Implementación y pruebas funcionales	Pruebas en entorno real, captura de datos, pruebas de fiabilidad	4 semanas	9–12
5. Análisis de datos y evaluación normativa	Validación técnica, detección de anomalías, análisis comparativo	3 semanas	13–15
6. Evaluación económica y de restricciones	Estimación de costos, evaluación legal, ambiental y de escalabilidad	2 semanas	16–17
7. Redacción del informe final y presentación	Escritura de capítulos, anexos, conclusiones, defensa	3 semanas	18–20

Instrumentos de Recolección de Datos

Para el desarrollo de este piloto y la validación de un sistema tipo AMI en el SIN, se utilizarán diversos instrumentos tecnológicos y herramientas de recolección y procesamiento de datos, clasificados en tres niveles: físicos (medidores y sensores), digitales (plataformas y software) y analíticos (sistemas de visualización y control).

Dispositivos físicos

Instrumento	Descripción y función
Medidores inteligentes	Dispositivos electrónicos con capacidad de medición activa/reactiva, transmisión por RS-485 y soporte de protocolo DLMS/COSEM. Dos marcas distintas serán probadas para evaluar interoperabilidad.
Sensor de corriente (pinza amperimétrica)	Se utilizará para capturar datos de referencia (Corriente) en paralelo al medidor inteligente, validando su precisión.
Colectores y gateways IoT	Raspberry Pi industrial, con interfaz RS-485 y conexión a internet, para transmitir datos a la nube usando MQTT sobre TLS.
Concentrador tipo DCU (Gateway)	Dispositivo que recolecta datos de múltiples medidores, agrega la información y la envía al servidor remoto.

Plataformas digitales y servicios en la nube

Herramienta	Función en el piloto
Amazon Web Services (AWS)	Infraestructura principal para alojamiento de la plataforma, base de datos (Timestream), microservicios (Lambda), y dashboards (QuickSight).
API REST + MQTT/TLS	Permite la comunicación segura entre dispositivos y plataforma de gestión.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Herramienta	Función en el piloto
CI/CD (GitHub Actions)	Automatización del despliegue de servicios y actualizaciones del sistema.

Herramientas de análisis y validación

Instrumento	Uso
Excel y Python (Pandas, Matplotlib)	Para procesamiento estadístico, cálculo de errores, generación de gráficos y comparación con umbrales normativos.
Normas técnicas (IEC, CREG)	Sirven como referencia para validación de cumplimiento técnico de la instacion de pruebas.
Tableros de control (QuickSight)	Visualización de consumo, alertas y comparación entre dispositivos en tiempo real.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Resultados Esperados

El desarrollo e implementación del piloto de plataforma inteligente para medición avanzada (AMI) usando IA en sus fases busca entregar resultados concretos que permitan validar su viabilidad técnica, económica y normativa en un entorno controlado. Este piloto se considera insumo clave para la toma de decisiones regulatorias y comerciales, en el contexto del rezago actual en la adopción de AMI en Colombia, que no supera el 1,4 % de usuarios del Sistema Interconectado Nacional (SIN) según la UPME.

A continuación se detallan los principales resultados proyectados de acuerdo con los objetivos específicos del proyecto y experiencias previas documentadas en el contexto colombiano e internacional al 2025.

Desde una perspectiva técnica, se espera que los dispositivos de medición inteligentes seleccionados —de fabricantes distintos— operen de manera interoperable bajo protocolos estándar como DLMS/COSEM (IEC 62056), en combinación con canales de comunicación cableados (RS-485) e inalámbricos (NB-IoT). La interoperabilidad será evaluada mediante métricas como la tasa de aciertos en lectura (esperada superior al 98 % exitosas por periodo seleccionado) y el tiempo medio de respuesta (RTT) que se proyecta por debajo de 300 milisegundos en redes locales y por debajo de tres segundos en transmisión hacia la nube según experiencias previas consultadas, conforme a los lineamientos técnicos internacionales de referecia.

En relación con la precisión en la medición se espera un margen de error inferior al 1,5 % en condiciones normales para corrientes bajas. Estos valores serán contrastados con mediciones de referencia capturadas mediante sensores de corriente externos (pinzas

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

amperimétricas) y patrones analógicos calibrados, siguiendo los parámetros definidos por las normas IEC 62052-11 e IEC 62053-21 con dispositivos certificados en el cumplimiento. Se espera lograr una estabilidad en la transmisión de datos superior al 95 % durante periodos de observación de 24 horas, condición mínima para el desempeño de un sistema AMI básico.

En términos económicos, estudios previos del Carbon Trust y la UPME (2022) estiman que una implementación nacional de AMI en Colombia con cerca de 11 millones de medidores, podría generar ahorros de hasta USD $730 millones anuales a 2040. En el presente piloto (de laboratorio con dos medirores, lo que no representa una nuestra fiable por la limitada cantidad de dispositivos de medicion) se esperaria demostrar una reducción potencial de pérdidas no técnicas del 3 % al 5 %, en línea con lo reportado por iniciativas de Enel Brasil y EPM Medellín en entornos urbanos similares.

Un componente clave del proyecto es la validación del flujo de datos en una arquitectura tipo GIDI (Gestor Independiente de Datos e Información). La plataforma se probará en condiciones de trazabilidad, latencia y disponibilidad, con el objetivo de cumplir con el requerimiento de entrega de datos antes de las 08:00 horas del día D+1.

Finalmente, se espera que este piloto genere lineamientos replicables para futuras fases de despliegue incluyendo la sistematización del caso “apartamento experimental”, la propuesta de criterios mínimos de interoperabilidad y precisión, y la validación de un modelo de arquitectura abierta, modular y escalable.

En conjunto, los resultados esperados de este trabajo buscan aportar evidencia técnica y económica para apoyar las decisiones regulatorias y estratégicas que permitan acelerar la transformación digital del sistema eléctrico colombiano desde la academia. Costos

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Costos

Este análisis de costos tiene como objetivo revisar si el proyecto “Piloto de plataforma inteligente para la evaluación y optimización de la medición de energía eléctrica en Colombia” es viable desde el punto de vista económico. En todo proyecto de ingeniería no solo es importante que funcione bien técnicamente, sino que también sea rentable y atractivo para posibles inversionistas.

Para este análisis se han tenido en cuenta varios tipos de costos. Por un lado, están los costos operativos, como la compra de equipos, el pago al personal técnico, el uso de servicios y los gastos generales de administración. Por otro lado, están los costos de inversión inicial, como la instalación de la plataforma, licencias necesarias y posibles imprevistos. También se considera el capital de trabajo, que es el dinero necesario para iniciar el proyecto, cubrir sueldos, comprar insumos y mantenerlo funcionando durante las primeras etapas.

Con esto se busca tener un panorama claro del costo total del proyecto, para así evaluar su sostenibilidad y costos frente a otras soluciones tradicionales.

Costos por fase del proyecto

A continuación, se presenta una estimación detallada de los costos distribuidos según las fases metodológicas definidas previamente.

Fase del proyecto	Actividades clave	Costo estimado (COP)
Fase 1: Análisis normativo	Revisión documental, análisis regulatorio	$1.000.000
Fase 2: Diseño arquitectónico	Diagramas, selección de tecnologías, pruebas en local.	$4.000.000
Fase 3: Preparación del piloto	Compra de medidores, instalación, configuración	$17.000.000

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Fase del proyecto	Actividades clave	Costo estimado (COP)
Fase 4: Implementación técnica	Recolección de datos, monitoreo, ingesta en AWS	$13.000.000
Fase 5: Validación y análisis	Comparación con patrones, visualización, dashboards	$4.500.000
Fase 6: Evaluación económica	Cálculo costo-beneficio, escalabilidad	$2.000.000
Total estimado	—	$39.200.000

Inversión inicial e infraestructura

Este componente incluye los gastos relacionados con los activos físicos y digitales necesarios para montar el entorno de prueba.

Concepto	Detalle	Costo (COP)
Medidores inteligentes	2 unidades de distintas marcas, con soporte DLMS	$8.000.000
Gateways IoT + DCUs	2 dispositivos Raspberry Pi industriales	$3.000.000
Infraestructura TI	Computadores, routers, UPS	$6.000.000
Instalación y montaje	Cableado, seguridad eléctrica	$3.000.000
Permisos y licencias	Ambientales, tecnológicas	$3.500.000
Total inversión inicial	—	$23.500.000

Capital de trabajo

Corresponde a los recursos necesarios para operar el piloto durante tres meses, incluyendo personal, servicios y soporte.

Concepto	Detalle	Costo (COP)
Nómina técnica	1 desarrollador, 1 analista, 1 técnico	$9.000.000
Servicios en la nube	AWS, dominios, servidores	$2.500.000
Logística y soporte	Transporte, alimentación, papelería	$1.500.000
Subtotal capital trabajo	—	$13.000.000

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Costos totales y proyección

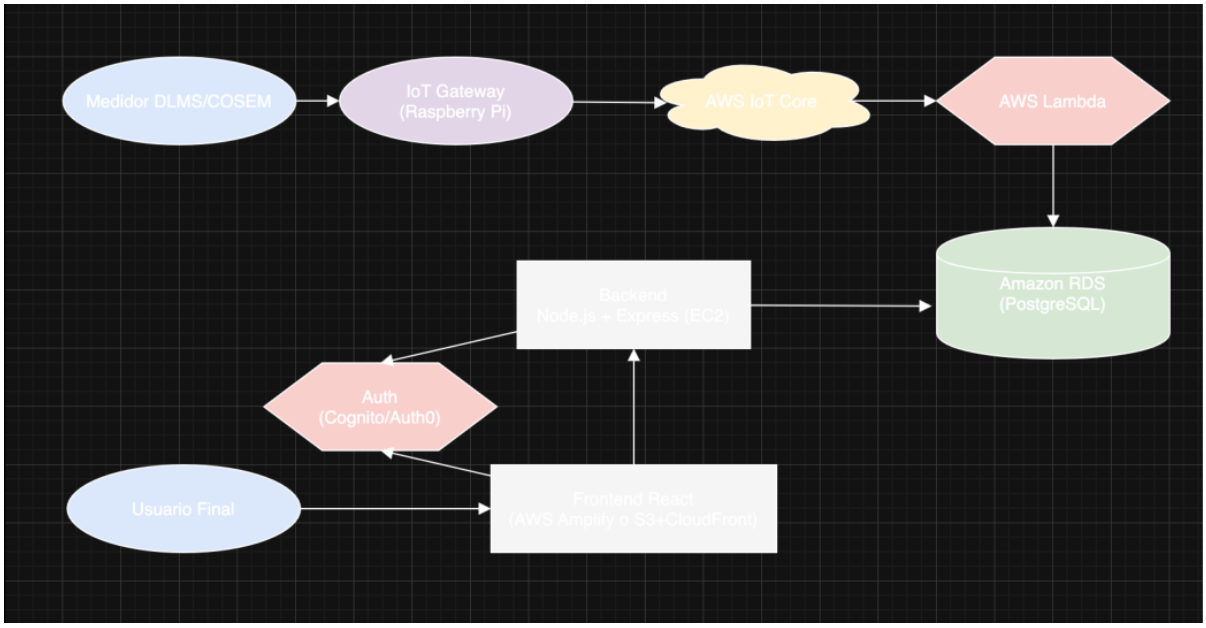
Categoría	Valor (COP)
Costos operativos por fase	$39.200.000
Inversión infraestructura	$23.500.000
Capital de trabajo HH	$13.000.000

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Diseño del Sistema de Medición Inteligente

Arquitectura General

La arquitectura del sistema de medición inteligente propuesta se concibe como una solución distribuida, que sea escalable y segura que habilita la captura, transmisión, procesamiento y visualización de datos eléctricos en concordancia con la Resolución CREG 101 001 de 2022 y los lineamientos estratégicos de la Hoja de Ruta Visión 2030 (Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG], 2022; Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2021). A continuación, se describen los componentes y capas fundamentales:

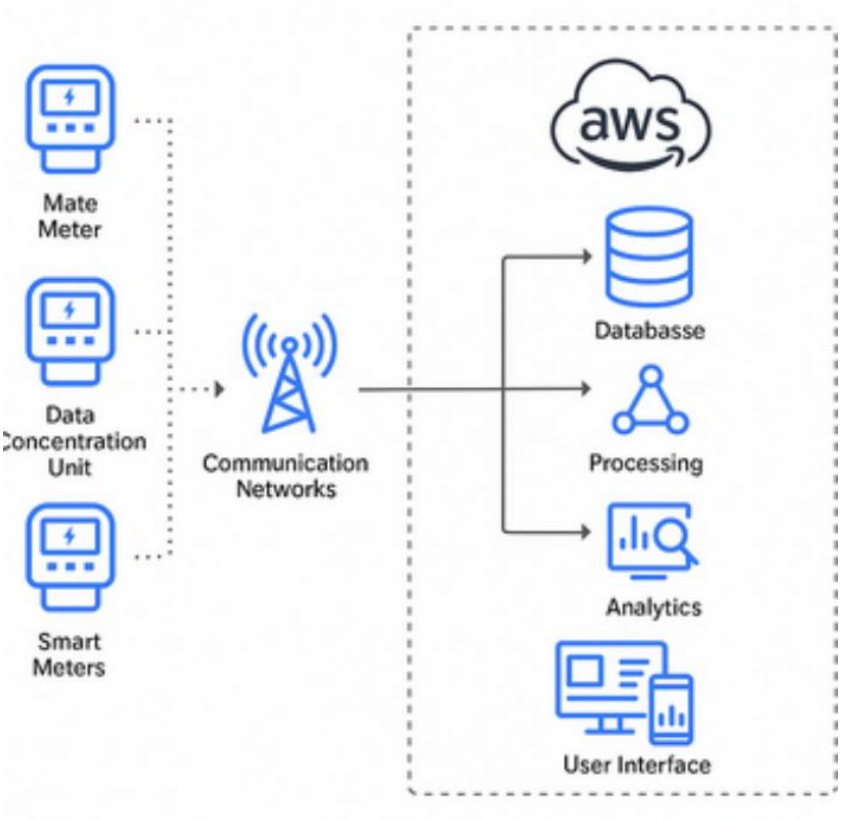


'Figura 1. Arquitectura lógica del SMI. Fuente: elaboración propia

La imagen muestra un diseño de arquitectura lógico-funcional de un sistema de medición inteligente de energía eléctrica (SMI), desplegado sobre una plataforma en la nube de Amazon Web Services (AWS). La capa de medición y recolección comienza con medidores inteligentes que operan bajo el protocolo DLMS/COSEM, los cuales pueden transmitir información mediante conexiones inalámbricas o alámbricas. Estos

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

dispositivos se conectan a IoT Gateways (por ejemplo, Raspberry Pi), o directamente a concentradores primarios PLC que agrupan datos de múltiples medidores, permitiendo la agregación y preprocesamiento de la información. En algunos esquemas se incluye la intervención de colectores operados manualmente por técnicos como respaldo como propuesta.



'Figura 2. Arquitectura lógica del SMI. Fuente: elaboración propia

Capa de medición

Los medidores inteligentes (smart meters) instalados en puntos residenciales o comerciales registran variables como energía activa y reactiva, potencia y voltaje, constituyendo la fuente primaria de datos del sistema.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Capa de concentración

Una Unidad Concentradora de Datos (Data Concentration Unit, DCU) agrupa la información proveniente de múltiples medidores, optimiza los paquetes de datos y los encamina hacia la infraestructura superior, reduciendo latencia y tráfico innecesario.

Capa de comunicación

La conectividad se soportara en redes NB-IoT, LoRaWAN o LTE, las cuales garantizan el envío seguro y oportuno de los registros hacia la nube mediante cifrado de extremo a extremo y control de calidad de servicio.

Capa de plataforma en la nube

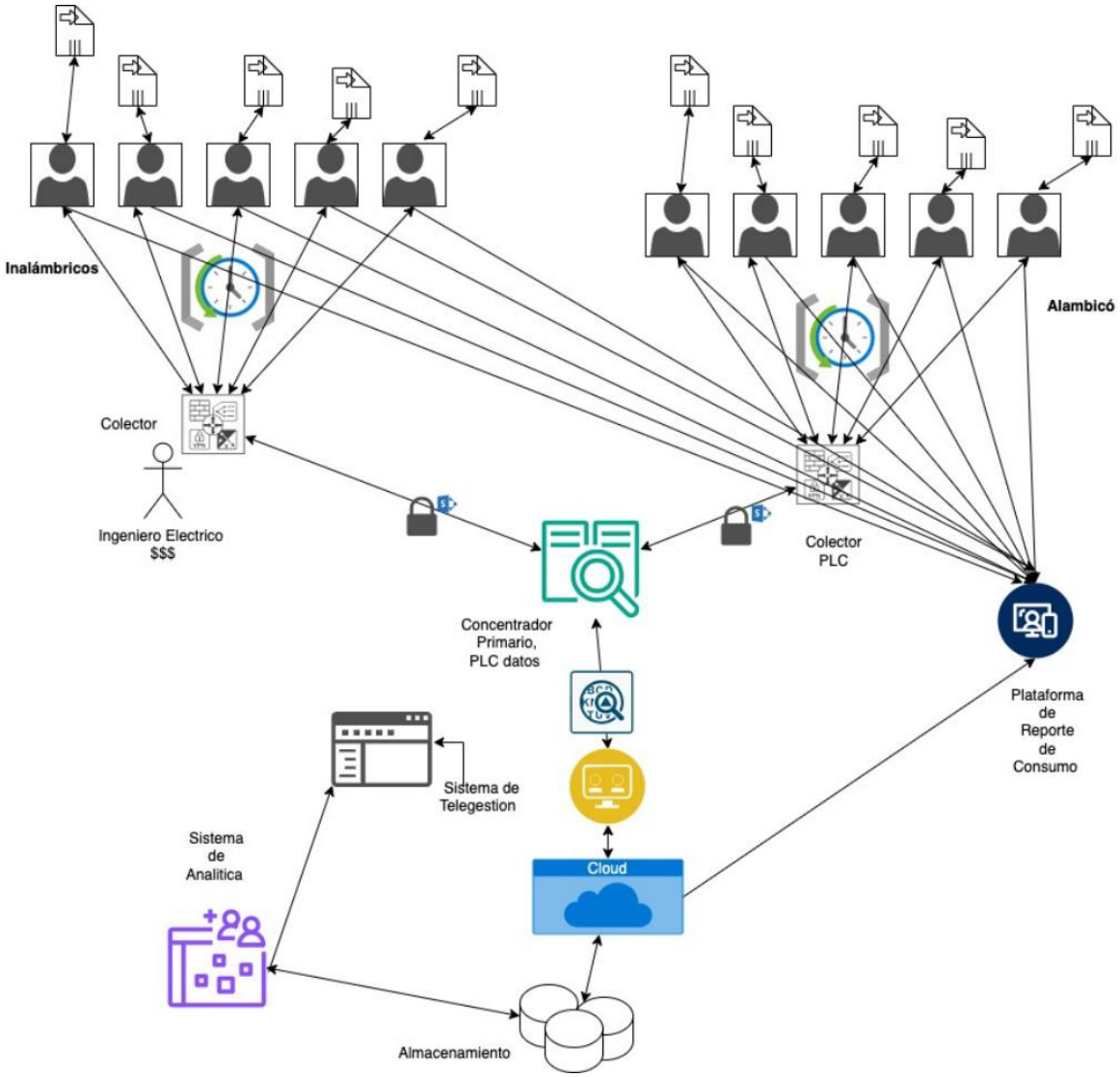
En Amazon Web Services (AWS) se orquesta la lógica central: Almacenamiento: servicios relacionales o orientados a series de tiempo, como Amazon RDS (PostgreSQL) o Amazon Timestream, para resguardar los datos estructurados. Procesamiento: motores sin servidor (AWS Lambda) o de flujo (Kinesis, Glue) que ejecutan limpieza, validación y agregación de la información.

Análisis y visualización: herramientas como Amazon QuickSight permiten el análisis estadístico y la creación de paneles interactivos destinados a operadores y usuarios finales.

Capa de presentación

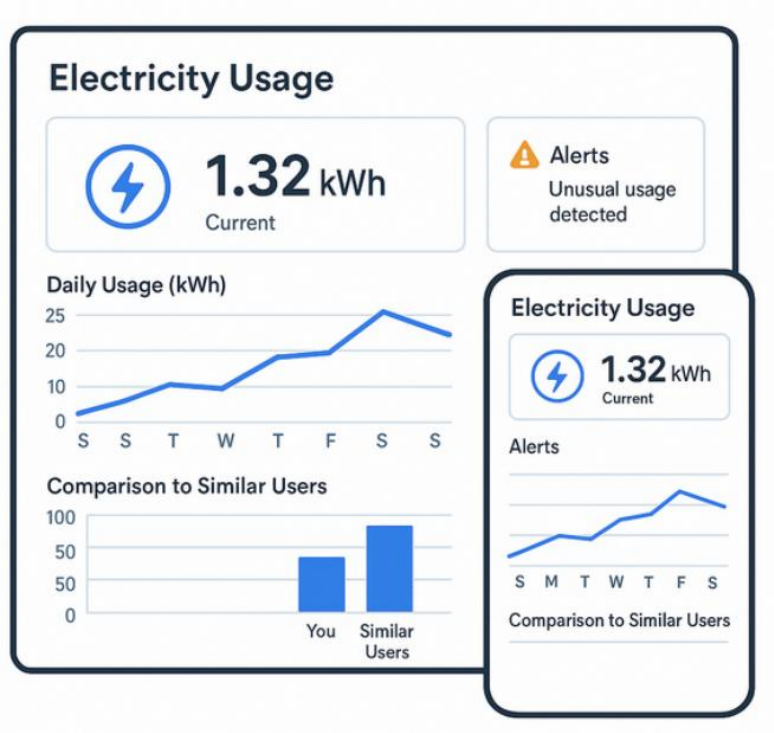
La interfaz de usuario se propuso implementar aplicación web basada en React en el front, integrada en AWS Amplify, Amazon CloudFront y Amazon API Gateway la comunicacion entre dispositivos con el servicio, ofreciendo acceso seguro a métricas, alertas y reportes personalizables.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69



Esta arquitectura modular representa la cadena de valor desde el dispositivo de medición hasta la visualización analítica y proporciona escalabilidad, interoperabilidad (DLMS/COSEM, PLC), seguridad basada en identidad federada y capacidad para integrar agentes de inteligencia artificial que mejoren proceso y aporten en la detección de perdidas.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69



Este panel constituye una interfaz tecnológica de acceso web y móvil diseñada para facilitar a los usuarios residenciales el seguimiento y control de su consumo eléctrico en tiempo real. Las actividades que se esperan realizar a través de esta herramienta incluyen:

Capa de medición: los medidores inteligentes instalados en puntos registraron tensión (V), corriente (A), factor de potencia, potencia activa (kW) y reactiva (kvar), y energía activa (kWh) y reactiva (kvarh), constituyendo la fuente primaria de datos del sistema.

Análisis del uso diario mediante representación gráfica: Exhibición del consumo de energía por día de la semana, apoyando la identificación de patrones de uso y hábitos de consumo.

Recepción de alertas automatizadas: Notificaciones generadas por el sistema ante eventos de consumo inusual o picos de demanda, con el fin de promover acciones correctivas oportunas.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Comparación entre usuarios: Provisión de datos comparativos frente a usuarios con perfiles de consumo similares, orientada a fomentar prácticas de eficiencia energética y conciencia en el uso racional del recurso.

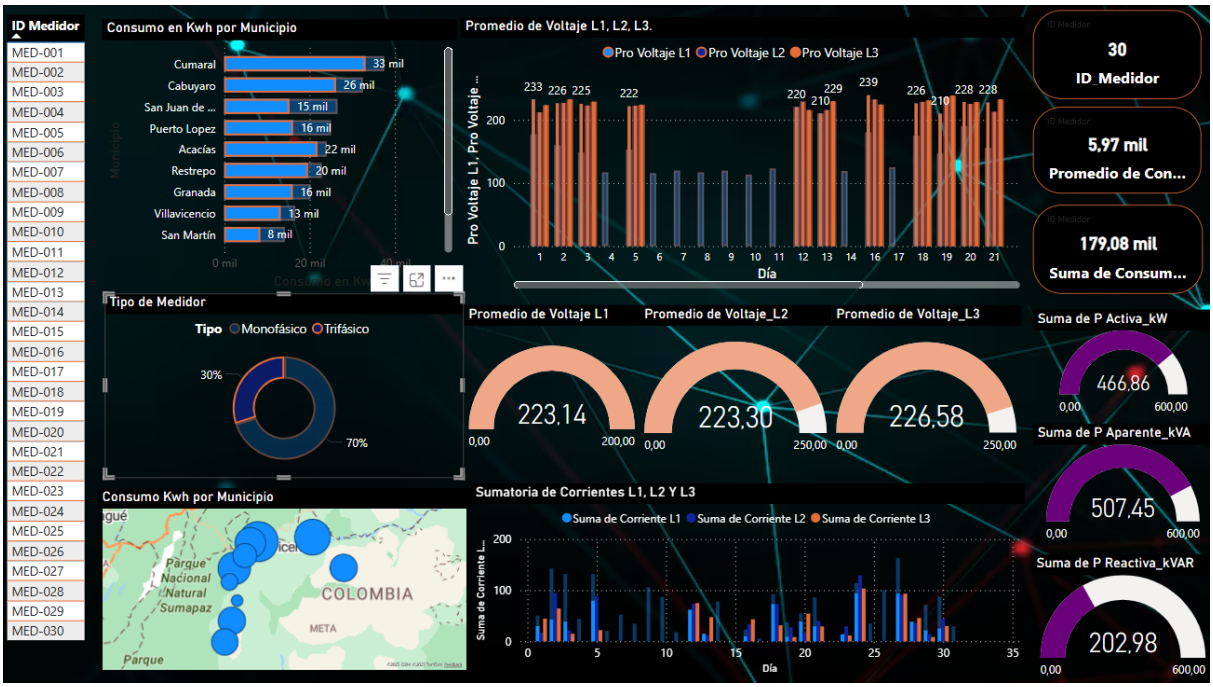
Esta funcionalidad está alineada con los lineamientos de modernización del sistema eléctrico contenidos en las Resoluciones MME 40483 de 2019 y 40142 de 2020, así como en la Resolución CREG 101 001 de 2022 y la Hoja de Ruta Visión 2030 de la UPME (Ministerio de Minas y Energía, 2019, 2020; Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2022; UPME, 2021).

Provisión de datos comparativos frente a usuarios con perfiles de consumo similares, orientada a fomentar prácticas de eficiencia energética y conciencia en el uso racional del recurso.

Esta funcionalidad está alineada con los lineamientos de modernización del sistema eléctrico contenidos en las Resoluciones MME 40483 de 2019 y 40142 de 2020, así como en la Resolución CREG 101 001 de 2022 y la Hoja de Ruta Visión 2030 de la UPME (Ministerio de Minas y Energía, 2019, 2020; Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2022; UPME, 2021).

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Visualización de Arquitectura Funcional y Paneles del Sistema AMI



La imagen muestra un panel de visualización desarrollado para la plataforma de medición inteligente, en el que se integran múltiples variables energéticas capturadas por simulación de medidores en diferentes municipios del departamento del Meta. Entre las funcionalidades destacadas de la plataforma se encuentran:

Consumo en kWh por municipio, representado en barras horizontales que permiten comparar la demanda energética entre regiones como Cumaral, Cabuyaro y Puerto López.

Promedio de voltaje en las fases L1, L2 y L3 por día, lo cual facilita la supervisión del equilibrio trifásico.

Indicadores circulares que muestran el promedio de voltaje por fase, así como la sumatoria de potencia activa, aparente y reactiva.

Distribución por tipo de medidor, diferenciando entre sistemas monofásicos (70%) y trifásicos (30%).

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Visualización geográfica del consumo energético mediante un mapa interactivo que identifica los puntos de medición.

Suma de corrientes por fase, graficada día a día para evaluar el comportamiento de carga.

Este entorno gráfico fue diseñado con enfoque en la usabilidad, permitiendo a operadores y usuarios finales interpretar rápidamente el estado de la red, detectar anomalías y fomentar el uso eficiente de la energía. Su diseño es compatible con dispositivos web y móviles.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Conclusiones

El presente proyecto de grado evaluó la factibilidad técnica y los desafíos regulatorios de una plataforma para la captura y gestión de datos de medición inteligente en Colombia. El caso de estudio fue con un medidor inteligente bifásico clase 1 (energía activa), instalado en una vivienda real en Bogotá y conectado mediante bus RS-485 a un gateway (Raspberry Pi) que transmitió los datos a la nube de AWS. Las experiencias de pilotos de otras regiones y países se usaron como referencia para definir la arquitectura física y las variables de lectura.

El alcance quedó limitado a un solo medidor, porque no fue posible acceder a otros equipos a través de los comercializadores de energía. Esta restricción condiciona el alcance de las conclusiones y evidencia la necesidad de acuerdos institucionales para futuros pilotos.

El presente estudio evidenció la viabilidad básica de una plataforma experimental de medición inteligente (AMI) en Colombia con la restricción de que solo se dispuso de un medidor inteligente debido a no encontrar otra fuente de medición por medio de un comercializador. Esta limitación condiciona los alcances de las conclusiones y subraya la necesidad de acuerdos institucionales para futuros pilotos.

Funcionamiento técnico del prototipo

Durante un mes de operación continua, el sistema capturó las variables del medidor (tensión, corriente, factor de potencia, potencia y energía activa) y las transmitió por MQTT sobre TLS hacia AWS IoT Core. Los datos se procesaron en un servicio backend en Python (FastAPI) y se visualizaron en paneles y exportes a Excel, con lo que se

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

completó el flujo dispositivo → plataforma → visualización. [La disponibilidad de datos fue de X %: N registros recibidos de M esperados.]

La energía activa registrada en el mes fue de 152.2 kWh, frente a 150 kWh facturados por el comercializador en el periodo [fechas], lo que equivale a una diferencia de 1.67 %. Esta comparación es indicativa y no constituye una verificación de exactitud: la factura no es un patrón de referencia, los periodos coinciden exactamente y no se dispuso de un instrumento calibrado. Por lo tanto, este trabajo no puede afirmar el cumplimiento de la clase 1 (±1 %, IEC 62053-21); esa verificación queda como trabajo futuro.

Para ampliar las pruebas de la plataforma, se generaron tres meses de datos sintéticos (JSON) que simulan el consumo de una vivienda con rangos similares a los observados. No se ejecutaron los escenarios de sobrecarga ni de variación de tensión previstos en la metodología, ni se midieron el tiempo de respuesta (RTT) ni la tasa de lectura fallida. Tampoco se implementaron reglas propias de detección de anomalías; solo se registraron las alertas generadas por el propio medidor.

Interoperabilidad: resultado no concluyente.

Al no poderse conectar un segundo dispositivo, la plataforma demostró compatibilidad con DLMS/COSEM únicamente para un proveedor. La verificación de interoperabilidad entre marcas queda pendiente y se identifica como prioridad para una fase II del proyecto. Cobertura de protocolos. No se han ejecutado pruebas con PLC de banda ancha, LTE Cat M1 ni NB-IoT, tecnologías habituales en despliegues smart grid a gran escala (contemplamos la compra de algunos que tardaron más de 3 meses su llegada al 27 de mayo del 2025). La arquitectura propuesta —basada en microservicios y API abiertas— facilita la integración futura con PLC, LTE Cat-M1 y NB-IoT. La plataforma ha

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

sido diseñada siguiendo el principio de vendor neutral, lo que permitirá añadir medidores de distintos fabricantes sin rediseños profundos.

Viabilidad económica preliminar.

El costo estimado total del piloto (COP $39,7 millones) con variables de compra de otros dispositivos, con un costo unitario de COP $4,8 millones. Aun con un solo dispositivo, las simulaciones muestran que, si se alcanzara un despliegue mayor, el costo por punto podría descender a COP $1,9 millones, coherente con los descensos reportados por Enel Brasil (2023) en fases masivas.

Barreras de acceso a infraestructura

Se destacó una barrera organizacional más que técnica entre los comercializadores de Antioquia, Bogotá, Meta y otros que realizan pilotos de implementación del AMI y el acceso a los modelos del sistema implementado por ellos.

Los datos capturados se ingirieron en un servicio backend y se almacenaron en la base de Datos, permitiendo su visualización en paneles desarrollados o exportados tipo Excel. Este flujo “dispositivo → plataforma → dashboards”. Debido a la escasez de medidores disponibles se generó un archivo JSON sintético que refleja los rangos observados en un dispositivo de medición no intrusiva por medio de pinzas amperimétricas. Dichos datos posibilitó la prueba de reglas de negocio —determinación de picos de demanda y detección de anomalías, si existían de forma repetible y controlada.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Alineación normativa

El tramo gateway → nube se protegió con TLS [y autenticación mutua mediante certificados X.509 en AWS IoT Core], y la operación se monitoreó con Amazon CloudWatch. El tramo medidor → gateway (RS-485) no tuvo cifrado, por lo que el piloto no implementa aún los requisitos de cifrado AES-128 y autenticación mutua planteados en el Proyecto de Resolución CREG 701 038 de 2024, que además se encuentra en etapa de consulta. La ausencia de un protocolo nacional de pruebas de campo sigue siendo una brecha regulatoria.

Recomendaciones

- Negociar convenios piloto con al menos dos comercializadores para acceder a parques de medidores de varias marcas.
- Verificar la exactitud con un medidor patrón calibrado por un laboratorio acreditado ante el ONAC.
- Ejecutar los escenarios de sobrecarga y de variación de tensión y temperatura, y medir RTT y tasa de lectura fallida.
- Implementar cifrado y autenticación en el enlace medidor–gateway (security suite DLMS o equivalente).
- Completar las pruebas con PLC, NB-IoT y LTE-M.
- Elaborar, junto con la CREG y la UPME, un perfil mínimo de pruebas de interoperabilidad y evaluar un modelo de sandbox regulatorio para la investigación académica.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

En síntesis, el proyecto demuestra que es factible capturar, transmitir, almacenar y visualizar en la nube los datos de un medidor inteligente en una vivienda real. No ofrece evidencia sobre exactitud certificada, interoperabilidad ni escalabilidad, por las restricciones de acceso a dispositivos y a instrumentos de referencia.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

Bibliografía

A. Carbon Trust, & Unidad de Planeación Minero-Energética. (2022). Demand-side flexible technology roll-out in Colombia: Cost-benefit analysis report. Carbon Trust. https://www.upme.gov.co

B. Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2022). Resolución 101 001 de 2022: Condiciones para la implementación de la infraestructura de medición avanzada. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_101-1_2022.htm

C. Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2024). Circular 121 de 2024: Consulta pública sobre requisitos operativos del GIDI. https://www.creg.gov.co

D. Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2024). Resolución 701-38 de 2024: Requisitos de ciberseguridad y tarifas horarias piloto. https://gestornormativo.creg.gov.co

E. Enel Brasil. (2023). Memoria ESG 2023. https://www.enelamericas.com/content/dam/enel-americas/investor/informes-anuales-y-presentaciones/memorias/2023/Memoria-Anual-Enel-Americas-2023.pdf

F. International Electrotechnical Commission. (2021). IEC 62052-11:2021 Electricity metering equipment (AC)—General requirements, tests and test conditions. IEC.

G. International Electrotechnical Commission. (2021). IEC 62056: Electricity metering—Data exchange for meter reading, tariff and load control (DLMS/COSEM suite). IEC.

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

H. Moreno, A., Rojas, J., & Quintero, L. (2024). Edge-enabled non-technical loss detection for smart metering in Colombia. IEEE Transactions on Smart Grid, 15(2), 1234-1245. https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3321124

I. Portafolio. (2024, 12 agosto). La implementación de la medición inteligente de energía, a paso de tortuga. https://www.portafolio.co/energia/la-implementacion-de-la-medicion-inteligente-de-energia-a-paso-de-tortuga-610947

J. Velásquez, J., & Torres, C. (2023). Hour-ahead residential load forecasting with LSTM networks in the Colombian Caribbean. Sustainability, 15(6), 5123. https://doi.org/10.3390/su15065123

K. García, N., & López, P. (2025). Reinforcement learning-based demand response using Colombian TOU tariffs. Energy and AI, 13, 100266. https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100266

El Nogal: Calle 79 # 11 - 45 - Centro de contacto (571) 5936464 - Bogotá, Colombia. Suramérica - www.universidad.edu.c
© UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812. Personería Jurídica Res. nº. 2898 del Minjusticia - 16/05/69