

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
INFORMÁTICA Y MECÁNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
MEDIDOR INTELIGENTE PARA MEJORAR LAS
OPERACIONES TÉCNICO – COMERCIALES, CUSCO 2026**

PRESENTADO POR:

Br. ALEXANDER TTITO SANTA CRUZ

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO ELECTRICISTA**

ASESOR:

Dr. DONATO MAMANI PARI

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor DONATO MAMANI PARI
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
PROTOTIPO DE MEDIDOR INTELIGENTE PARA MEJORAR LAS
OPERACIONES TÉCNICO - COMERCIALES, CUSCO 2026

Presentado por: ALEXANDER TITO SANTA CRUZ DNI N° 744443659;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO ELECTRICISTA

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 1.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 22 de JUNIO de 2026

Firma

Post firma DONATO MAMANI PARI

Nro. de DNI 23876507

ORCID del Asesor 0000 - 0002 - 0988 - 3424

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259: 600314616

ALEXANDER TTITO

TESIS Alexander Ttito REPOSITORIO.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:600314616

Fecha de entrega

15 jun 2026, 4:19 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

15 jun 2026, 4:24 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS Alexander Ttito REPOSITORIO.pdf

Tamaño del archivo

7.8 MB

261 páginas

57.029 palabras

359.076 caracteres

1% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 0%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



DR. DONATO MAMANI PARI
ASESOR DE TESIS

DEDICATORIA

A mis padres Alejandro y Victoria por su apoyo y amor incondicional, son y serán mi más grande ejemplo de lucha, entrega, esfuerzo y admiración. A mis hermanos Diego David y Luz Diana por su paciencia y su confianza en mí. A mi pareja Fiorela por acompañarme en las noches de desvelo y apoyo incondicional, y muy especialmente a mi hija Alessia por ser el sustento moral y emocional y por ser la dueña de mis pensamientos y sueños, con su llegada iluminó mi vida con amor, alegría y fuerzas para seguir adelante. A mis familiares que no dudaron que lograría esta meta, A todos, gracias por creer en mí cuando más lo necesitaba. Así mismo a quienes desde el cielo siguen iluminando mi camino: mi abuelo Doroteo, a mi tío Antonio, a mi primo Edson y a mi cuñado Brayan, sé que desde el cielo cuidarán de mí y de mi familia.

Alexander Ttito Santa Cruz

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por ser mi guía de vida y brindarme la fuerza en los momentos difíciles, y por darme las fuerzas necesarias para terminar esta etapa. A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, a los ingenieros Basilio Salas y Willy Morales, por su compromiso con la formación de profesionales íntegros y competentes. Así mismo un especial agradecimiento a mi asesor de tesis el Dr. Donato Mamani Pari por su valioso acompañamiento, orientación técnica y constante disposición para apoyarme durante todo el proceso. Agradezco también a mis compañeros de trabajo de Electro Sur Este S.A.A. y el Gobierno Regional del Cusco por orientarme durante esta etapa de formación académica y profesional. A mi familia en general, amigos, compañeros y colegas, quienes, con palabras de aliento, gestos de apoyo hicieron posible que esta meta hoy sea una realidad.

Alexander Ttito Santa Cruz

INTRODUCCIÓN

La presente tesis desarrolla el diseño e implementación de un prototipo de medidor inteligente orientado a mejorar las operaciones técnico-comerciales del servicio eléctrico en la ciudad del Cusco. El estudio parte de la problemática identificada en la empresa Electro Sur Este S.A.A., cuya área de concesión presenta condiciones geográficas complejas que dificultan la toma de lecturas, la ejecución de cortes y reconexiones y el control de pérdidas no técnicas. Estas limitaciones generan facturaciones inexactas, reclamos frecuentes y una percepción negativa de la calidad del servicio por parte de los usuarios.

Como alternativa, se plantea el diseño e implementación de un medidor inteligente basado en tecnologías IoT y domótica, utilizando hardware y software libre como ESP32, ESPHome, Home Assistant, Tuya y SmartLife. El sistema permite el monitoreo y control del consumo eléctrico en tiempo real, la lectura remota de energía, la automatización de cortes y reposiciones y el apoyo en la detección de pérdidas no técnicas. Con ello se reducen intervenciones presenciales, errores humanos y tiempos de respuesta operativa. A diferencia del sistema convencional, que requiere procesamiento manual de datos para su posterior registro en el sistema de facturación, el prototipo transmite automáticamente la información mediante red Wi-Fi hacia una plataforma digital, donde puede visualizarse y gestionarse de forma segura. De esta manera, se optimizan las operaciones técnico-comerciales, mejorando la eficiencia operativa y la calidad del servicio brindado al usuario.

El primer capítulo establece el marco general de la investigación, contextualizando la problemática en el ámbito del servicio eléctrico de baja tensión en la ciudad del Cusco. Se describe el entorno geográfico, regulatorio y operativo en el que se desarrollan las actividades técnico-comerciales de la empresa distribuidora. Asimismo, se identifican deficiencias asociadas a los procesos tradicionales de medición y supervisión del suministro eléctrico. El segundo capítulo desarrolla el marco teórico que sustenta la investigación. Se revisan antecedentes relacionados con la evolución de la medición eléctrica y la implementación de sistemas de Infraestructura de Medición Avanzada. Se analiza la transición desde medidores electromecánicos hacia dispositivos electrónicos con capacidades de procesamiento digital y comunicación bidireccional.

El tercer capítulo presenta el diagnóstico del sistema piloto AMI implementado en la ciudad del Cusco. Se evalúan problemas asociados a fallas en redes PLC, saturación de

concentradores y pérdida de conectividad en determinados medidores. Estas limitaciones afectan la confiabilidad y continuidad de la información disponible para la gestión operativa. El cuarto capítulo describe el diseño e implementación del medidor inteligente. Se explica la etapa de medición analógica, compuesta por el transformador de corriente, el circuito de medición de tensión y los elementos de acondicionamiento de señal. Posteriormente, se detalla la conversión analógico-digital mediante el ADC del microcontrolador ESP32. Posteriormente, en la sección de resultados se evalúa el desempeño experimental del prototipo. Se comparan las mediciones obtenidas con instrumentos de referencia calibrados, verificando la precisión en la determinación de voltaje, corriente, potencia y energía. También se analiza la estabilidad de la comunicación inalámbrica y la respuesta ante eventos de variación de carga.

Finalmente, se exponen las conclusiones del estudio. Se demuestra que la implementación del prototipo basado en tecnologías IoT y principios AMI constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar las operaciones técnico-comerciales. Se resaltan sus beneficios en términos de monitoreo continuo, mayor disponibilidad de información y potencial reducción de pérdidas no técnicas, recomendándose su ampliación e integración progresiva en procesos de modernización del sistema eléctrico.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo diseñar e implementar un prototipo de medidor inteligente orientado a mejorar las operaciones técnico-comerciales en sistemas de distribución eléctrica, específicamente en usuarios de difícil acceso dentro de la concesión de Electro Sur Este S.A.A. Actualmente, los procesos comerciales como la lectura de consumo, control de pérdidas no técnicas y corte y reconexión del servicio se realizan de manera manual, generando deficiencias operativas, retrasos y reclamos por parte de los usuarios. Asimismo, los sistemas AMI implementados presentan limitaciones relacionadas con la conectividad y la interoperabilidad de sus componentes. La investigación es de enfoque cuantitativo, nivel experimental y diseño cuasi-experimental, en la cual se desarrolló e implementó un prototipo basado en tecnologías IoT, capaz de medir variables eléctricas como tensión, corriente, potencia y energía, así como transmitir datos en tiempo real mediante comunicación inalámbrica. Los resultados obtenidos evidencian que el prototipo permite mejorar la precisión en la medición del consumo eléctrico, optimizar el registro de datos, facilitar la detección de pérdidas no técnicas y automatizar los procesos de corte y reconexión del servicio. Asimismo, se determinó que el costo de implementación del prototipo es inferior al de los sistemas AMI comerciales, representando una alternativa económicamente viable. Se concluye que el prototipo de medidor inteligente constituye una solución eficiente y de bajo costo para mejorar las operaciones técnico-comerciales en sistemas de distribución eléctrica, especialmente en zonas de difícil acceso.

Palabras clave: Prototipo, Medidor inteligente, Operaciones técnico-comerciales, Lectura, Corte y reconexión

ABSTRACT

This research aims to design and implement a smart meter prototype to improve techno-commercial operations in electrical distribution systems, specifically for users located in hard-to-access areas within the concession of Electro Sur Este S.A.A. Currently, commercial processes such as energy consumption reading, non-technical loss control, and service disconnection and reconnection are carried out manually, leading to operational inefficiencies, delays, and customer complaints. Additionally, the Advanced Metering Infrastructure (AMI) systems currently deployed present limitations related to connectivity and interoperability. The research follows a quantitative approach, with an experimental level and a quasi-experimental design. A prototype based on IoT technologies was developed and implemented, capable of measuring electrical variables such as voltage, current, power, and energy, as well as transmitting data in real time through wireless communication. The results demonstrate that the prototype improves the accuracy of energy consumption measurement, optimizes data recording, facilitates the detection of non-technical losses, and enables the automation of service disconnection and reconnection processes. Furthermore, the implementation cost of the prototype is lower than that of commercial AMI systems, making it an economically viable alternative. It is concluded that the smart meter prototype represents an efficient and low-cost solution to enhance techno-commercial operations in electrical distribution systems, particularly in areas with limited accessibility.

Keywords: Prototype, Smart meter, Technical-commercial operations, Meter reading, Disconnection and reconnection

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
INTRODUCCIÓN	4
RESUMEN	6
ABSTRACT.....	7
ÍNDICE GENERAL.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS	17
ÍNDICE DE TABLAS.....	19
GLOSARIO DE ABREVIATURAS.....	20
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES.....	21
1.1. Introducción.....	21
1.2. Contextualización del tema	21
1.3. Ubicación geográfica	22
1.4. El problema	25
1.4.1. Planteamiento del problema	25
1.4.2. Análisis situacional del problema.....	27
1.4.3. Deficiencias en las operaciones técnico-comerciales	29
1.4.3.1. Deficiencias en la toma de lectura.....	29
1.4.3.2. Deficiencias en el control de pérdidas no técnicas	33
1.4.3.3. Gestión de cortes y reconexiones	35
1.4.3.4. Resumen del estado de las operaciones técnico-comerciales	37
1.4.4. Deficiencias en la operación del Sistema AMI piloto.....	37
1.4.4.1. Pérdida de conectividad del concentrador	37
1.4.4.2. Pérdida de conectividad del medidor inteligente	38
1.4.4.3. Resumen del estado del Sistema AMI piloto	39
1.5. Formulación del Problema	40
1.5.1. Problema general	40
1.5.2. Problemas específicos	40
1.6. Objetivos	40
1.6.1. Objetivo general.....	40
1.6.2. Objetivos específicos	41
1.7. Justificación del estudio	41
1.7.1. Justificación social	41
1.7.2. Justificación tecnológica	41
1.7.3. Justificación metodológica	41
1.7.4. Justificación económica	42
1.7.5. Valor teórico	42
1.7.6. Utilidad metodológica.....	44
1.7.7. Implicancias prácticas	44
1.7.8. Conveniencia	45
1.8. Alcances y limitaciones.....	46
1.8.1 Alcances	46
1.8.1.1. Estudio del consumo energético.....	46
1.8.1.2. Estudio del medidor inteligente.....	46
1.8.1.3. Evaluación de los beneficios y desafíos	46
1.8.2. Limitaciones	47
1.8.2.1. Restricciones normativas	47

1.8.2.2. Disponibilidad de componentes	47
1.8.2.3. Disponibilidad de datos	47
1.8.2.4. Representatividad de la muestra.....	47
1.8.2.5. Limitaciones técnicas de los medidores inteligentes.....	47
1.8.2.6. Factores externos no controlables	48
1.9. Hipótesis.....	48
1.9.1. Hipótesis general.....	48
1.9.2. Hipótesis específicas	48
1.10. Variables, dimensiones e indicadores	48
1.10.1. Variables.....	48
1.10.1.1. Variable independiente	48
1.10.1.2. Variable dependiente	49
1.10.2. Dimensiones	49
1.10.2.1. Dimensiones de la variable independiente.....	49
1.10.2.2. Dimensiones de la variable dependiente.....	49
1.10.3. Indicadores.....	49
1.10.3.1. Indicador de la variable independiente	49
1.10.3.2. Indicadores de la variable dependiente.....	50
1.11. Población y muestra.....	50
1.11.1. Población	50
1.11.2. Muestra.....	50
1.12. Metodología de la investigación.....	50
1.12.1. Método de la investigación.....	50
1.12.2. Tipo de investigación	51
1.12.3. Nivel de la investigación	51
1.12.4. Enfoque de la investigación.....	51
1.12.5. Diseño de la investigación.....	52
1.12.6. Técnicas de recolección de datos.....	52
1.12.7. Procesamiento de datos	52
1.13. Matriz de Consistencia	52
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	54
2.1. Introducción.....	54
2.2. Antecedentes de la investigación.....	54
2.2.1. Antecedentes internacionales	54
2.2.2. Antecedentes nacionales	55
2.2.3. Antecedentes locales	57
2.3. Bases teóricas	58
2.3.1. Evolución de la medición de energía	58
2.3.2. Medidor electromecánico	59
2.3.2.1. Principio electromecánico de medición.....	60
2.3.2.2. Principio de funcionamiento de la comunicación	61
2.3.2.3. Limitaciones técnicas.....	62
2.3.3. Medidor electrónico (convencional).....	63
2.3.3.1. Principio electrónico de medición.....	64
2.3.3.2. Principio de funcionamiento de la comunicación	65
2.3.3.3. Limitaciones técnicas.....	66
2.3.4. Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)	66
2.3.4.1. Arquitectura AMI	68
2.3.4.2. Componentes Sistema AMI	69
2.3.4.3. Flujo de datos	70

2.3.4.4. Redes de comunicación	70
2.3.4.5. Principio de funcionamiento de la comunicación	71
2.3.4.6. Monitoreo de la medición inteligente	72
2.3.5. Medidor inteligente	74
2.3.5.1. Principio de medición inteligente	74
2.3.5.2. Principio de funcionamiento de la comunicación	75
2.3.6. Concentrador de Datos - DCU	77
2.3.7. Software HES - Meter Data Collection (MDC)	77
2.3.8. Operaciones técnico-comerciales	78
2.3.8.1. Proceso de toma de lectura	79
2.3.8.2. Proceso de corte del servicio	79
2.3.8.3. Proceso de reconexión del servicio	80
2.3.8.4. Proceso de detección de hurtos de energía	81
2.3.9 Diseño de Medidores Inteligentes	81
2.3.9.1 Concepto de diseño de medidores inteligentes	81
2.3.9.2 Etapas funcionales del diseño de un medidor inteligente	82
2.3.9.3 Criterios de diseño de medidores inteligentes	86
2.3.9.4 Diseño basado en IoT para medición inteligente	86
CAPÍTULO III: DIAGNÓSTICO DEL ESTUDIO	88
3.1. Introducción	88
3.2. Diagnóstico del Sistema AMI piloto	88
3.3. Descripción del sistema AMI piloto	90
3.4. Desarrollo del sistema piloto	92
3.4.1. Etapa de fabricación y envío de los componentes	92
3.4.2. Etapa de ingeniería	92
3.4.3. Fase técnica	94
3.4.4 Fase de despliegue de software	94
3.4.4.1. MDC listo para despliegue	94
3.4.4.2. MDC integrado al SIELSE	95
3.4.5. Fase de despliegue de equipos	95
3.4.5.1. Concentradores de datos (DCU) del proyecto piloto	95
3.4.5.2. Medidores inteligentes del proyecto piloto	96
3.4.6. Transmisión de datos	97
3.4.6.1. Transmisión del medidor inteligente hacia el concentrador (Red de Acceso)	97
3.4.6.2. Transmisión del concentrador (DCU) hacia el centro de gestión	98
3.4.6.3. Demodulación y procesamiento en el Centro de Gestión	99
3.5. Validación del proyecto piloto	100
3.5.1 Protocolo de pruebas de comunicación	100
3.5.2 Protocolo de pruebas de funcionalidad	100
3.6. Resultados esperados	100
3.6.1 Medidores inteligentes	100
3.6.2. Concentradores de datos	101
3.6.3. Software HES/MDC	101
3.7. Problemas Identificados en el Sistema AMI piloto	101
3.7.1. Desconexión de concentradores por falta de señal	101
3.7.2. Saturación de datos en la comunicación	101
3.7.3. Fallas en medidores inteligentes	102
3.7.4. Impacto en la gestión operativa	102
3.7.5. Recomendaciones Iniciales	102
3.8. Costos de adquisición e implementación del Sistema AMI piloto	103

3.8.1. Costos unitarios de los equipos principales.....	103
3.8.2. Costos asociados al software y servicios de implementación	104
3.8.3. Evaluación económica global del sistema piloto	105
3.8.4. Conclusiones del diagnóstico económico	106
CAPÍTULO IV: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE MEDIDOR INTELIGENTE.....	107
4.1. Introducción.....	107
4.2. Procedimiento de diseño del prototipo de medidor inteligente	107
4.2.1. Microcontrolador ESP32.....	108
4.2.1.1. Descripción general	108
4.2.1.2. Características técnicas del hardware	109
4.2.1.3. Función dentro del prototipo.....	109
4.2.1.4. Costos y disponibilidad.....	110
4.2.1.5. Ventajas principales.....	111
4.2.1.6. Justificación de selección para el prototipo	111
4.2.2. Pantalla OLED 0.96” SSD1306.....	111
4.2.2.1. Descripción general	111
4.2.2.2. Características técnicas del hardware	112
4.2.2.3. Función dentro del prototipo.....	113
4.2.2.4. Costos y disponibilidad.....	114
4.2.2.5. Ventajas principales.....	114
4.2.3. LED RGB indicador del estado del suministro eléctrico	114
4.2.3.1. Descripción general	115
4.2.3.2. Características técnicas del LED RGB	115
4.2.3.3. Función dentro del prototipo.....	116
4.2.3.4. Ventajas del uso de LED RGB en el prototipo	117
4.2.3.5. Justificación de selección.....	118
4.2.4. Fuente de alimentación Mean Well 5V.....	118
4.2.4.1. Descripción general	118
4.2.4.2. Características técnicas del hardware	119
4.2.4.3. Función dentro del prototipo.....	120
4.2.4.4. Criterios de selección.....	120
4.2.4.5. Costos y disponibilidad.....	120
4.2.4.6. Ventajas principales.....	121
4.2.5. Home Assistant Green.....	121
4.2.5.1. Descripción general	121
4.2.5.2. Características técnicas del hardware	122
4.2.5.3. Función dentro del prototipo.....	123
4.2.5.4. Costos y disponibilidad.....	123
4.2.5.5. Ventajas principales.....	124
4.2.6. Plataforma Home Assistant (software de automatización)	124
4.2.6.1. Descripción general	124
4.2.6.2. Arquitectura del sistema	125
4.2.6.3. Integración en el prototipo	126
4.2.6.4. Ventajas técnicas	126
4.2.6.5. Aplicación en la investigación	126
4.2.7. Interruptor Wi-Fi Tuya 16A.....	126
4.2.7.1. Descripción general	126
4.2.7.2. Características técnicas	127
4.2.7.3. Principio de funcionamiento	128

4.2.7.4. Funciones y prestaciones	128
4.2.7.5. Integración en sistemas IoT	128
4.2.7.6. Costo del dispositivo	129
4.2.7.7. Aplicación en el prototipo.....	129
4.2.8. Módulo medidor de energía Wi-Fi Tuya 16A (1 Vía).....	129
4.2.8.1. Descripción general	130
4.2.8.2. Características técnicas	130
4.2.8.3. Principio de funcionamiento	131
4.2.8.4. Funciones principales	135
4.2.8.5. Ventajas técnicas	136
4.2.8.6. Costo del dispositivo	136
4.2.8.7. Integración en el sistema del prototipo	136
4.2.8.8. Comparación técnica entre ambos dispositivos	137
4.2.9. Plataforma de gestión móvil Smart Life	137
4.2.9.1. Descripción general	137
4.2.9.2. Arquitectura y funcionamiento.....	138
4.2.9.3. Funciones principales	139
4.2.9.4. Aplicación dentro del prototipo.....	139
4.2.9.5. Ventajas técnicas	140
4.2.9.6. Consideraciones sobre privacidad y operación local.....	140
4.2.9.7. Costos y disponibilidad.....	140
4.2.10. Repetidor Wi-Fi inalámbrico de 300 Mbps.....	141
4.2.10.1. Descripción general	141
4.2.10.2. Función dentro del prototipo	141
4.2.10.3. Ventajas técnicas	142
4.2.10.4. Costo y disponibilidad	142
4.2.11. Módem portátil ZTE MF920V 4G LTE.....	143
4.2.11.1. Descripción general	143
4.2.11.2. Función dentro del prototipo	143
4.2.11.3. Ventajas técnicas	143
4.2.11.4. Costo y disponibilidad	144
4.2.12. Chip 4G LTE para Internet.....	144
4.2.12.1. Descripción general	144
4.2.12.2. Función dentro del prototipo	145
4.2.12.3. Ventajas técnicas	145
4.2.12.4. Costo y disponibilidad	145
4.2.13. Caja para medidor impresa en 3D (con accesorios).....	146
4.2.13.1. Descripción general	146
4.2.13.2. Función dentro del prototipo	147
4.2.13.3. Ventajas técnicas	147
4.2.13.4. Costo y disponibilidad	147
4.2.14. Laptop (centro de monitoreo)	148
4.2.14.1. Descripción técnica y función en el prototipo.....	148
4.2.14.2. Requerimientos del sistema Home Assistant	149
4.2.14.3. Ventajas del uso de laptop en el sistema AMI	149
4.2.15. Cable Ethernet.....	150
4.2.15.1. Descripción general	150
4.2.15.2. Función dentro del prototipo	150
4.2.15.3. Ventajas técnicas	150
4.2.16. Multímetro Sanwa DCL1000	150

4.2.16.1. Descripción general	150
4.2.16.2. Características técnicas	151
4.2.16.3. Principio de funcionamiento	152
4.2.16.4. Funciones principales	153
4.2.16.5. Ventajas técnicas	153
4.2.16.6. Integración en el sistema del prototipo	153
4.2.16.7. Esquema de conexión eléctrica	154
4.3. Procedimiento de programación y configuración del prototipo de medidor inteligente.....	155
4.3.1. Configuración del prototipo de medidor inteligente	155
4.3.1.1 Verificación inicial de componentes	155
4.3.1.2 Pruebas iniciales de funcionamiento (Bench Test)	156
4.3.1.3 Ensamblaje y conexión del prototipo.....	156
4.3.1.4 Configuración de los dispositivos IoT (Smart Life).....	157
4.3.1.5 Integración con la plataforma Home Assistant	158
4.3.1.6 Pruebas finales y validación funcional del sistema	160
4.3.2. Programación del prototipo de medidor inteligente.....	160
4.3.2.1. Preparación documental.....	161
4.3.2.2. Recepción y verificación de componentes.....	161
4.3.2.3. Pruebas funcionales preliminares (bench tests)	161
4.3.2.4. Montaje físico y conexiones	162
4.3.2.5. Configuración inicial en Smart Life	162
4.3.2.6. Instalación y configuración de Home Assistant	163
4.3.2.7. Integración Home Assistant y Tuya	163
4.3.2.8. Programación del ESP32 en ESPHome.....	163
4.3.2.9. Montaje final en caja 3D.....	169
4.3.2.10. Configuración de red (modem 4G + repetidor).....	170
4.3.2.11. Pruebas funcionales finales	170
4.3.2.12. Análisis de resultados	170
4.4. Procedimiento de implementación del prototipo de medidor inteligente	171
4.4.1. Circuito de iluminación.....	172
4.4.2. Circuito de tomacorriente.....	173
4.4.3. Integración con el medidor inteligente.....	174
4.4.4. Pruebas de funcionamiento y validación.....	174
4.4.5. Materiales y dispositivos utilizados	174
4.4.6. Esquema de conexión eléctrica.....	175
4.4.7. Seguridad eléctrica y normas aplicadas	176
4.5. Procedimiento de conexión y alimentación del prototipo de medidor inteligente	177
4.5.1. Diagrama de flujo resumen	177
4.5.2. Desarrollo paso a paso	178
4.5.2.1. Verificación del módulo para la simulación	179
4.5.2.2. Verificación de líneas: identificación de fase y neutro.....	179
4.5.2.3. Conexión del medidor inteligente	179
4.5.2.4. Instalación del sensor de corriente (CT) en la línea	179
4.5.2.5. Configuración de repetidor Wi-Fi	180
4.5.2.6. Preparación de dispositivos de control (laptop y celular).....	180
4.5.2.7. Energización del módulo mediante el TM.....	180
4.5.2.8. Registro de variables y validación.....	180
4.5.2.9. Secuencia de conexión eléctrica (resumen operativo).....	180
4.5.2.10. Notas finales sobre seguridad.....	181
4.6. Normalización técnica, desempeño metrológico y fundamentos eléctricos	182

4.6.1. Estandarización bajo normas internacionales.....	182
4.6.2. Clase de precisión y su equivalencia normativa.....	182
4.6.3. Fundamentos eléctricos del módulo medidor inteligente.....	183
4.6.3.1. Medición de corriente (TC de núcleo sólido o shunt)	183
4.6.3.2. Medición de tensión.....	183
4.6.3.3. Cálculo de potencia instantánea	183
4.6.3.4. Cálculo de energía	184
4.6.4. Comportamiento ante distintos tipos de carga eléctrica.....	184
4.6.5. Proceso de calibración del sistema	184
4.7. Principio de funcionamiento del medidor inteligente diseñado	185
4.7.1. Etapa de procesamiento analógico.....	185
4.7.1.1. Función dentro de la cadena de medición.....	185
4.7.1.2. Medición de corriente mediante Transformador de Corriente (TC)	185
4.7.1.3. Relación de transformación	186
4.7.2. Etapa de conversión analógico–digital (ADC).....	187
4.7.3. Etapa de procesamiento digital.....	187
4.8. Justificación del uso de red Wi-Fi	187
4.8.1. Fundamentación técnica.....	187
4.8.1.1. Disponibilidad de infraestructura existente.....	188
4.8.1.2. Capacidad de transmisión y latencia	188
4.8.1.3. Facilidad de integración con plataformas IoT.....	188
4.8.1.4. Reducción de costos de instalación	188
4.8.2. Comparación técnica con buses físicos cableados.....	189
4.8.3. Coherencia con el alcance del prototipo	190
4.9. Ventajas y desventajas del sistema Wi-Fi en AMI.....	190
4.9.1. Ventajas.....	190
4.9.1.1. Alta tasa de transferencia.....	190
4.9.1.2. Infraestructura ampliamente disponible.....	191
4.9.1.3. Integración con arquitectura IP	191
4.9.1.4. Seguridad robusta	191
4.9.1.5. Facilidad de implementación en microcontroladores	192
4.9.2. Desventajas.....	192
4.9.2.1. Alcance limitado.....	192
4.9.2.2. Dependencia de infraestructura del usuario	192
4.9.2.3. Sensibilidad a interferencias	193
4.9.2.4. Consumo energético	193
4.9.2.5. Escalabilidad limitada a nivel masivo	193
4.9.3. Evaluación técnica en el contexto del prototipo desarrollado	193
4.9.4. Conclusión técnica.....	194
4.10. Comparación técnica PLC vs Wi-Fi	194
4.10.1. Fundamento tecnológico	194
4.10.1.1. Power Line Communication (PLC).....	194
4.10.1.2. Wi-Fi (IEEE 802.11)	195
4.10.2. Comparación de parámetros técnicos relevantes	195
4.10.2.1. Medio físico de transmisión.....	195
4.10.2.2. Infraestructura requerida.....	195
4.10.2.3. Alcance y cobertura.....	195
4.10.2.4. Ancho de banda.....	196
4.10.2.5. Interferencias y calidad de señal.....	196
4.10.2.6. Seguridad	196

4.10.2.7. Costo de implementación.....	196
4.10.3. Comparación estructurada.....	196
4.10.4. Análisis para el prototipo desarrollado.....	197
4.11. Diagrama de flujo del programa del microcontrolador ESP32	198
4.11.1. Descripción general del algoritmo	198
4.11.2. Diagrama de flujo del firmware.....	198
4.11.3. Explicación técnica del flujo	199
4.11.3.1. Inicialización	199
4.11.3.2. Gestión de conectividad.....	199
4.11.3.3. Adquisición de señales.....	200
4.11.3.4. Procesamiento digital.....	200
4.11.3.5. Transmisión de datos	200
4.11.3.6. Visualización local	200
4.12. Funcionamiento del sistema prototipo y sus redes de comunicación	201
4.12.1. Enfoque general del sistema.....	201
4.12.2. Descripción funcional de los bloques	201
4.12.2.1. Red eléctrica (Dominio de potencia)	201
4.12.2.2. Módulo de medición eléctrica	202
4.12.2.3. Unidad de procesamiento (ESP32).....	202
4.12.2.4. Red de comunicación Wi-Fi (IEEE 802.11)	202
4.12.2.5. Plataforma de supervisión (Home Assistant).....	203
4.12.3. Diagrama de bloques de la comunicación del sistema prototipo.....	203
4.12.4. Interacción entre los componentes.....	204
4.12.4.1. Flujo de energía	204
4.12.4.2. Flujo de información.....	204
4.12.5. Justificación sistémica.....	205
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	206
5.1. Introducción.....	206
5.2. Resultados de la Variable Independiente: Prototipo de Medidor Inteligente.....	206
5.2.1. Medición de voltaje (V)	206
5.2.2. Medición de corriente (I).....	208
5.2.3. Medición de potencia (kW).....	211
5.2.4. Medición de energía (kWh)	214
5.2.5. Costo total de implementación del medidor inteligente.....	216
5.2.5.1. Descripción de los sistemas comparados.....	217
5.2.5.2. Costos de los componentes del prototipo	217
5.2.5.3. Costos de referencia de Electro Sur Este S.A.A.....	218
5.2.5.4. Análisis comparativo de costos	219
5.2.5.5. Conclusiones del análisis económico	220
5.2.6. Costo total de implementación del concentrador.....	220
5.2.6.1. Descripción del concentrador implementado.....	221
5.2.6.2. Costo de implementación del concentrador.....	221
5.2.6.3. Análisis técnico y económico.....	222
5.2.6.4. Comparación de costos con concentradores AMI comerciales.....	222
5.2.6.5. Conclusiones del análisis económico	223
5.3. Resultados de la Variable Dependiente: Operaciones Técnico-Comerciales	223
5.3.1. Medición y registro del consumo.....	223
5.3.1.1. Datos de medición y registro.....	224
5.3.1.2. Análisis de los resultados.....	225
5.3.1.3. Interpretación técnica.....	225

5.3.1.4. Conclusión parcial	226
5.3.2. Control de pérdidas no técnicas	226
5.3.2.1. Datos del control de pérdidas no técnicas	226
5.3.2.2. Análisis de resultados	228
5.3.2.3. Interpretación técnica.....	228
5.3.2.4. Conclusión parcial	228
5.3.3. Corte y reconexión del servicio en tiempo real	229
5.3.3.1. Instrumento de medición.....	229
5.3.3.2. Datos del control de corte y reconexión	229
5.3.3.3. Análisis de resultados	231
5.3.3.4. Interpretación técnica.....	231
5.3.3.5. Conclusión parcial	232
CONCLUSIONES	233
RECOMENDACIONES	235
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	237
MATRIZ DE CONSISTENCIA	243
MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	244
ANEXOS	246

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 <i>Ubicación geográfica de la ciudad de Cusco</i>	22
Figura 1.2 <i>Ubicación del ámbito geográfico</i>	23
Figura 1.3 <i>Ubicación geográfica de los suministros totales de la ciudad del Cusco</i>	23
Figura 1.4 <i>Suministro elegido para evaluación</i>	24
Figura 1.5 <i>Grado de despliegue de la medición inteligente en el mundo</i>	27
Figura 1.6 <i>Grado de despliegue en los países de América Latina y Europea</i>	27
Figura 1.7 <i>Cantidad de medidores inteligentes instalados en América Latina y Europa</i> ...	28
Figura 1.8 <i>Medidor electrónico con fallas en el display (display dañado)</i>	29
Figura 1.9 <i>Medidor electrónico con fallas en el display (display con ceros)</i>	29
Figura 1.10 <i>Medidor electrónico con fallas en el display (display en blanco)</i>	30
Figura 1.11 <i>Medidor electrónico con fallas en el display (error de display)</i>	31
Figura 1.12 <i>Medidor enrejado</i>	31
Figura 1.13 <i>Medidor inaccesible debido a altura no normalizada</i>	32
Figura 1.14 <i>Medidor interior</i>	33
Figura 1.15 <i>Hurto o robo de energía eléctrica</i>	34
Figura 1.16 <i>Fraude en el medidor</i>	34
Figura 1.17 <i>Conexiones clandestinas</i>	35
Figura 1.18 <i>Corte del servicio eléctrico</i>	36
Figura 1.19 <i>Reconexión del servicio eléctrico</i>	36
Figura 1.20 <i>Concentrador fuera de línea</i>	38
Figura 1.21 <i>Medidor fuera de línea</i>	39
Figura 1.22 <i>Resumen del estado del Sistema AMI</i>	39
Figura 1.23 <i>Representación de un sistema de telemedición avanzada (AMI)</i>	43
Figura 2.1 <i>Evolución de la medición de energía</i>	59
Figura 2.2 <i>Medidor electromecánico</i>	60
Figura 2.3 <i>Esquema funcional de un medidor electromecánico</i>	60
Figura 2.4 <i>Medidor electrónico</i>	63
Figura 2.5 <i>Esquema funcional de un medidor electrónico</i>	64
Figura 2.6 <i>Comunicación bidireccional de AMI</i>	66
Figura 2.7 <i>Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)</i>	68
Figura 2.8 <i>Componentes de la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)</i>	69
Figura 2.9 <i>Flujo de datos</i>	70
Figura 2.10 <i>Redes de comunicación</i>	71
Figura 2.11 <i>Integración a la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)</i>	73
Figura 2.12 <i>Comunicación bidireccional mediante el medidor inteligente</i>	73
Figura 2.13 <i>Medidor inteligente iTechene</i>	74
Figura 2.14 <i>Diagrama de funcionamiento de un medidor inteligente</i>	76
Figura 2.15 <i>Concentrador de Datos - DCU iTechene</i>	77
Figura 2.16 <i>Interfaz Gráfica de MDC</i>	78
Figura 2.17 <i>Arquitectura general de un medidor inteligente</i>	82
Figura 2.18 <i>Etapas de adquisición de señales eléctricas</i>	83
Figura 2.19 <i>Procesamiento digital en medidores inteligentes</i>	84
Figura 2.20 <i>Tecnologías de comunicación empleadas en medidores inteligentes</i>	85
Figura 2.21 <i>Arquitectura IoT aplicada a medidores inteligentes</i>	87
Figura 3.1 <i>Ubicación geográfica de los concentradores de datos DCU</i>	89
Figura 3.2 <i>Diseño del proyecto piloto para la empresa Electro Sur Este S.A.A.</i>	91
Figura 3.3 <i>Concentrador de datos de la empresa Electro Sur Este S.A.A.</i>	95

Figura 3.4 <i>Medidor inteligente monofásico de la empresa Electro Sur Este S.A.A.</i>	96
Figura 3.5 <i>Resumen de flujo de transmisión de datos AMI actual</i>	99
Figura 4.1 <i>Microcontrolador ESP32 DevKit V1</i>	108
Figura 4.2 <i>Precio referencial de ESP32 DevKit V1</i>	110
Figura 4.3 <i>Pantalla OLED 0.96" SSD1306</i>	112
Figura 4.4 <i>Costo referencial de pantalla OLED SSD1306</i>	113
Figura 4.5 <i>LED RGB de ánodo común</i>	115
Figura 4.6 <i>Fuente switching Mean Well 5V</i>	118
Figura 4.7 <i>Precio referencial de Mean Well 5V</i>	120
Figura 4.8 <i>Home Assistant Green</i>	121
Figura 4.9 <i>Costo de Home Assistant Green</i>	123
Figura 4.10 <i>Plataforma Home Assistant</i>	124
Figura 4.11 <i>Mini interruptor Tuya</i>	126
Figura 4.12 <i>Costo del mini interruptor</i>	128
Figura 4.13 <i>Módulo medidor de energía</i>	129
Figura 4.14 <i>Costo del módulo de medidor de energía</i>	134
Figura 4.15 <i>Plataforma de gestión de Smart Life</i>	136
Figura 4.16 <i>Costo de la plataforma de gestión de Smart Life</i>	139
Figura 4.17 <i>Repetidor WiFi</i>	139
Figura 4.18 <i>Costo del repetidor WiFi</i>	140
Figura 4.19 <i>Módem portátil ZTE</i>	141
Figura 4.20 <i>Costo del módem portátil</i>	142
Figura 4.21 <i>Chip de datos móviles</i>	142
Figura 4.22 <i>Costo de chip de datos móviles</i>	143
Figura 4.23 <i>Modelo 3D de la caja para el medidor inteligente</i>	144
Figura 4.24 <i>Impresión 3D de la caja para el medidor inteligente</i>	146
Figura 4.25 <i>Multímetro tipo pinza Sanwa DCL1000</i>	149
Figura 4.26 <i>Esquema de diseño del prototipo de medidor inteligente</i>	152
Figura 4.27 <i>Verificación inicial de los componentes principales</i>	153
Figura 4.28 <i>Pruebas de funcionamiento iniciales</i>	154
Figura 4.29 <i>Ensamblaje y conexión física del prototipo</i>	154
Figura 4.30 <i>Emparejamiento inicial en Smart Life</i>	155
Figura 4.31 <i>Instalación y configuración en Home Assistant</i>	156
Figura 4.32 <i>Diagrama de flujo del procedimiento de configuración e implementación</i>	158
Figura 4.33 <i>Programación del microcontrolador ESP32 en ESPHome</i>	161
Figura 4.34 <i>LED pulsador, pantalla OLED y LED RGB de calidad</i>	162
Figura 4.35 <i>Conexión final del medidor inteligente</i>	168
Figura 4.36 <i>Proceso de montaje del módulo experimental</i>	169
Figura 4.37 <i>Esquema de conexión eléctrica del módulo experimental</i>	172
Figura 4.38 <i>Módulo experimental concluido</i>	173
Figura 4.39 <i>Diagrama de flujo del procedimiento de conexión</i>	175
Figura 4.40 <i>Diagrama de flujo de la conexión eléctrica</i>	176
Figura 4.41 <i>Diagrama de flujo del firmware del ESP32</i>	195
Figura 4.42 <i>Diagrama de bloques de la comunicación del sistema prototipo</i>	200

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 <i>Coordenadas de la ubicación geográfica</i>	22
Tabla 1.2 <i>Matriz de Consistencia</i>	52
Tabla 2.1 <i>Limitaciones técnicas del medidor electromecánico en comparación con sistemas inteligentes</i>	62
Tabla 2.2 <i>Limitaciones técnicas del medidor electrónico en comparación con sistemas inteligentes</i>	66
Tabla 3.1 <i>Coordenadas de ubicación de las SED's</i>	89
Tabla 3.2 <i>Plan de la implementación del proyecto piloto del AMI existente</i>	93
Tabla 3.3 <i>Costos unitarios de los equipos principales del Sistema AMI piloto</i>	103
Tabla 3.4 <i>Evaluación económica global del sistema piloto</i>	105
Tabla 4.1 <i>Características técnicas del microcontrolador ESP32</i>	109
Tabla 4.2 <i>Características técnicas de la pantalla OLED SSD1306</i>	112
Tabla 4.3 <i>Características del LED RGB y LED de pulsos</i>	115
Tabla 4.4 <i>Especificaciones técnicas de la fuente Mean Well 5V</i>	119
Tabla 4.5 <i>Características técnicas del hardware</i>	118
Tabla 4.6 <i>Características técnicas del interruptor</i>	127
Tabla 4.7 <i>Características técnicas del módulo medidor de energía</i>	130
Tabla 4.8 <i>Comparación técnica entre interruptor y medidor de energía</i>	133
Tabla 4.9 <i>Valores del circuito del módulo medidor de energía eléctrica</i>	137
Tabla 4.10 <i>Requerimientos mínimos de la laptop</i>	149
Tabla 4.11 <i>Características técnicas del multímetro Sanwa DCL1000</i>	150
Tabla 4.12 <i>Características de las lámparas utilizadas en el circuito de iluminación</i>	171
Tabla 4.13 <i>Componentes empleados en la construcción del módulo experimental</i>	173
Tabla 4.14 <i>Comparación técnica entre bus físico y Wi-Fi</i>	187
Tabla 4.15 <i>Componentes empleados en la construcción del módulo experimental</i>	195
Tabla 5.1 <i>Resultados de la medición del voltaje</i>	206
Tabla 5.2 <i>Resultados de la medición de la corriente</i>	209
Tabla 5.3 <i>Resultados de la medición de la potencia eléctrica</i>	211
Tabla 5.4 <i>Resultados de la medición de la energía eléctrica</i>	215
Tabla 5.5 <i>Costo de componentes del medidor inteligente</i>	217
Tabla 5.6 <i>Comparativo de costos de medidores empleados por Electro Sur Este S.A.A.</i> ...	218
Tabla 5.7 <i>Costo total del concentrador del sistema de medición inteligente</i>	221
Tabla 5.8 <i>Comparativo de costos de concentradores AMI</i>	222
Tabla 5.9 <i>Resultados del registro automático de consumo eléctrico</i>	224
Tabla 5.10 <i>Resultados de pérdidas no técnicas</i>	227
Tabla 5.11 <i>Resultados de control de corte y reconexión remota</i>	229

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

A:	Amperio (unidad de medida de corriente eléctrica)
AC:	Alternating Current (Corriente alterna)
ADC:	Analog-to-Digital Converter
AMI:	Infraestructura de Medición Avanzada
API:	Application Programming Interface
ARDUINO:	Plataforma de hardware y software de código abierto
BT5B:	Tarifa eléctrica en baja tensión 5B
CA:	Corriente Alterna
CC:	Corriente Continua
CT:	Transformador de corriente (Current Transformer)
DC:	Direct Current (Corriente continua)
DCU:	Data Concentrator Unit (Unidad Concentradora de Datos)
ESP32:	Microcontrolador con conectividad WiFi
GPIO:	General Purpose Input/Output
HAG:	Home Assistant Green
Hz:	Hertz (unidad de frecuencia eléctrica)
I2C:	Inter-Integrated Circuit (bus de comunicación serial)
INA:	Lectura inaccesible (referencia a lecturas no realizadas)
IoT:	Internet of Things (Internet de las Cosas)
IMP/kWh:	Impulsos por kilovatio-hora
kWh:	Kilovatio hora (unidad de medida de energía eléctrica)
LAN:	Local Area Network
LED:	Diodo Emisor de Luz
LED RGB:	Diodo Emisor de Luz de tres colores (rojo, verde y azul)
MCU:	Microcontroller Unit (Unidad microcontroladora)
MQTT:	Message Queuing Telemetry Transport
NTCSE:	Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos
OLED:	Organic Light Emitting Diode
OSINERGMIN:	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería
OTA:	Over-The-Air (actualización remota)
PCB:	Printed Circuit Board (placa de circuito impreso)
PF:	Power Factor (factor de potencia)
PWM:	Pulse Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulso)
RMS:	Valor cuadrático medio
SED:	Subestación Eléctrica de Distribución
SIELSE:	Sistema Informático de Electro Sur Este
SMI:	Sistema de Medición Inteligente
SSID:	Service Set Identifier (nombre de red WiFi)
TC:	Transformador de Corriente
Tuya IoT:	Tuya Internet of Things Platform
UNSAAC:	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
V:	Voltio o Volt (unidad de medida de tensión eléctrica)
VA:	Volt-Ampere (potencia aparente)
W:	Watt o Vatio (unidad de medida de potencia eléctrica)
WAN:	Wide Area Network
Wi-Fi:	Wireless Fidelity
YAML:	Lenguaje de configuración para ESPHome

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1. Introducción

El Capítulo I presenta el contexto general y la problemática que motiva la investigación sobre el diseño e implementación de un prototipo de medidor inteligente para mejorar las operaciones técnico-comerciales en la ciudad del Cusco, donde se han visto serias deficiencias técnico-operativas como las malas facturaciones por motivos de inaccesibilidad al medidor, o por las demoras en los servicios de corte y reconexión del servicio, también por los hurtos de energía eléctrica no detectados, incluso también por el costo de un sistema inteligente piloto y la diferencia con el costo de un prototipo de medidor inteligente desarrollado en la presente tesis. En un escenario global donde los sistemas eléctricos avanzan hacia la digitalización mediante la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), el Perú se encuentra aún en etapas iniciales de adopción tecnológica, con experiencias limitadas a zonas urbanas o proyectos piloto (Osinergmin, 2024). Esta situación genera una brecha tecnológica significativa frente a otros países de la región y limita la eficiencia operativa de las empresas distribuidoras. En la región del Cusco, Electro Sur Este S.A.A. enfrenta desafíos recurrentes como errores en la lectura manual de medidores, demoras en cortes y reconexiones, y pérdidas no técnicas, que afectan tanto a la empresa como a los usuarios residenciales BT5B. En este contexto, la investigación propone el diseño e implementación de un medidor inteligente concebido como una alternativa de bajo costo y adaptable a las condiciones locales. Este capítulo expone la ubicación geográfica del estudio, la formulación del problema, los objetivos, la justificación, las hipótesis y el marco metodológico inicial, brindando una visión integral del propósito del proyecto: demostrar cómo la automatización y la telemedición pueden optimizar los procesos de facturación, control de pérdidas y gestión operativa en el sistema eléctrico cusqueño.

1.2. Contextualización del tema

En la región del Cusco, la lectura y control del consumo eléctrico de los usuarios del servicio eléctrico aún se realiza de forma manual, generando errores y retrasos en la facturación. Ante ello, se plantea el desarrollo de un prototipo de medidor inteligente adaptado a las condiciones técnicas y económicas locales, capaz de integrarse a sistemas de monitoreo en tiempo real mediante conexión WiFi. Este proyecto se enmarca en la línea de automatización y control eléctrico, promoviendo la eficiencia energética y la digitalización del sector en beneficio de las operaciones de empresas distribuidoras como Electro Sur Este S.A.A. (Osinergmin, 2024).

1.3. Ubicación geográfica

La investigación se desarrolla en la Ciudad del Cusco, capital del departamento homónimo, ubicada a 3,384 m.s.n.m., donde se encuentran los usuarios regulados de baja tensión del sistema de distribución de Electro Sur Este S.A.A. en quienes está enfocado el diseño e implementación del prototipo, representativos de la realidad eléctrica regional, donde la incorporación de medición inteligente permite mejorar la gestión técnica y comercial del servicio como se ve en la Tabla 1.1

Tabla 1.1
Coordenadas de la ubicación geográfica

Características	Departamento	Provincia	Distrito	Altitud promedio (msnm)
Ubicación geográfica	Cusco	Cusco	Cusco	3384
Coordenadas geográficas				
Latitud Sur -	13° 32' 20.74" S			
Longitud Oeste	71° 58' 57.47" O WGS-84 (Zona: 18 Sur)			

Nota. Google Earth, 2025.

Las coordenadas geográficas anteriores muestran la ubicación geográfica de la ciudad del Cusco y se expresan en longitud y latitud.

Figura 1.1
Ubicación geográfica de la ciudad de Cusco



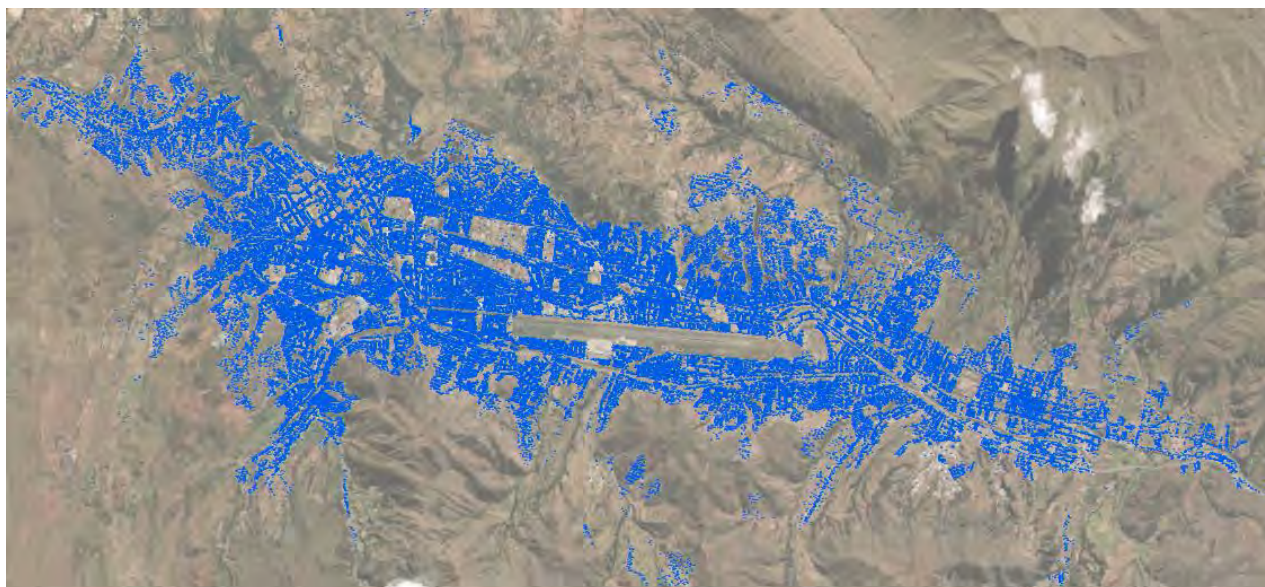
Nota. Google, Asociación de Agencias de Turismo del Cusco, 2023.

La imagen anterior representa la ubicación de la ciudad del Cusco.

Figura 1.2*Ubicación del ámbito geográfico*

Nota. Family search, 2025.

La imagen anterior representa los distritos que abarca la ciudad del Cusco.

Figura 1.3*Ubicación geográfica de los suministros totales de la ciudad del Cusco*

Nota. GIS - Electro Sur Este S.A.A., 2025.

La imagen anterior representa la ubicación geográfica de los suministros totales de la ciudad del Cusco.

Para la presente tesis se seleccionó un suministro que no cuenta con medición inteligente,

siguiendo un criterio de muestreo no probabilístico intencional, priorizando aquel suministro que tenga dificultades para realizar las operaciones técnico-comerciales, es decir toma de lectura de energía y corte y reposición del servicio, así como la facilidad de acceder para realizar las evaluaciones correspondientes. El suministro elegido corresponde al cliente con código de suministro 10010300260 como se ve en la Figura 1.4. Esta elección permite estudiar de forma real el impacto del diseño e implementación de un medidor inteligente en la optimización de las operaciones técnico comerciales.

Figura 1.4

Suministro elegido para evaluación

Código :	10010300260	Estado :	NORMAL	Sucursal :	Cusco	Tipo Suministro :	Comercial	
Ruta :	001-17-32-006110	Situación :	B:BUENA	Zona :	ZONA 3B	Periodo Act. :	202507	
NTCSE :	0010300260	Clase :	NORMAL	Teléfono :		Celular :	993489737	
Tarifa :	BT5	☒ Residencial	Tipo Corte :	SIN CORTE	RUC :	-	DNI :	23930242
Nombre :	TTITO ÑAUPA, ALEJANDRO			Dirección Eléctrica :		DO08115801	Usuarios Colectivos :	
Dirección Predio :	P.J.MANCO CCAPAC C-1-10			NO SE HA REGISTRADO INTERRUPCIONES EN EL SERVICIO. EL SUMINISTRO CUENTA CON SERVICIO NORMAL				
Dirección Entrega :	P.J.MANCO CCAPAC C-1-10							
Departamento :	CUSCO/CUSCO/SANTIAGO							

Periodos Consulta :

60

Ventana aparte

Reporte

Nuevo registro

Editar registro

Ajustar Lectura

Desviación de Consumo

Periodo	Nro. Lectura	Tipo	Observación	Fecha	Medidor	Estado	L_EA	L_CEA
202507	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	16/07/2025 12:02	2014001000000008268	Normal	15,273.00	83.00
202506	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	16/06/2025 10:56	2014001000000008268	Normal	15,190.00	99.00
202505	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	16/05/2025 10:55	2014001000000008268	Normal	15,091.00	103.00
202504	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	14/04/2025 11:38	2014001000000008268	Normal	14,988.00	217.00
202503	1	INACCESIBLE	INTERIOR SIN LECTURA	17/03/2025 11:26	2014001000000008268	Normal	14,771.00	100.00
202502	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	14/02/2025 14:54	2014001000000008268	Normal	14,771.00	120.00
202501	1	VERIFICADO SUPERVISOR	LECTURA VERIFICADA SUPERVISOR	14/01/2025 20:36	2014001000000008268	Normal	14,651.00	301.00
202412	1	INACCESIBLE	INTERIOR SIN LECTURA	15/12/2024 15:38	2014001000000008268	Normal	14,350.00	99.00
202411	1	INACCESIBLE	INTERIOR SIN LECTURA	15/11/2024 20:06	2014001000000008268	Normal	14,350.00	99.00
202410	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	16/10/2024 19:32	2014001000000008268	Normal	14,350.00	88.00
202409	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	16/09/2024 21:42	2014001000000008268	Normal	14,262.00	189.00
202408	1	INACCESIBLE	INTERIOR SIN LECTURA	16/08/2024 20:40	2014001000000008268	Normal	14,073.00	107.00
202407	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	16/07/2024 19:12	2014001000000008268	Normal	14,073.00	190.00
202406	1	INACCESIBLE	INTERIOR SIN LECTURA	15/06/2024 18:59	2014001000000008268	Normal	13,883.00	112.00
202405	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	16/05/2024 19:10	2014001000000008268	Normal	13,883.00	227.00
202404	1	INACCESIBLE	IMPEDIMENTO SIN LECTURA	16/04/2024 18:52	2014001000000008268	Normal	13,656.00	104.00
202403	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	16/03/2024 18:15	2014001000000008268	Normal	13,656.00	222.00
202402	1	INACCESIBLE	INTERIOR SIN LECTURA	16/02/2024 19:02	2014001000000008268	Normal	13,434.00	100.00
202401	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	16/01/2024 19:48	2014001000000008268	Normal	13,434.00	109.00
202312	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	15/12/2023 18:50	2014001000000008268	Normal	13,325.00	113.00
202311	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	15/11/2023 18:55	2014001000000008268	Normal	13,212.00	180.00
202310	1	INACCESIBLE	INTERIOR SIN LECTURA	16/10/2023 18:42	2014001000000008268	Normal	13,032.00	101.00
202309	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	15/09/2023 19:08	2014001000000008268	Normal	13,032.00	99.00
202308	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	15/08/2023 18:32	2014001000000008268	Normal	12,933.00	98.00
202307	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	15/07/2023 19:19	2014001000000008268	Normal	12,835.00	102.00
202306	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	15/06/2023 19:20	2014001000000008268	Normal	12,733.00	95.00
202305	1	LECTURA CORRECTA	NINGUNA OBSERVACION	16/05/2023 19:22	2014001000000008268	Normal	12,638.00	211.00
202304	1	INACCESIBLE	INTERIOR SIN LECTURA	15/04/2023 19:21	2014001000000008268	Normal	12,427.00	125.00

Nota. SIELSE - Electro Sur Este S.A.A., 2025.

La imagen anterior muestra inaccesibilidad en la toma de lecturas por parte de la empresa concesionaria al usuario.

1.4. El problema

1.4.1. Planteamiento del problema

A nivel mundial, en los últimos años, las empresas distribuidoras de energía eléctrica han iniciado un proceso de modernización de sus sistemas de medición mediante la implementación de medidores inteligentes, también conocidos como sistemas de medición avanzada (AMI, por sus siglas en inglés). Esta tecnología no solo mejora la recolección de datos de consumo en tiempo real, sino que también optimiza procesos como la facturación, cortes y reposiciones del servicio eléctrico, la detección de pérdidas, la atención al cliente y la planificación operativa (Alonso et al., 2021).

Uno de los principales problemas que enfrentan las empresas distribuidoras de energía eléctrica es la limitada eficiencia de las operaciones técnico-comerciales realizadas mediante sistemas convencionales. En estos sistemas, las actividades de lectura de medidores, detección de pérdidas no técnicas y cortes y reconexiones del servicio requieren la movilización constante de personal técnico hacia los domicilios de los usuarios, generando elevados costos operativos, mayores tiempos de atención y riesgos asociados a errores humanos. Diversos estudios indican que los sistemas AMI permiten realizar lecturas remotas, detección de manipulaciones o fraudes eléctricos y cortes y reconexiones instantáneas, monitoreo en tiempo real, reduciendo significativamente los recursos destinados a estas actividades operativas (Idrovo & Coronel, 2012; GIZ-MINEM, 2020).

A nivel nacional, en el Perú, la modernización de los sistemas de medición aún se encuentra en una etapa inicial y los impactos reales de los medidores inteligentes sobre la eficiencia operativa de las empresas distribuidoras continúan siendo materia de estudio. Según los lineamientos desarrollados por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y la Cooperación Alemana GIZ, las empresas distribuidoras presentan gastos importantes asociados a la lectura anual de medidores, atención comercial, inspecciones técnicas, revisiones de equipos de medida y gestión de pérdidas de energía, factores que influyen directamente en los costos de operación del sistema eléctrico.

Respecto a las pérdidas no técnicas, estas constituyen uno de los principales problemas económico-operativos de las empresas distribuidoras, debido a que corresponden a energía suministrada pero no facturada, generalmente ocasionada por conexiones clandestinas, manipulación de medidores, errores de medición o fraude eléctrico. OSINERGMIN considera para las empresas modelo un valor referencial de pérdidas no técnicas de aproximadamente 2,56 %.

Para reducir dichas pérdidas se requieren actividades permanentes de inspección, contrastación de medidores y fiscalización técnica, lo que incrementa los costos operativos de las empresas distribuidoras (Osinergmin, 2019).

Asimismo, los procesos convencionales de suspensión y reposición del servicio eléctrico por morosidad implican la generación de órdenes de trabajo, desplazamiento de cuadrillas, uso de vehículos, materiales y registro manual de las actividades ejecutadas. Estas operaciones pueden demandar varias horas o incluso días hasta su culminación efectiva. Por el contrario, los sistemas de medición inteligente permiten ejecutar cortes y reconexiones de manera remota e inmediata desde los centros de control, reduciendo considerablemente los tiempos de respuesta, costos operativos y molestias para los usuarios (Idrovo & Coronel, 2012).

A nivel local, existe un proyecto piloto de medición inteligente implementado por la empresa Electro Sur Este S.A.A. para usuarios residenciales con tarifa BT5B de la ciudad del Cusco. Sin embargo, se han identificado deficiencias relacionadas con la comunicación entre medidores inteligentes y concentradores de datos, ocasionadas por desconfiguraciones de equipos, interrupciones del suministro eléctrico, saturación de la red de comunicaciones o problemas de interoperabilidad. Estas limitaciones afectan la continuidad de la telemedición y reducen temporalmente los beneficios esperados de la infraestructura AMI.

Adicionalmente, existe un escaso número de investigaciones que analicen de manera específica la influencia de los sistemas de telemedición AMI sobre la optimización de las operaciones técnico-comerciales en empresas distribuidoras peruanas, particularmente en aspectos relacionados con la reducción de costos operativos, disminución de pérdidas no técnicas, automatización de lecturas, cortes y reconexiones remotas. Esta situación dificulta la toma de decisiones basadas en evidencia para futuras inversiones en tecnologías de medición inteligente.

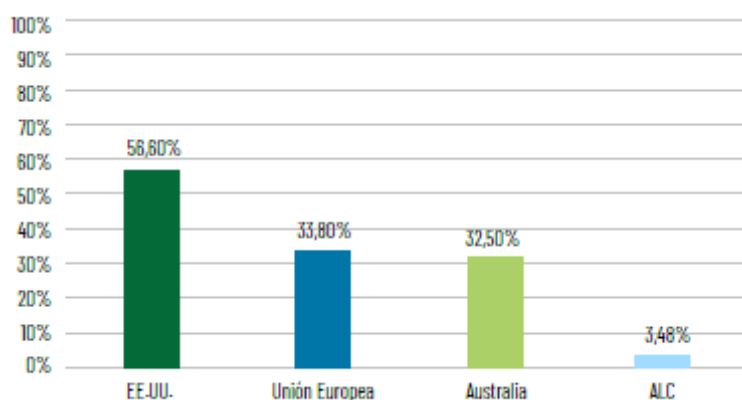
Por lo tanto, se hace necesario desarrollar una investigación que permita analizar de manera objetiva y sistemática la influencia del sistema de telemedición AMI en las operaciones técnico-comerciales de los usuarios BT5B residenciales de la ciudad del Cusco, con el propósito de generar evidencia técnica que contribuya a la mejora continua de los procesos operativos, comerciales y de gestión energética de las empresas distribuidoras, en beneficio tanto de la empresa concesionaria como de los usuarios del servicio eléctrico.

1.4.2. Análisis situacional del problema

A continuación, se muestra el estado actual de implementación del sistema inteligente remoto de medición de nuestra región respecto al resto del mundo, como se ve en la Figura 1.5.

Figura 1.5

Grado de despliegue de la medición inteligente en el mundo

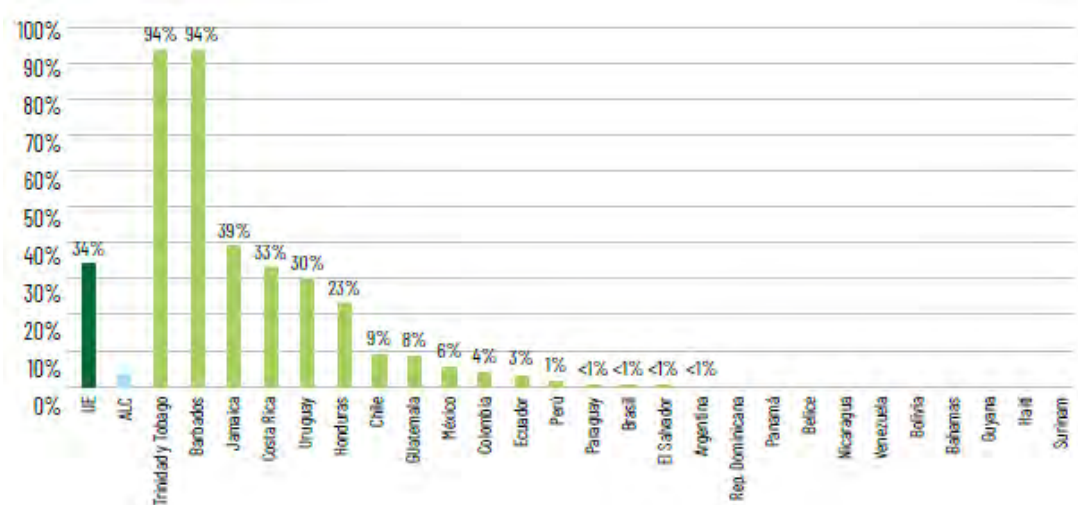


Nota. La medición inteligente en América Latina y el Caribe, 2023.

En la figura anterior se ve que existe una gran brecha entre la implementación de la medición inteligente de otras regiones comparadas con la nuestra (América Latina), mientras que en EE.UU., Europa y Australia se superó el 30% de despliegue de la medición inteligente en el 2023, en nuestra región tan solo se ha alcanzado poco más del 3% de despliegue.

Figura 1.6

Grado de despliegue en los países de América Latina y Europea



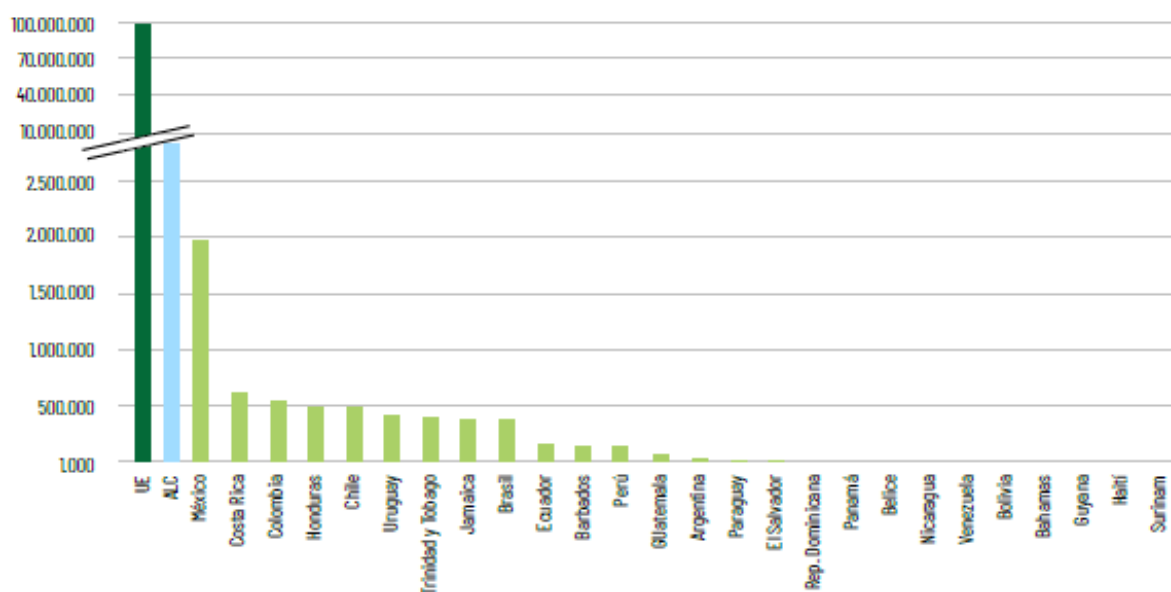
Nota. La medición inteligente en América Latina y el Caribe, 2023.

De la figura se ve que los países con mayor implementación de la medición inteligente son Trinidad y Tobago con Barbados, ambos con 94%, esto se debe a una estrategia de inversión realizada por las empresas concesionarias de la distribución de energía eléctrica con el objetivo de mejorar la calidad en el suministro de la energía eléctrica. Otros países de América Latina como Uruguay, Costa Rica y hasta Jamaica tienen más del 30% de despliegue, el cual se considera como relevante comparado con otros países de la región.

En Perú por otro lado, el nivel de desarrollo de las tecnologías de medición inteligente es muy pobre, se ve que no se establecen estrategias nacionales con objetivos específicos para lograr un nivel de penetración mucho más alto, con tan solo el 1% de despliegue total del sistema de telemedición AMI en el país, se denota una muy grave carencia en capacidad de implementación de esta necesaria tecnología.

Figura 1.7

Cantidad de medidores inteligentes instalados en América Latina y Europa



Nota. La medición inteligente en América Latina y el Caribe, 2023.

En la Figura 1.7 anterior, nuevamente se observa que países vecinos superan ampliamente a Perú, siendo México el país latino con más medidores inteligentes (casi 1 millón de unidades), seguido de Costa Rica, Colombia, Honduras, etc.

Por lo tanto es necesario el despliegue de esta tecnología que tiene tantas fortalezas en el avance a la modernización, digitalización e implementación del sistema eléctrico de distribución,

así mismo en este entender hay un concepto muy importante, la autogestión energética, la cual hace referencia a la capacidad de los usuarios para monitorizar, controlar y optimizar su consumo energético mediante herramientas tecnológicas, con el fin de reducir costos, mejorar la eficiencia y contribuir a la sostenibilidad (González, 2018).

1.4.3. Deficiencias en las operaciones técnico-comerciales

En la empresa de distribución eléctrica Electro Sur Este S.A.A. a lo largo de los años ha tenido problemas en las operaciones técnico comerciales como las facturaciones deficientes (producidas por malas condiciones en las tomas de lecturas), las demoras en los cortes y reconexiones del suministro eléctrico, las pérdidas no técnicas, etc.

1.4.3.1. Deficiencias en la toma de lectura

A continuación, se detalla esta deficiencia que tiene que ver dentro de la facturación debido a que se toman mal las lecturas de energía consumida por los usuarios de la empresa, debido a muchas causas como fallas en el display del medidor electrónico, condiciones del medidor, ubicación del medidor, etc., como se ve en las Figuras 1.8, 1.9, 1.10, 1.11, 1.12, 1.13 y 1.14.

Figura 1.8

Medidor electrónico con fallas en el display (display dañado)



Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2024.

Figura 1.9

Medidor electrónico con fallas en el display (display con ceros)



Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2024.

Figura 1.10

Medidor electrónico con fallas en el display (display en blanco)



Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2024.

Figura 1.11

Medidor electrónico con fallas en el display (error de display)



Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2024.

Figura 1.12

Medidor enrejado



Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2025.

Figura 1.13

Medidor inaccesible debido a altura no normalizada



Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2025.

La fotografía anterior muestra un medidor que tiene impedimentos en la accesibilidad, pues se encuentra a una altura mayor a la normalizada, lo cual impide al personal técnico tomar una lectura correcta de la energía consumida por el usuario.

Es así que el mayor problema en la toma de lectura de los medidores convencionales es la ubicación de este, pues en muchos casos, sobre todo al interior de los domicilios de casonas antiguas del centro histórico de la ciudad del Cusco los medidores son interiores, lo cual no permite al personal el acceso para tomar la lectura, esta fue una de las principales motivaciones para la empresa Electro Sur Este S.A.A. de implementar el sistema de telemedición AMI piloto con medidores inteligentes que operan de manera remota, pero estos a su vez presentan dificultades en su operación.

En la siguiente imagen se aprecia un ejemplo de un medidor con una ubicación inaccesible, es decir, se encuentra dentro de la propiedad del usuario y está enrejado o cercado, esto trae muchos problemas al personal técnico que hace la toma de lecturas para la facturación, entendiéndose que los usuarios están intentando cuidar su propiedad de personas ajenas, no toman conciencia que eso también les puede traer problemas o inconformidades con las lecturas.

Figura 1.14*Medidor interior*

Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2025.

1.4.3.2. Deficiencias en el control de pérdidas no técnicas

Este proceso técnico-comercial es muy delicado, las pérdidas no técnicas de energía eléctrica son las que no son causadas por el flujo físico de la electricidad, sino por causas externas a este, como hurtos o robos, fraudes, conexiones clandestinas, errores en la medición o en la facturación (Martínez & Álvarez, 2019), y esto se traduce en pérdidas económicas para la empresa y los usuarios formales, estos últimos terminan asumiendo parte del costo de las pérdidas no técnicas, ya que las distribuidoras trasladan estos costos al precio final de la tarifa eléctrica para compensar el desequilibrio económico (Zapata & Ríos, 2020).

A continuación, en las siguientes Figuras 1.15, 1.16 y 1.17 se observan bajo qué condiciones se dan estas pérdidas no técnicas en los procesos técnicos-comerciales de la empresa Electro Sur Este S.A.A., ya sea por hurto, manipulación o conexiones clandestinas en caso de malos usuarios que provocan un perjuicio a la empresa y pueden también incurrir en un perjuicio a los demás usuarios del servicio cuando se manipulan las redes pudiendo provocar descargas eléctricas que priven del servicio a otros usuarios ajenos a estos malos actos.

Figura 1.15*Hurto o robo de energía eléctrica*

Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2025.

Figura 1.16*Fraude en el medidor*

Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2024.

Figura 1.17*Conexiones clandestinas*

Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2025.

1.4.3.3. Gestión de cortes y reconexiones

La gestión de cortes y reconexiones como operación técnico-comercial comprende el conjunto de procedimientos técnicos y administrativos que permiten a la empresa distribuidora suspender o restablecer el suministro eléctrico, generalmente en respuesta a condiciones contractuales, fallas técnicas o situaciones de riesgo para el sistema o el usuario (Morales & Pacheco, 2020).

La correcta gestión de cortes y reconexiones requiere la verificación previa de las condiciones técnicas y administrativas del suministro, así como el registro y control de cada intervención realizada en el sistema de medición o en la acometida del usuario. Este proceso debería ser más ágil o rápido, pero como estos trabajos se realizan manualmente se presentan inconvenientes para el personal de campo, como condiciones atmosféricas adversas, obstáculos en el camino, movilizaciones sociales y muchas otras más, y aún con sistemas inteligentes como el piloto de Electro Sur Este S.A.A. los cortes y reconexiones se siguen haciendo manualmente, como se ve en las Figuras 1.18 y 1.19.

Figura 1.18

Corte del servicio eléctrico



Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2025.

Figura 1.19

Reconexión del servicio eléctrico



Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2025.

1.4.3.4. Resumen del estado de las operaciones técnico-comerciales

En resumen para la empresa Electro Sur Este S.A.A., los principales problemas en la ejecución de las operaciones técnico-comerciales se dan primeramente en la facturación eléctrica cuando existe inaccesibilidad a los medidores lo cual limita la recolección de lecturas reales, obligando a usar promedios que no reflejan el consumo exacto y esto genera desconfianza e inseguridad en los usuarios; otro factor se da en los hurtos y robos de energía eléctrica, generando pérdidas no técnicas a la empresa que además puede conllevar al perjuicio de usuarios ajenos a estas condiciones de fraude generados por malos usuarios; también se da en los procesos de cortes y reconexiones cuando el tiempo de atención excede los plazos establecidos y provoca un malestar en los usuarios que posteriormente conlleva a reclamos o denuncias ante los entes fiscalizadores como OSINERGMIIN.

1.4.4. Deficiencias en la operación del Sistema AMI piloto

El sistema piloto de medición avanzada (AMI) piloto implementado en la empresa distribuidora Electro Sur Este S.A.A. presenta diversas dificultades operativas relacionadas principalmente con la comunicación y la estabilidad de la red. Entre los problemas más frecuentes se encuentran las caídas de conexión de los concentradores que operan mediante redes móviles 4G, lo que interrumpe la transmisión continua de datos. Asimismo, algunos concentradores experimentan saturación debido al alto volumen de información gestionada, provocando pérdida de configuración y fallas en la sincronización con los medidores. A ello se suman las interrupciones en la comunicación PLC (Power Line Communication), las cuales afectan la conectividad entre los medidores y el concentrador, generando vacíos de información y errores en la lectura remota, por ejemplo. Estas limitaciones impactan en la confiabilidad del sistema, dificultando el monitoreo en tiempo real y la eficiencia de las operaciones técnico-comerciales (Sánchez et al., 2023).

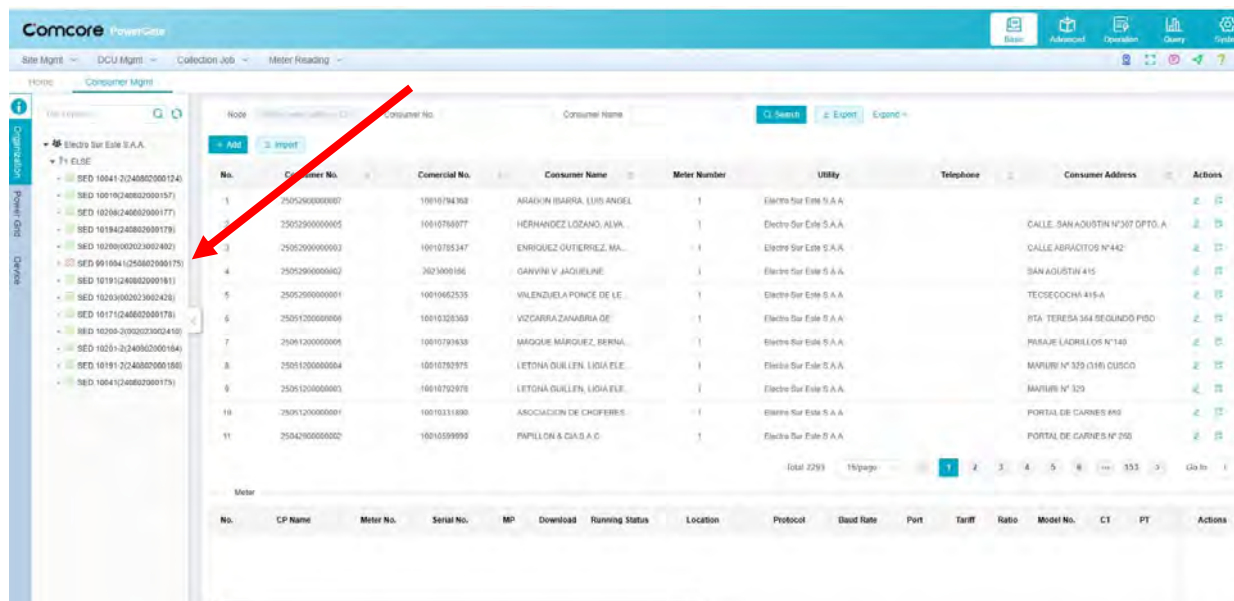
1.4.4.1. Pérdida de conectividad del concentrador

La desconexión de los concentradores en un sistema AMI piloto constituye uno de los principales problemas operativos, ya que interrumpe la cadena de comunicación entre los medidores inteligentes y el servidor central. Estos equipos, que en muchos casos utilizan redes móviles 4G para transmitir datos, como ocurre en el sistema piloto de Electro Sur Este, pueden perder conectividad debido a la baja cobertura o a la inestabilidad del servicio del operador. Cuando esto sucede, el concentrador deja de recibir y enviar información, provocando la pérdida

temporal de lecturas, fallos en la facturación y retrasos en la detección de anomalías. En algunos casos, la saturación de la red o la sobrecarga de datos ocasiona que el concentrador se reinicie o pierda su configuración original, afectando la gestión y el monitoreo del sistema en tiempo real (Sánchez et al., 2023), tal como se ve en la Figura 1.20.

Figura 1.20

Concentrador fuera de línea



The screenshot shows the Comcore PowerGate interface. On the left, a sidebar lists various components, including 'Power Grid' and 'Devices'. The main area displays a table of meters. A red arrow points to the meter with ID SED 9910041, which is marked as offline. The table includes columns for No., Consumer No., Comercial No., Consumer Name, Meter Number, UBBY, Telephone, Consumer Address, and Actions.

No.	Consumer No.	Comercial No.	Consumer Name	Meter Number	UBBY	Telephone	Consumer Address	Actions
1	25052900000007	10010794302	AGUIRRE IBARRA, LUIS ANGEL	1	Electro Sur Este S.A.A.			
2	25052900000005	10010794307	HERNANDEZ LOZANO, ALVA	1	Electro Sur Este S.A.A.		CALLE SAN AGUSTIN N°307 OPTO. A	
3	25052900000003	10010795347	ENRIQUEZ OUTIERREZ, MA.	1	Electro Sur Este S.A.A.		CALLE ABRACOTOS N°402	
4	25052900000002	2623000106	GARCINI V. JACQUELINE	1	Electro Sur Este S.A.A.		SAN AGUSTIN 415	
5	25052900000001	10010662535	VILENZUELA PONCE DE LE.	1	Electro Sur Este S.A.A.		TECSECOCHA 415-A	
6	25051200000000	10010320363	VIZCARRA ZANABRIA DE	1	Electro Sur Este S.A.A.		ITA TERESA 364 DE QUINDI PISO	
7	25051200000000	10010793438	MAGUIRE MARQUEZ, BERTHA	1	Electro Sur Este S.A.A.		PARAJE LADRILOS N°140	
8	25051200000004	10010793975	LETONA DULLEN, LIDIA ELE.	1	Electro Sur Este S.A.A.		MANURE N° 325 (316) CUSCO	
9	25051200000003	10010792976	LETONA DULLEN, LIDIA ELE.	1	Electro Sur Este S.A.A.		MANURE N° 325	
10	25051200000001	10010311800	ASOCIACION DE CHOFERRS	1	Electro Sur Este S.A.A.		PORTAL DE CARNES 895	
11	25042900000002	10010599992	PAPILLON & CIA S.A.C.	1	Electro Sur Este S.A.A.		PORTAL DE CARNES N°200	

Nota. Comcore Power Gate, Electro Sur Este S.A.A., 2025.

En la imagen anterior se observa al lado izquierdo un icono rojo que señala la desconexión del concentrador SED 9910041.

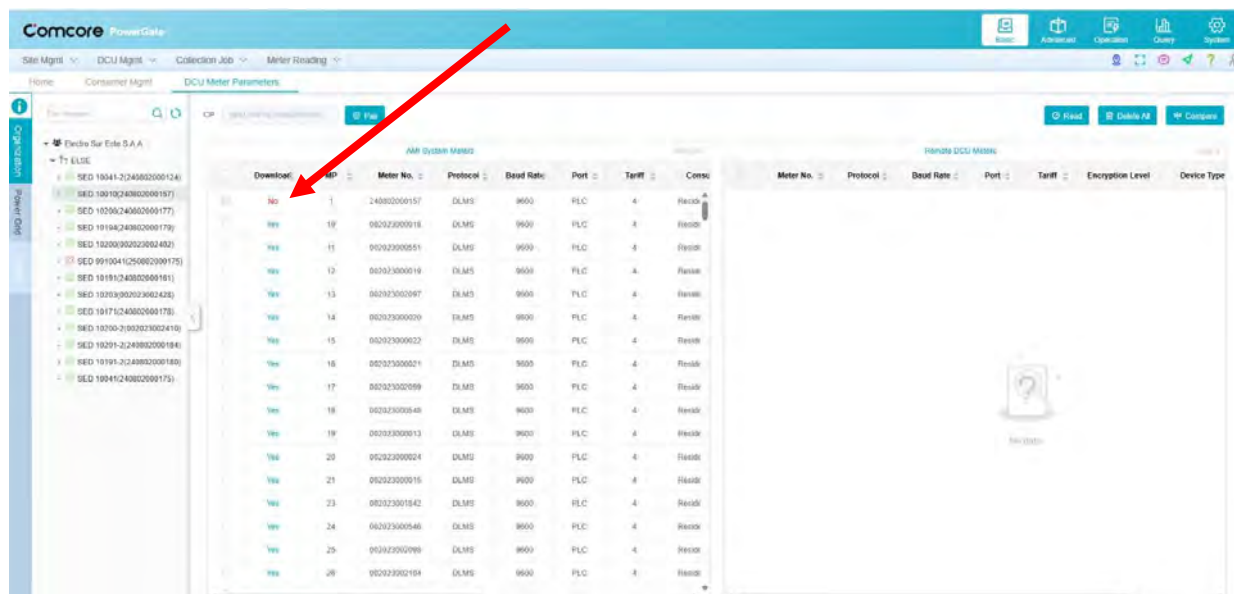
1.4.4.2. Pérdida de conectividad del medidor inteligente

La pérdida de conexión de un medidor inteligente dentro del sistema AMI piloto se debe principalmente a fallos en la comunicación con el concentrador, especialmente cuando esta se realiza mediante tecnología PLC (Power Line Communication). Factores como el ruido eléctrico, las interferencias en la red de baja tensión, las caídas de voltaje o las distancias excesivas entre medidores y concentradores pueden degradar la calidad de la señal, impidiendo la transmisión continua de datos. Cuando un medidor pierde comunicación, deja de enviar lecturas y eventos al sistema central, lo que genera vacíos de información, errores en la facturación y limita la capacidad de detección de pérdidas o manipulaciones. Estos inconvenientes reducen la eficiencia y confiabilidad del sistema AMI, afectando las operaciones técnico-comerciales de la empresa

distribuidora, tal como se ve en la Figura 1.21.

Figura 1.21

Medidor fuera de línea



Download	Meter No.	Protocol	Base Rate	Port	Tariff	Consum
No	1	24802000157	DLMS	9600	PLC	4
Yes	19	0620200018	DLMS	9600	PLC	4
Yes	11	01002000551	DLMS	9600	PLC	4
Yes	12	0620200019	DLMS	9600	PLC	4
Yes	13	0620200097	DLMS	9600	PLC	4
Yes	14	06202000029	DLMS	9600	PLC	4
Yes	15	06202000022	DLMS	9600	PLC	4
Yes	16	06202000021	DLMS	9600	PLC	4
Yes	17	06202000099	DLMS	9600	PLC	4
Yes	18	06202000040	DLMS	9600	PLC	4
Yes	19	06202000013	DLMS	9600	PLC	4
Yes	20	06202000024	DLMS	9600	PLC	4
Yes	21	06202000016	DLMS	9600	PLC	4
Yes	23	06202000182	DLMS	9600	PLC	4
Yes	24	06202000046	DLMS	9600	PLC	4
Yes	25	06202000099	DLMS	9600	PLC	4
Yes	26	06202000194	DLMS	9600	PLC	4

Nota. Comcore Power Gate, Electro Sur Este S.A.A., 2025.

En la imagen anterior se observa casi en la parte central un icono en rojo que señala la desconexión de un suministro.

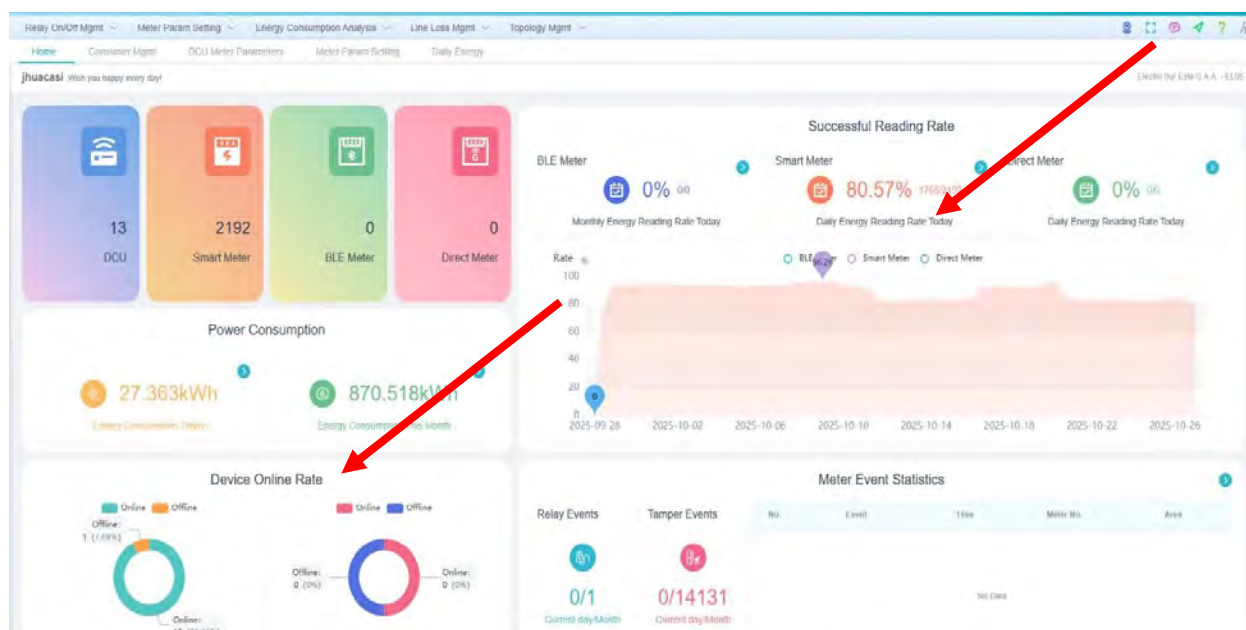
1.4.4.3. Resumen del estado del Sistema AMI piloto

Dentro de la web que controla y monitorea el Sistema AMI piloto de Electro Sur Este S.A.A., se brinda un reporte general del estado resumen de los componentes, concentradores y medidores inteligentes, donde se observa que el 92% aproximadamente de concentradores están operativos y el 80% aproximadamente de medidores inteligentes están operativos, lo cual representa un error importante en la conectividad del sistema actual y generaría inconvenientes para los usuarios y gastos extras para la concesionaria, tal como se ve en la Figura 1.22.

En la siguiente imagen se observa en la parte inferior izquierda el estado de los concentradores y en la parte superior derecha el estado de los medidores.

Figura 1.22

Resumen del estado del Sistema AMI



Nota. Comcore Power Gate, Electro Sur Este S.A.A., 2025.

1.5. Formulación del Problema

1.5.1. Problema general

¿De qué manera el diseño e implementación de un prototipo de medidor inteligente mejora las operaciones técnico-comerciales?

1.5.2. Problemas específicos

1. ¿De qué manera el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la medición y registro del consumo eléctrico?
2. ¿De qué manera el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora el control de pérdidas no técnicas por hurtos o robos?
3. ¿De qué manera el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la eficiencia de los procesos de corte y reconexión?
4. ¿En qué medida el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente es más económico en comparación con el Sistema AMI piloto?

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un prototipo de medidor inteligente que permita mejorar las operaciones técnico-comerciales.

1.6.2. Objetivos específicos

1. Evaluar la mejora del diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente en la medición y registro del consumo eléctrico.
2. Evaluar la mejora del diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente en el control de pérdidas no técnicas (hurtos o robos).
3. Evaluar la mejora del diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente en los procesos de corte y reconexión (por deuda).
4. Evaluar la diferencia del costo del prototipo de medidor inteligente en comparación con un sistema AMI piloto.

1.7. Justificación del estudio

1.7.1. Justificación social

El diseño e implementación de un prototipo de medidor inteligente contribuye significativamente al bienestar social al promover un uso más racional y transparente de la energía eléctrica. Mediante la telemedición y el monitoreo en tiempo real, los usuarios pueden conocer su consumo y adoptar hábitos de ahorro energético, lo que se traduce en una reducción de costos familiares y costos operativos para la empresa, así como un impacto ambiental positivo. Además, la implementación de este tipo de tecnología fortalece la relación entre la empresa distribuidora y los usuarios, al brindar un servicio más confiable, transparente y eficiente. En el contexto local, la aplicación de medidores inteligentes permite reducir conflictos por errores de facturación, cortes y reconexiones remotas más eficientes y mejorar la percepción ciudadana respecto al servicio eléctrico, generando confianza y satisfacción social (Flores & Cárdenas, 2022).

1.7.2. Justificación tecnológica

El desarrollo de este medidor inteligente promueve la innovación tecnológica local y el fortalecimiento de competencias prácticas en el ámbito de la ingeniería eléctrica, al emplear tecnologías abiertas y conceptos nuevos como la domótica, el Internet de las cosas (IoT), redes inteligentes, así como ser accesibles económicamente para que fomentan la experimentación y la investigación aplicada (Gutiérrez & Delgado, 2022). En consecuencia, el presente trabajo de investigación representa una contribución tecnológica para el desarrollo técnico y académico orientados a la eficiencia energética y a la gestión inteligente del consumo eléctrico por parte de los usuarios y que ofrece ventajas también para la empresa distribuidora.

1.7.3. Justificación metodológica

Desde el punto de vista metodológico, esta investigación propone un enfoque experimental y tecnológico sustentado en el diseño e implementación de un prototipo funcional de medidor inteligente. El proyecto integra tecnologías de bajo costo como módulos de medición o interruptores marca Tuya, sensores de corriente y tensión, y plataformas de comunicación como Wi-Fi o Home Assistant para la transmisión de datos. Este enfoque permite evaluar en condiciones controladas el desempeño técnico del sistema, su precisión de medición y su potencial de integración en redes de distribución eléctrica. Asimismo, la metodología propuesta servirá como referencia para futuros proyectos académicos o institucionales que busquen aplicar soluciones de Internet de las Cosas (IoT) al sector energético (Sánchez et al., 2023).

1.7.4. Justificación económica

Económicamente, la implementación de un medidor inteligente que sea de bajo costo representa una alternativa viable frente a los sistemas comerciales de telemedición, cuyo costo de adquisición e instalación suele ser elevado. Este proyecto busca demostrar que mediante el uso de componentes accesibles y tecnologías abiertas se puede reducir significativamente la inversión requerida para modernizar el sistema de medición eléctrica. Además, la automatización de la lectura y control del consumo disminuye costos operativos asociados al personal de campo y reduce pérdidas no técnicas derivadas de errores o fraudes eléctricos. Por tanto, el prototipo propuesto no solo optimiza los recursos económicos de la empresa distribuidora, sino que también contribuye a la economía social en general (Ramírez & Gutiérrez, 2021).

1.7.5. Valor teórico

El valor teórico se sustenta en la integración de conceptos de instrumentación eléctrica, sistemas embebidos y redes de comunicación IoT, aplicados al diseño e implementación de un medidor inteligente. Desde esta perspectiva, el prototipo desarrollado contribuye al conocimiento existente al demostrar la viabilidad técnica del uso de plataformas abiertas como Tuya o Smart Life y Home Assistant en la medición digital de energía eléctrica.

La arquitectura planteada combina la adquisición de datos mediante sensores de corriente, el procesamiento local a través de Tuya o Smart Life y la visualización remota en Home Assistant, generando una interfaz de monitoreo en tiempo real que replica las funciones básicas de un sistema AMI (Gómez, 2023). Este modelo teórico-práctico permite analizar la interacción entre hardware, firmware y red, lo cual constituye un aporte al campo de la electrometría digital y la automatización eléctrica.

Adicionalmente, el estudio amplía el marco teórico de la gestión de datos energéticos al describir el flujo de información entre el medidor y la plataforma comercial, fortaleciendo la comprensión sobre los mecanismos de comunicación inalámbrica aplicados a la medición inteligente (CEPAL, 2024). Este aporte teórico puede servir de base para futuras investigaciones orientadas a optimizar la interoperabilidad entre sistemas de medición y gestión de energía.

En síntesis, el proyecto ofrece un modelo experimental reproducible, sustentado en teorías de instrumentación, control y eficiencia operativa, que enriquece la literatura técnica nacional sobre el desarrollo de medidores inteligentes de bajo costo, promoviendo la soberanía tecnológica y la adaptación local de soluciones de digitalización energética (OSINERGMIN, 2024; IEEE, 2023), tal como se ve en la Figura 1.23.

Figura 1.23

Representación de un sistema de telemedición avanzada (AMI)



Nota. Electric Power Research Institute. 2011.

Autores como Morales y Pacheco (2020) señalan que la gestión automatizada de procesos técnico-comerciales a través de AMI puede “redefinir las prácticas tradicionales de distribución, abriendo paso a nuevos modelos operativos centrados en la eficiencia, la trazabilidad y la participación del usuario”. Esta investigación contribuye teóricamente al analizar estas transformaciones en un segmento específico del mercado eléctrico residencial (usuarios BT5B), generando información útil para futuros estudios comparativos, evaluaciones de impacto tecnológico y propuestas de mejora regulatoria.

Además, el estudio aporta al desarrollo de marcos teóricos que vinculan la innovación tecnológica en servicios públicos con la mejora en los procesos organizacionales y de atención al cliente, en línea con enfoques de gobernanza y eficiencia energética (Delgado & Paredes, 2020).

1.7.6. Utilidad metodológica

El impacto del diseño e implementación de un medidor inteligente en las operaciones técnico-comerciales de los usuarios del servicio eléctrico de la ciudad del Cusco requiere un enfoque metodológico riguroso que combine técnicas de estudio de la facturación, gestión de cortes y reconexiones y control de pérdidas de los usuarios o clientes finales. La utilización de herramientas como el estudio de la infraestructura técnica, el análisis de la funcionalidad operativa, la gestión de datos y el diseño e implementación de un medidor inteligente que permita a los usuarios autogestionar su consumo energético. Esta metodología no solo facilitará la evaluación del impacto del medidor inteligente en la mejora de las operaciones técnico-comerciales, sino que también proporcionará información crucial para la toma de decisiones estratégicas en la gestión de los usuarios de la ciudad del Cusco.

1.7.7. Implicancias prácticas

La presente investigación tiene implicancias prácticas significativas para las empresas distribuidoras de energía y los usuarios en general, ya que permitirá identificar con evidencia real cómo el diseño e implementación del medidor inteligente puede mejorar la eficiencia operativa, la precisión en los procesos de lectura y facturación, así como la detección oportuna de pérdidas no técnicas.

La automatización de las operaciones técnico-comerciales como la lectura remota, los cortes y reconexiones automáticos y la gestión de alertas contribuye a reducir los costos operativos, minimizar errores humanos y mejorar los tiempos de respuesta ante problemas reportados por los usuarios (Castaño, Rodríguez & Méndez, 2021). En ese sentido, los resultados del estudio podrán servir como insumo para la toma de decisiones estratégicas de implementación y expansión del sistema de medición inteligente en otras zonas urbanas del país.

Asimismo, esta investigación puede ayudar a optimizar la asignación de recursos técnicos y humanos, permitiendo a las empresas reorientar su personal de campo hacia funciones de supervisión, análisis de datos o mantenimiento preventivo, en lugar de tareas rutinarias como la lectura manual de medidores (Morales & Pacheco, 2020).

Desde el punto de vista del usuario, la medición inteligente fortalece la transparencia y confianza en la facturación, ya que facilita el monitoreo directo del consumo eléctrico. Esto, a su vez, puede generar un cambio en el comportamiento del consumidor, promoviendo prácticas de eficiencia energética y reducción del desperdicio (IEA, 2022). Por tanto, los hallazgos del estudio también podrán guiar campañas educativas o normativas de participación activa del consumidor.

Finalmente, los resultados pueden ser útiles para los organismos reguladores y autoridades locales al diseñar políticas públicas más efectivas en materia de digitalización del servicio eléctrico, focalizadas en segmentos específicos como el residencial BT5B, que representa una parte importante del mercado eléctrico urbano.

1.7.8. Conveniencia

La presente investigación es conveniente en tanto responde a una necesidad actual del sector eléctrico peruano para mejorar la eficiencia y transparencia de las operaciones técnico-comerciales en un contexto de transición hacia redes eléctricas inteligentes. El diseño e implementación de un medidor inteligente se viene promoviendo como una herramienta clave para lograr estos objetivos, pero aún existen vacíos importantes en cuanto a su evaluación técnica, operativa y comercial en ámbitos locales como el de la ciudad del Cusco.

Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2021), la digitalización de los sistemas eléctricos en América Latina es un proceso urgente pero aún incipiente, que requiere soporte técnico, normativo y científico. En ese sentido, este estudio aporta evidencia sobre cómo una tecnología emergente como el AMI puede influir en procesos esenciales como la lectura, facturación, detección de pérdidas no técnicas y atención al usuario.

Asimismo, el trabajo tiene relevancia institucional, ya que sus resultados podrán ser utilizados por usuarios regulados, empresas distribuidoras, reguladores y tomadores de decisiones para evaluar el rendimiento del medidor inteligente dentro del sistema AMI y fundamentar futuras inversiones. Como sostienen Morales y Pacheco (2020), la automatización de procesos técnico-comerciales con base en datos confiables permite a las distribuidoras tomar decisiones más ágiles y reducir significativamente sus costos operativos

Además, el estudio es pertinente para el contexto académico, pues contribuye al fortalecimiento del conocimiento local sobre tecnologías aplicadas a la gestión energética, un tema

que carece de estudios en ciudades intermedias como Cusco. También puede servir de referencia para futuras investigaciones en el ámbito de la ingeniería eléctrica, la eficiencia energética y la gestión de servicios públicos.

En resumen, la tesis es conveniente porque responde a una necesidad real del entorno, fortalece la capacidad técnica y operativa del sector eléctrico y aporta a la producción científica regional en un campo estratégico para el desarrollo sostenible en beneficio de los usuarios finales los cuales se ven perjudicados en malas facturaciones, demoras en la reposición del servicio, pérdidas no técnicas de energía eléctrica, etc.

1.8. Alcances y limitaciones

1.8.1 Alcances

1.8.1.1. Estudio del consumo energético

El estudio se enfocó en analizar el consumo energético de los usuarios en la ciudad del Cusco mediante el diseño e implementación de un prototipo de medidor eléctrico inteligente basado en tecnologías emergentes que lo hace más fácil de usar y confiable. Esto implica recopilar datos sobre el consumo energético del hogar seleccionado como muestra, identificar patrones de consumo, analizar los cambios en los hábitos de consumo, estudiar las pérdidas no técnicas y evaluar el impacto de los medidores inteligentes en la eficiencia energética para los usuarios.

1.8.1.2. Estudio del medidor inteligente

El estudio puede evaluar el proceso de diseño e implementación del prototipo del medidor inteligente para usuarios en general del servicio público que sean regulados bajo la tarifa BT5. Esto implica analizar aspectos como la cobertura de la instalación de los medidores, los desafíos técnicos y logísticos enfrentados, así como la aceptación y adopción por parte de los usuarios residenciales.

1.8.1.3. Evaluación de los beneficios y desafíos

El estudio puede evaluar los beneficios y desafíos asociados con la integración de medidores eléctricos inteligentes. Esto implica considerar los beneficios económicos y sociales derivados del diseño e implementación del prototipo de medidor propuesto en la presente tesis, así como los desafíos técnicos, económicos o sociales que puedan haber surgido durante el proceso.

1.8.2. Limitaciones

1.8.2.1. Restricciones normativas

De acuerdo con la Ley de Concesiones Eléctricas y la Norma Técnica de Calidad del Servicio Eléctrico (NTCSE), los suministros eléctricos no pueden ser intervenidos por terceros sin la autorización de la empresa concesionaria, en este caso, Electro Sur Este S.A.A. Por ello, la investigación solo ha podido evaluar un suministro específico previa autorización del propietario y solo dentro de las conexiones internas del domicilio.

1.8.2.2. Disponibilidad de componentes

La disponibilidad de los componentes que conforman el medidor inteligente es limitada en cuanto a la oferta en el mercado local, teniéndose que solicitar o hacer pedidos vía internet, lo que puede generar demoras y plazos de entrega de hasta dos semanas después de hecho el pedido, es posible que esto dificulte una futura implementación a mayor escala.

1.8.2.3. Disponibilidad de datos

La disponibilidad de datos precisos y completos sobre el consumo energético puede ser limitada. Dependiendo de la accesibilidad y la calidad de los datos proporcionados por Electro Sur Este S.A.A. u otras fuentes, es posible que existan lagunas o sesgos en la información recopilada, lo que podría afectar la representatividad de los resultados obtenidos.

1.8.2.4. Representatividad de la muestra

Si el análisis se basa en una muestra de un solo usuario con tarifa BT5B, es importante asegurar que la muestra sea representativa de la población en general. Una muestra no representativa podría sesgar los resultados y limitar la aplicabilidad de las conclusiones a la población en su conjunto.

1.8.2.5. Limitaciones técnicas de los medidores inteligentes

Aunque los medidores eléctricos inteligentes ofrecen ventajas en términos de medición precisa y en tiempo real, es posible que presenten limitaciones técnicas. Esto podría incluir problemas de conectividad, errores en las mediciones o problemas de calibración que podrían

afectar la fiabilidad de los datos obtenidos.

1.8.2.6. Factores externos no controlables

Es importante reconocer que existen factores externos que pueden influir en los resultados del análisis y están fuera del control del estudio. Estos factores podrían incluir cambios en las condiciones económicas, sociales o políticas que podrían afectar el consumo energético y las tarifas eléctricas, así como otros factores externos que podrían influir en la adopción y aceptación de los medidores inteligentes por parte de los usuarios residenciales.

1.9. Hipótesis

1.9.1. Hipótesis general

El diseño e implementación de un prototipo de medidor inteligente mejora las operaciones técnico-comerciales al optimizar la medición y registro del consumo eléctrico, los procesos de corte y reconexión y el control de pérdidas no técnicas y es más económico que el Sistema AMI piloto.

1.9.2. Hipótesis específicas

1. El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la exactitud y disponibilidad de las mediciones respecto al sistema convencional.
2. El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la detección de pérdidas no técnicas mediante la detección automática de anomalías.
3. El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora el tiempo y los costos operativos al ejecutar cortes y reconexiones remotas.
4. El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente es más económico en comparación con el Sistema AMI piloto.

1.10. Variables, dimensiones e indicadores

1.10.1. Variables

1.10.1.1. Variable independiente

Prototipo de un medidor inteligente.

1.10.1.2. Variable dependiente

Operaciones técnico-comerciales.

1.10.2. Dimensiones

1.10.2.1. Dimensiones de la variable independiente

- Medición de voltaje (V)
- Medición de corriente (I)
- Medición de potencia (kW)
- Medición de energía (kWh)
- Costo del prototipo de medidor inteligente (s/.)

1.10.2.2. Dimensiones de la variable dependiente

- Medición y registro del consumo.
- Control de pérdidas no técnicas.
- Corte y reconexión del servicio en tiempo real.

1.10.3. Indicadores

1.10.3.1. Indicador de la variable independiente

- Error relativo en la lectura de voltaje (%)
- Precisión en la medición de voltaje (%)
- Frecuencia de lectura de datos (minutos)
- Error relativo en la lectura de corriente (%)
- Precisión en la medición de corriente (%)
- Frecuencia de lectura de datos (minutos)
- Error relativo en la lectura de la potencia (%)
- Precisión en la medición de potencia (%)
- Frecuencia de lectura de datos (minutos)
- Error relativo en la lectura de energía (%)
- Precisión en la medición de energía (%)
- Frecuencia de transmisión de datos (minutos)
- Costo total del prototipo de medidor inteligente (S/.)
- Costo total del medidor inteligente AMI actual (S/.)

- Costo total del concentrador inteligente (S/.)
- Costo total del concentrador inteligente AMI actual (S/.)

1.10.3.2. Indicadores de la variable dependiente

- Porcentaje de lecturas automáticas correctas (%)
- Disponibilidad de datos en tiempo real (sí/no)
- Número de lecturas correctas (cantidad)
- Porcentaje de lecturas correctas (%)
- Energía acumulada (kWh)
- Pérdida no técnica (sí/no)
- Tiempo de ejecución para corte/reconexión (segundos)
- Resultado de ejecución para corte/reconexión (Éxito/Falla)

1.11. Población y muestra

1.11.1. Población

La población de nuestro estudio estará compuesta por los usuarios de baja tensión de tipo residencial con tarifa BT5B monofásicos de la ciudad del Cusco. Siguiendo la definición proporcionada por Arias (2006), la población se entiende como un conjunto, ya sea finito o infinito, de elementos que comparten características comunes, sobre los cuales las conclusiones de la investigación son aplicables. Esta población está delimitada tanto por el problema de investigación como por los objetivos del estudio.

1.11.2. Muestra

El presente estudio usa el muestreo no probabilístico, ya que la implementación del prototipo de medidor inteligente es en un usuario con inaccesibilidad del predio para la ejecución normal de las operaciones técnico-comerciales tales como la toma de lectura, control de pérdidas y corte/reconexión del servicio eléctrico. La muestra se define como un solo usuario con problemas de accesibilidad, lo cual garantiza su objetividad y fidelidad respecto a la misma. De esta manera, los resultados obtenidos en la muestra pueden extrapolarse con confianza a todos los elementos que integran la población. (Carrasco, 2016)

1.12. Metodología de la investigación

1.12.1. Método de la investigación

La metodología que se implementó en la presente investigación es experimental -aplicativa, ya que se manipula una variable independiente para observar sus efectos sobre variables dependientes como la reducción de errores de lectura, disminución de pérdidas no técnicas, optimización de procesos de facturación y la mejora de la eficiencia en el corte y reconexión del servicio eléctrico. Este método implica la formulación de una hipótesis inicial, que supone que el diseño e implementación de un medidor inteligente mejora significativamente las operaciones técnico-comerciales de los usuarios respecto al proceso actual. De acuerdo con Bernal (2010), el método experimental permite establecer relaciones de causa-efecto, ya que el investigador introduce deliberadamente un estímulo o condición para observar su impacto en un fenómeno. En este caso, se implementará un prototipo funcional de medidor inteligente, evaluando su desempeño mediante indicadores cuantitativos y cualitativos relacionados con la gestión técnico-comercial.

1.12.2. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, dado que busca resolver un problema específico del sector eléctrico mediante el diseño e implementación del prototipo de un sistema de medición inteligente. Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), la investigación aplicada “se orienta a generar conocimientos con aplicación directa e inmediata a problemas de la sociedad o del sector productivo” (p. 8).

1.12.3. Nivel de la investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un nivel cuasi experimental, debido a que contempla la intervención deliberada sobre la variable independiente mediante el diseño e implementación de un prototipo de medidor inteligente. Dicha intervención permite evaluar los cambios generados en las operaciones técnico-comerciales de los usuarios de baja tensión antes y después de la aplicación de la propuesta tecnológica.

Se considera cuasi experimental porque, si bien existe manipulación de la variable independiente para analizar su efecto sobre la variable dependiente, no se realiza una asignación aleatoria de los sujetos o unidades de estudio, sino que la evaluación se efectúa sobre un grupo previamente definido en condiciones reales de operación.

1.12.4. Enfoque de la investigación

El enfoque es cuantitativo, ya que se utilizarán mediciones objetivas y datos numéricos para evaluar variables como reducción de errores de lectura, tiempos de facturación, costos

operativos y pérdidas no técnicas (PNT). De acuerdo con Sampieri et al. (2014), el enfoque cuantitativo “usa la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico”.

1.12.5. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es del tipo cuasi-experimental, pues se evaluará el impacto del medidor inteligente en un solo usuario del servicio eléctrico, comparando resultados entre el actual sistema de medición instalado (medidor electrónico) y después con el sistema de medición inteligente, sin manipular todos los factores de manera completamente aleatoria (Kerlinger & Lee, 2002). Esto permitirá determinar en qué medida el sistema optimiza las operaciones técnico-comerciales.

1.12.6. Técnicas de recolección de datos

Se empleó la técnica de observación directa experimental, mediante la cual se evaluó el comportamiento del prototipo bajo condiciones controladas de operación eléctrica, registrando parámetros de desempeño técnico como la tensión, corriente, potencia y energía, así como la comunicación por ejemplo entre el medidor y el concentrador o entre el microcontrolador y los sensores.

1.12.7. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos se realizó mediante el registro temporal de las variables eléctricas medidas por el prototipo durante su instalación experimental por un periodo controlado de horas. Las mediciones de corriente, tensión y potencia fueron contrastadas con un medidor patrón y una pinza amperimétrica para determinar la precisión y el error porcentual del sistema. Asimismo, se verificó el registro automático de datos, la capacidad de corte y reconexión remota instantáneos, y la detección de corrientes residuales asociadas a posibles pérdidas no técnicas. Los datos obtenidos fueron organizados en tablas digitales para su análisis técnico y económico del prototipo de medidor inteligente implementado.

1.13. Matriz de Consistencia

Tabla 1.2

Matriz de Consistencia

TESIS: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE MEDIDOR INTELIGENTE PARA MEJORAR LAS OPERACIONES TÉCNICO-COMERCIALES, CUSCO 2026”

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	METODOLOGÍA
¿De qué manera el diseño e implementación de un prototipo de medidor inteligente mejora las operaciones técnico-comerciales?	Diseñar e implementar un prototipo de medidor inteligente que permita mejorar las operaciones técnico-comerciales.	El diseño e implementación de un prototipo de medidor inteligente mejora las operaciones técnico-comerciales al optimizar la medición y registro del consumo eléctrico, los procesos de corte y reconexión y el control de pérdidas no técnicas.	Independiente: Prototipo de medidor inteligente Dependiente: Operaciones técnico-comerciales	Tipo: Aplicada Diseño: Cuasi - experimental Nivel: Cuasi - Experimental Enfoque: Cuantitativo Población: Usuarios regulados en baja tensión monofásicos. Muestra: Un usuario representativo bajo enfoque de estudio de caso Instrumentos: - Ficha de obs. técnica - Plataforma de monitoreo en línea - Ficha de registro de operaciones
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS		
¿De qué manera el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la medición y registro del consumo eléctrico?	Evaluar la mejora del diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente en la medición y registro del consumo eléctrico.	El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la exactitud y disponibilidad de las mediciones respecto al sistema convencional.		
¿De qué manera el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora el control de pérdidas no técnicas por hurtos o robos?	Evaluar la mejora del diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente en el control de pérdidas no técnicas (hurtos o robos).	El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la detección de pérdidas no técnicas mediante la detección automática de anomalías.		
¿De qué manera el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la eficiencia de los procesos de corte y reconexión?	Evaluar la mejora del diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente en los procesos de corte y reconexión (por deuda).	El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora el tiempo y los costos operativos al ejecutar cortes y reconexiones remotas.		
¿En qué medida el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente es más económico en comparación con el Sistema AMI piloto?	Evaluar la diferencia del costo del prototipo de medidor inteligente en comparación con un sistema AMI piloto.	El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente es más económico en comparación con el Sistema AMI piloto.		

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

El Capítulo II establece el marco teórico de la investigación, incluyendo antecedentes internacionales, nacionales y locales, los cuales contextualizan el tema de investigación de la presente tesis. Se desarrolla el marco conceptual con temas clave como la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), y procesos de corte y reconexión. Así mismo se presentan los antecedentes basados en la información recopilada y relacionada con la propuesta planteada, así como el desarrollo del marco teórico y normativo. Estas son las fuentes, tanto primarias como secundarias, en las que se basa y sustenta la actual tesis de ingeniería, con el objetivo de proporcionar una visión integral de los enfoques teóricos que fundamentan los problemas específicos y que conducen al problema general.

2.2. Antecedentes de la investigación

2.2.1. *Antecedentes internacionales*

Según Quesada et al. (2023), España, en su investigación titulada “An electricity smart meter dataset of Spanish households: insights into consumption patterns”, desarrollado en instituciones académicas de España, tuvo como objetivo analizar el comportamiento del consumo eléctrico residencial mediante datos reales obtenidos de medidores inteligentes instalados en hogares. La metodología fue experimental y analítica, basada en el procesamiento de series temporales de consumo eléctrico recopiladas mediante sistemas AMI, aplicando técnicas de análisis de datos para identificar patrones de uso energético. Los resultados demostraron que los medidores inteligentes permiten obtener información detallada del consumo eléctrico en tiempo real, mejorar la planificación energética y optimizar los procesos de facturación eléctrica, evidenciando su importancia en la gestión técnico-comercial de los sistemas de distribución eléctrica.

Según Echeverría y García (2022), Colombia, en su investigación titulada “Medición avanzada inteligente: retos al consumo responsable del servicio público domiciliario de energía en Colombia”, publicado en una revista académica colombiana, tuvo como objetivo analizar el impacto de la implementación de sistemas de medición inteligente en el consumo energético y la gestión del servicio eléctrico. La metodología fue cualitativa, basada en el análisis normativo y revisión de experiencias de implementación en el contexto colombiano. Se concluyó que los sistemas AMI permiten mejorar la precisión de la facturación, reducir pérdidas de energía y brindar información detallada a los usuarios, favoreciendo un consumo más eficiente y

optimizando los procesos técnico-comerciales en empresas distribuidoras.

Según Ramos et al. (2023), México, en su investigación titulada “Sistema de medición inteligente para monitoreo energético en viviendas utilizando tecnología IoT”, desarrollado en la Universidad Nacional Autónoma de México, tuvo como objetivo diseñar e implementar un sistema de medición inteligente para monitorear el consumo eléctrico en viviendas mediante tecnologías IoT. La metodología fue experimental, mediante el desarrollo de un prototipo basado en sensores de corriente, módulo de comunicación Wi-Fi y una plataforma de monitoreo en línea. Se realizaron pruebas en campo para validar la precisión del sistema. Se concluyó que el sistema permite monitoreo en tiempo real, mejora la precisión de medición y reduce costos operativos, contribuyendo a la eficiencia energética y a la optimización de los procesos de facturación eléctrica.

Según Li et al. (2022), en su investigación titulada “Integration of IoT-based energy metering devices in smart home systems”, desarrollada en el ámbito internacional de los sistemas inteligentes de gestión energética, tuvo como objetivo integrar dispositivos de medición de energía basados en IoT dentro de plataformas de hogares inteligentes. La metodología consistió en el diseño e implementación de una arquitectura de monitoreo energético con sensores, comunicación inalámbrica y procesamiento de datos en tiempo real. Los resultados demostraron que el sistema permite supervisar continuamente el consumo eléctrico, mejorar la eficiencia energética y facilitar la toma de decisiones por parte de los usuarios, para una gestión energética más eficiente.

Según López y Martínez (2021), Argentina, en su investigación titulada “Desarrollo de un medidor inteligente de energía eléctrica con comunicación inalámbrica para aplicaciones residenciales”, desarrollado en universidades argentinas, tuvo como objetivo diseñar e implementar un prototipo de medidor inteligente capaz de registrar y transmitir datos de consumo eléctrico en tiempo real. La metodología fue experimental, basada en el desarrollo de hardware con sensores de medición y módulos de comunicación, así como software para la visualización de datos. Se concluyó que el sistema permite mejorar la precisión de medición, automatizar el registro del consumo eléctrico y optimizar los procesos de facturación, evidenciando su aplicabilidad en sistemas de distribución eléctrica modernos.

2.2.2. Antecedentes nacionales

Según Salinas Vásquez y Villanueva Villacorta (2022), en su tesis titulada “Diseño de un

prototipo de medidor inteligente para análisis de calidad de energía en instalaciones industriales”, desarrollada en la Universidad César Vallejo, tuvo como objetivo diseñar e implementar un prototipo de medidor inteligente basado en tecnologías IoT para el monitoreo de parámetros eléctricos en tiempo real. La metodología fue experimental, considerando el diseño de hardware y software, integración de sensores eléctricos y conexión a una plataforma web para visualización de datos. Se realizaron pruebas en instalaciones reales para evaluar la precisión del sistema. Se concluyó que el prototipo permite medir variables eléctricas con alta confiabilidad, facilitando el monitoreo continuo de la calidad de energía y contribuyendo a la optimización de la gestión técnico-comercial en sistemas eléctricos.

Según Narciso Celestino (2022), en su tesis titulada “Sistema de medición inteligente de consumo eléctrico residencial utilizando una red de comunicación inalámbrica”, desarrollada en la Universidad de Ciencias y Humanidades, tuvo como objetivo implementar un sistema de medición inteligente basado en comunicación Wi-Fi para el monitoreo del consumo eléctrico en usuarios residenciales. La metodología fue experimental, mediante el desarrollo de un prototipo con sensores de medición, microcontrolador y base de datos para almacenamiento de información. Se realizaron pruebas de funcionamiento en condiciones reales. Se concluyó que el sistema permite registrar el consumo eléctrico en tiempo real, mejorar la precisión de medición y optimizar la gestión energética del usuario, reduciendo la dependencia de lecturas manuales.

Según Bailón (2021), en su tesis titulada “Reducción de pérdidas de energía eléctrica mediante la implementación de un sistema de telemedición con concentrador digital en una subestación eléctrica de distribución aérea en baja tensión”, desarrollada en la Universidad Tecnológica del Perú, tuvo como objetivo implementar un sistema de telemedición basado en medidores inteligentes para reducir pérdidas de energía eléctrica. La metodología fue aplicada y experimental, mediante la instalación de medidores inteligentes con comunicación inalámbrica ZigBee y análisis de datos en tiempo real. Se evaluó el impacto del sistema en la reducción de pérdidas energéticas. Se concluyó que la implementación de telemedición permitió reducir significativamente las pérdidas eléctricas, mejorando la eficiencia operativa y la gestión técnico-comercial del sistema de distribución.

Según López Sal y Rosas (2023), en su tesis titulada “Diseño e implementación de un sistema de medición inteligente utilizando tecnología Wi-SUN para usuarios residenciales en la ciudad de Iquitos”, desarrollada en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, tuvo como

objetivo diseñar un sistema de medición inteligente con comunicación inalámbrica para optimizar la medición y facturación eléctrica. La metodología fue experimental, incluyendo el diseño de la arquitectura del sistema, implementación de medidores inteligentes y pruebas de comunicación bidireccional. Se concluyó que el sistema permite mejorar la recolección de datos de consumo, facilitar la facturación, habilitar funciones como cortes remotos y reducir pérdidas de energía, optimizando los procesos técnico-comerciales.

Según Muñoz Medina (2021), en su tesis titulada “Análisis de costos y beneficios para el despliegue de sistemas de medición inteligente en Lima Metropolitana”, desarrollada en ESAN Graduate School of Business, tuvo como objetivo evaluar la viabilidad económica de la implementación de sistemas de medición inteligente en empresas distribuidoras de energía eléctrica. La metodología fue analítica, basada en evaluación costo-beneficio considerando variables técnicas, económicas y regulatorias. Se analizaron escenarios de implementación de AMI en el contexto peruano. Se concluyó que los sistemas de medición inteligente generan beneficios económicos a mediano plazo, mejoran la eficiencia del sistema eléctrico y optimizan los procesos de facturación y gestión comercial.

2.2.3. Antecedentes locales

Según Cahuana (2020), en su tesis titulada “Implementación del sistema de telemedición mediante la aplicación de la tecnología Two Way Automatic Communication System en el sistema eléctrico Combapata de Electro Sur Este S.A.A.”, desarrollada en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, tuvo como objetivo implementar un sistema de telemedición en redes de distribución eléctrica para mejorar la gestión del consumo energético. La metodología fue aplicada y experimental, mediante la instalación de equipos de telemedición y evaluación de su desempeño en condiciones reales de operación. Se concluyó que la implementación del sistema permitió mejorar la precisión en la lectura de consumo, reducir pérdidas comerciales y optimizar los procesos de facturación, evidenciando la importancia de la medición inteligente en la gestión técnico-comercial del sistema eléctrico.

Según Martínez y Magallanes (2023), Cusco – Perú, en su trabajo titulado “Implementación de un sistema de medición inteligente con tecnología G3-PLC para la distribuidora Electro Sur Este S.A.A. en la ciudad del Cusco”, desarrollado en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, tuvo como objetivo implementar un sistema de medición inteligente basado en comunicación PLC en redes de baja tensión. La metodología fue

experimental mediante pruebas de comunicación, instalación de dispositivos y validación en campo. Se concluyó que el sistema alcanzó alta eficiencia en la transmisión de datos, mejorando la confiabilidad de la medición, reduciendo pérdidas no técnicas y optimizando la gestión técnico-comercial.

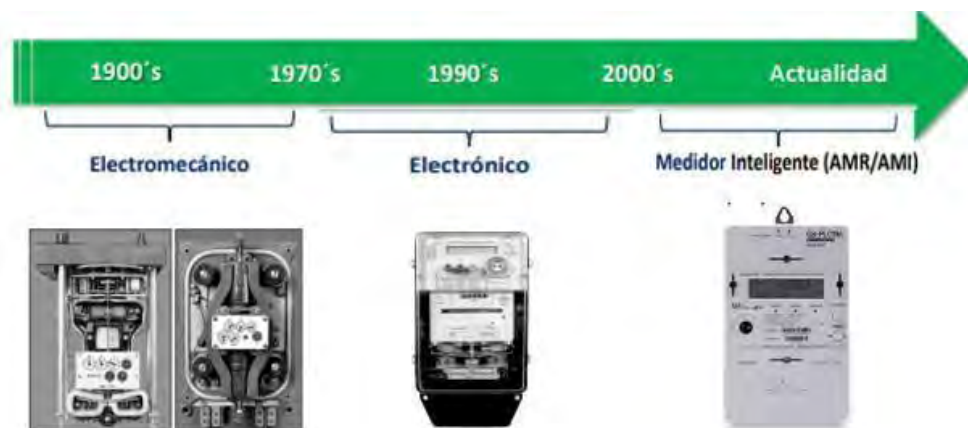
Según Miranda (2023), Cusco – Perú, en su tesis titulada “Modelo de telecomunicación para la gestión de medidores inteligentes de energía eléctrica”, desarrollada en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, tuvo como objetivo diseñar un modelo de comunicación para sistemas de medición inteligente en redes eléctricas de distribución. La metodología fue experimental mediante la implementación de tecnologías de comunicación y evaluación del rendimiento del sistema. Se concluyó que el modelo propuesto mejora la eficiencia en la lectura remota, optimiza la gestión del consumo eléctrico y permite la recuperación de energía no registrada.

Según Cáceres et al. (2022), Cusco – Perú, en su artículo de investigación titulado “Optimización de la eficiencia energética en los hogares con microred fotovoltaica piloto y tecnologías de medición inteligente en la ciudad del Cusco”, desarrollado en Cusco, tuvo como objetivo implementar un sistema de medición inteligente en una microred residencial para evaluar el consumo energético. La metodología fue experimental mediante el desarrollo de un prototipo basado en Arduino y sensores eléctricos. Se concluyó que el sistema permitió monitoreo en tiempo real del consumo energético, mejorando la eficiencia energética y promoviendo el uso racional de la energía eléctrica.

2.3. Bases teóricas

2.3.1. Evolución de la medición de energía

La medición de energía eléctrica ha evolucionado significativamente desde los primeros medidores electromecánicos basados en discos giratorios hasta los modernos sistemas de medición inteligente (AMI). En sus inicios, la medición se realizaba de manera manual y local, limitando la precisión y el control operativo. Con el avance de la electrónica digital, surgieron los medidores electrónicos capaces de registrar y almacenar datos de consumo con mayor exactitud. Actualmente, los medidores inteligentes incorporan tecnologías de comunicación bidireccional e integración con plataformas IoT, lo que permite la lectura remota, la detección de pérdidas y la automatización de procesos comerciales, optimizando la gestión energética para las empresas distribuidoras y para los usuarios, tal como se ve en la Figura 2.1.

Figura 2.1*Evolución de la medición de energía*

Nota. Ministerio del Ambiente del Perú, 2022.

Actualmente los medidores están catalogados en los siguientes tipos:

- Medidor electromecánico (entre 1890 y 1960), evolucionaron significativamente. Inicialmente, se introdujeron modelos de amperio-hora y vatio-hora, que ofrecían una mayor capacidad de manejo de carga y precisión en la medición. Para 1960, estos medidores alcanzaron su diseño más avanzado, haciéndose más compactos, robustos y exactos en su funcionamiento (Ministerio del Ambiente del Perú, 2022).
- Medidor electrónico, es más versátil y preciso que sus predecesores, ya que no solo mide el consumo, sino también proporciona información detallada sobre la calidad de energía, voltajes y corrientes; además, es más compacto en su diseño (Ministerio del Ambiente del Perú, 2022).
- Medidor inteligente AMI, conserva las prestaciones del medidor electrónico, añadiendo comunicación bidireccional entre la empresa y el consumidor, un display remoto, y compatibilidad con dispositivos inteligentes del usuario. También permite la medición bidireccional, registrando tanto la energía suministrada por la empresa como la que el consumidor devuelve a la red (Ministerio del Ambiente del Perú, 2022).

2.3.2. Medidor electromecánico

El medidor electromecánico de energía eléctrica, visto en la Figura 2.2, también denominado medidor de inducción tipo Ferraris, es un dispositivo destinado a la medición acumulativa del consumo de energía eléctrica (kWh) en instalaciones de baja tensión. A diferencia de los sistemas AMI, estos equipos no poseen capacidad de comunicación remota, por lo que la transferencia de información se realiza mediante lectura manual directa en campo.

Figura 2.2*Medidor electromecánico*

Nota. Sodimac, 2026.

2.3.2.1. Principio electromecánico de medición

El funcionamiento del medidor convencional se basa en el principio de inducción electromagnética, donde el par motor es proporcional al producto instantáneo de la tensión y la corriente del circuito, es decir, a la potencia activa:

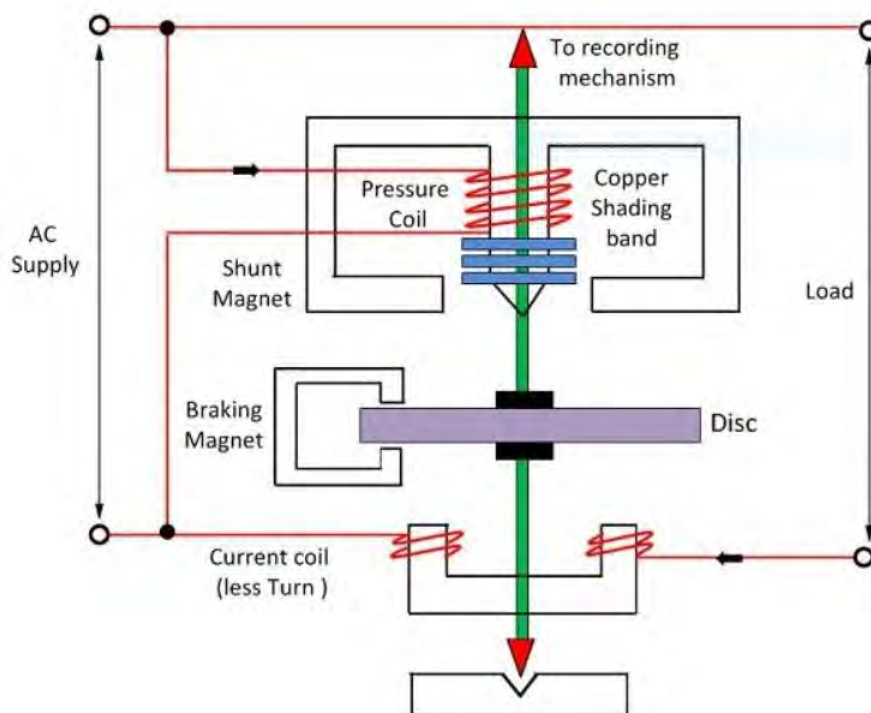
$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi$$

El equipo está compuesto principalmente por:

- Bobina de corriente (serie): conectada en serie con la carga.
- Bobina de tensión (paralelo): conectada en paralelo con la red.
- Disco de aluminio: gira por efecto de corrientes parásitas inducidas.
- Imán permanente de frenado: genera un par resistente proporcional a la velocidad.
- Mecanismo registrador: engranajes que convierten el giro en lectura acumulativa de energía (kWh).

Tal como se ve en la Figura 2.3

Figura 2.3*Esquema funcional de un medidor electromecánico*



Nota. Medidores Eléctricos y Compatibilidad Electromagnética, Comulsa, 2019.

Cuando el usuario consume energía, el campo magnético alterno generado por ambas bobinas induce corrientes de Foucault en el disco. La interacción entre los flujos magnéticos produce un par motor proporcional a la potencia activa instantánea. El disco gira a una velocidad proporcional a dicha potencia, y el número total de revoluciones es proporcional a la energía consumida (Chapman, 2012).

Matemáticamente:

$$E = \int P(t) dt$$

Donde la integración mecánica se realiza físicamente mediante el sistema de engranajes.

2.3.2.2. Principio de funcionamiento de la comunicación

En los medidores electromecánicos, la comunicación de la información de consumo no es electrónica ni automática, sino que se realiza bajo el siguiente esquema:

- Visualización local: la energía acumulada se muestra en un contador mecánico (tipo odómetro) o dial analógico, visible en la carcasa frontal del medidor.
- Lectura manual: un operario de la empresa distribuidora realiza la lectura periódica

(mensual o bimestral), registrando el valor mostrado en campo.

- Registro administrativo: el dato es ingresado manualmente al sistema comercial de la empresa eléctrica para el cálculo de facturación. Este proceso corresponde a un sistema de medición post-pago sin canal de comunicación bidireccional, caracterizado por:
 - Ausencia de transmisión de datos en tiempo real.
 - Dependencia de inspección física.
 - Imposibilidad de monitoreo remoto.
 - Vulnerabilidad a errores humanos de lectura.

Según la norma internacional International Electrotechnical Commission (IEC 62052-11 e IEC 62053-11), estos equipos pertenecen a la categoría de medidores estáticos o electromecánicos sin interfaz de comunicación integrada, utilizados históricamente en redes de distribución de baja tensión.

2.3.2.3. Limitaciones técnicas

El sistema electromecánico presenta las siguientes restricciones técnicas respecto a los medidores inteligentes AMI:

Tabla 2.1

Limitaciones técnicas del medidor electromecánico en comparación con sistemas inteligentes

Criterio	Medidor Electromecánico	Sistema Inteligente (AMI)
Comunicación remota	No permanente	Permanente y bidireccional
Perfil de carga	No disponible	Detallado (intervalos programables)
Gestión remota	No disponible	Corte/reconexión y parametrización
Integración con red	Nula	Alta interoperabilidad
Análisis de datos	No realiza (solo registro acumulativo en kWh)	Centralizado y analítico

Nota. Elaboración propia, 2025.

De acuerdo con Gonen (2014), los sistemas tradicionales fueron diseñados únicamente para la medición energética acumulativa y no para gestión activa de la red, lo que limita su utilidad en redes inteligentes.

2.3.3. Medidor electrónico (convencional)

El medidor electrónico convencional, también denominado medidor estático de energía activa, es un dispositivo que realiza la medición mediante técnicas de muestreo digital y procesamiento electrónico interno. A diferencia de los medidores inteligentes con infraestructura AMI, este tipo de equipo no dispone de un canal de telecomunicación permanente hacia un sistema central, por lo que su esquema de comunicación se limita a interfaces locales de lectura y configuración, tal como se ve en la Figura 2.4.

Figura 2.4

Medidor electrónico



Nota. Sodimac, 2026.

El medidor electrónico reemplaza a los antiguos medidores electromecánicos y está diseñado para permitir la medición del consumo eléctrico con mayor precisión y resistencia al uso de campos magnéticos u otras manipulaciones. Estos dispositivos siguen normas técnicas como la IEC 62053 o la ANSI C12, de acuerdo con los requisitos de la empresa distribuidora. Se identifican cuatro tipos principales en función de la configuración de la red: monofásico 2 hilos, monofásico 3 hilos, trifásico 3 hilos y trifásico 4 hilos. Los medidores de 3 hilos están preparados para redes

tipo delta, mientras que los de 2 ó 4 hilos para redes tipo estrella. Este tipo de medidores realiza la función básica de registro de energía para facturación, pero carece de capacidades avanzadas de comunicación o control que tienen los medidores inteligentes.

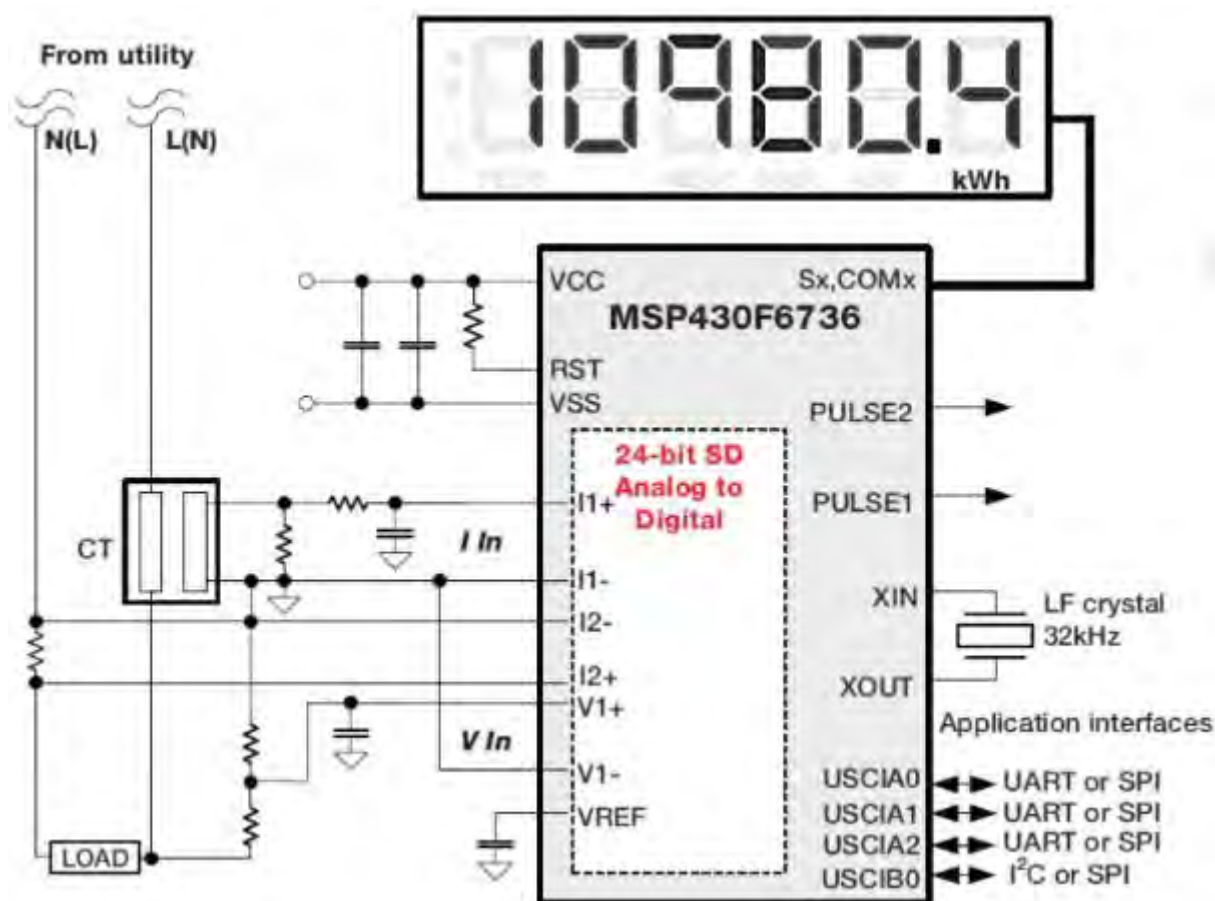
2.3.3.1. Principio electrónico de medición

El fundamento electrónico de la medición en los medidores electrónicos, tal como se ve en la Figura 2.5, inicia con la captación de las variables eléctricas fundamentales del circuito:

- Tensión: obtenida mediante divisor resistivo o transformador de potencial.
- Corriente: captada mediante transformador de corriente o resistencia shunt.

Figura 2.5

Esquema funcional de un medidor electrónico



Nota. Medidores Eléctricos y Compatibilidad Electromagnética, Comulsa, 2019.

Las señales analógicas son acondicionadas (filtrado y adaptación de nivel) y posteriormente digitalizadas a través de un convertidor analógico-digital (ADC). El microcontrolador o circuito

integrado especializado calcula la potencia activa instantánea según:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t)$$

La energía activa consumida se obtiene mediante integración discreta en el tiempo:

$$E = \sum p(t) \Delta t$$

El resultado se almacena en memoria no volátil y se visualiza en una pantalla LCD en unidades de kWh. Según la norma técnica International Electrotechnical Commission (IEC 62053-21), estos equipos se clasifican como medidores estáticos para medición de energía activa en baja tensión.

2.3.3.2. Principio de funcionamiento de la comunicación

Aunque el procesamiento interno es digital, la comunicación hacia el exterior no es automática ni remota. Su principio de comunicación se fundamenta en la transferencia local de datos bajo demanda, mediante los siguientes mecanismos:

- Puerto óptico frontal: la mayoría de medidores electrónicos convencionales incorpora un puerto óptico conforme a la norma IEC 62056-21. Este puerto permite:
 - Lectura electrónica del registro acumulado.
 - Descarga de históricos.
 - Parametrización.
 - Verificación metrológica.

El intercambio de datos se realiza típicamente mediante comunicación serial asincrónica (UART), utilizando protocolos normalizados. Esta interfaz requiere proximidad física entre el lector portátil y el medidor:

- Salida de pulsos: algunos equipos disponen de salida de pulsos (por ejemplo, 1000 o 1600 imp/kWh), que representa proporcionalmente la energía consumida. Esta señal puede conectarse a sistemas externos de monitoreo local, pero no constituye un canal de telecomunicación autónomo.
- Interfaces cableadas opcionales: en ciertos modelos pueden existir puertos RS-485 u otras interfaces seriales; sin embargo, su uso está orientado a lectura local o integración puntual, no a transmisión continua en red.

2.3.3.3. Limitaciones técnicas

El sistema electrónico presenta las siguientes restricciones técnicas:

Tabla 2.2

Limitaciones técnicas medidor del electrónico en comparación con sistemas inteligentes

Criterio	Medidor Electrónico	Sistema Inteligente (AMI)
Comunicación remota	No permanente	Permanente y bidireccional
Perfil de carga	Limitado o inexistente	Detallado (intervalos programables)
Gestión remota	No disponible	Corte/reconexión y parametrización
Integración con red	Baja	Alta interoperabilidad
Análisis de datos	Local	Centralizado y analítico

Nota. Elaboración propia, 2025.

Si bien el medidor electrónico convencional representa un avance respecto al sistema electromecánico al incorporar cálculo digital y mayor exactitud metrológica, su arquitectura carece de infraestructura de telecomunicaciones, interoperabilidad y capacidades de gestión remota. Estas limitaciones estructurales impiden su integración plena en entornos de red inteligente, donde la comunicación continua, la analítica de datos y el control bidireccional constituyen elementos fundamentales del sistema eléctrico moderno.

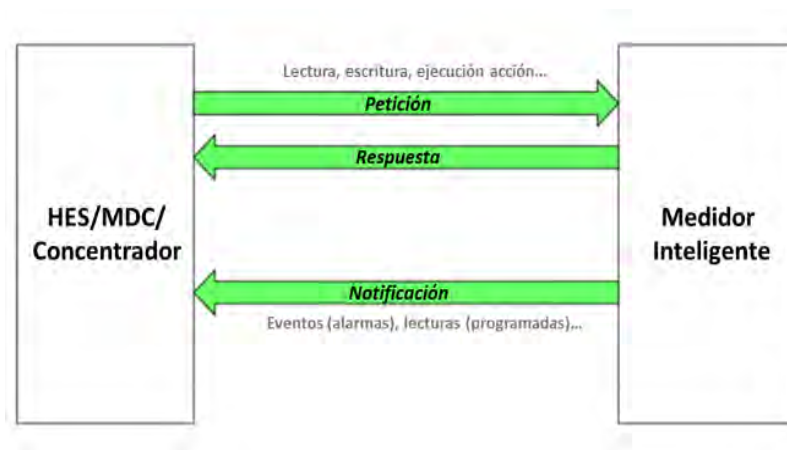
2.3.4. Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)

La Infraestructura de Medición Avanzada (AMI, por sus siglas en inglés Advanced Metering Infrastructure) constituye un sistema integrado que permite la medición, recopilación, análisis y gestión de los datos de consumo de energía eléctrica (y en ocasiones de agua o gas) mediante comunicación bidireccional entre el usuario final y el proveedor del servicio. Según Federal Energy Regulatory Commission (FERC), un sistema AMI se define como un sistema de medición que registra el consumo de clientes cada hora o más frecuentemente y que provee la transmisión diaria o más frecuente de mediciones por medio de una red de comunicación hacia un

punto de colección central, tal como se ve en la Figura 2.6.

Figura 2.6

Comunicación bidireccional de AMI bidireccional



Nota. Ministerio del Ambiente del Perú, 2022.

Los sistemas AMI permiten a las compañías distribuidoras obtener datos granulares de consumo (por intervalos de minutos o sub-horas), identificar comportamientos de demanda, gestionar órdenes remotas (como conexión/desconexión), y facilitar programas de respuesta a la demanda (demand-response). En el contexto del sistema de distribución de electricidad y del modelo de empresa como Electro Sur Este S.A.A., el AMI implica que, además del medidor inteligente, se incorporan otros componentes tales como concentradores de datos (DCU), redes de comunicación, software de gestión de datos, y mecanismos de seguridad, permitiendo así una gestión moderna y más eficiente del servicio.

Los cinco componentes que integran típicamente el AMI son:

- Medidor Inteligente.
- Concentrador de datos (DCU / Access Point).
- Software de gestión de datos (HES/.MDC).
- Red de comunicaciones (alámbrica o inalámbrica).
- Seguridad de los datos (cifrado, autenticación, integridad).

Este esquema permite que los medidores inteligentes no solo registren el consumo, sino que además transmitan la información, reciban órdenes y participen activamente en la optimización de la red. De hecho, la AMI se diferencia de los antiguos sistemas de lectura

automática (AMR) en que se habilita la comunicación bidireccional y la gestión más avanzada del sistema energético.

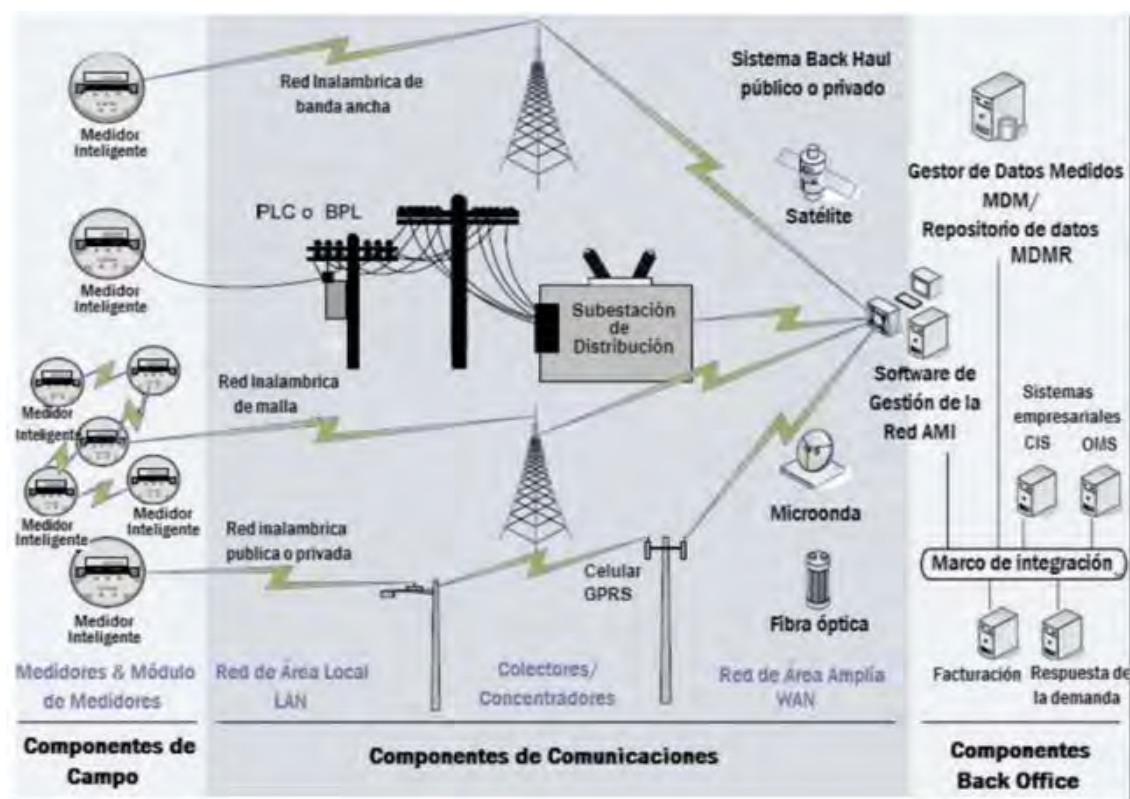
En el caso concreto de Electro Sur Este, se señala que ya está instalada la marca iTechene de medidores inteligentes junto con los concentradores, red de comunicaciones, software MDC y seguridad de datos, gestionados por el proveedor de sistema — lo cual sustituye a los medidores electrónicos que no admitían comunicación bidireccional.

2.3.4.1. Arquitectura AMI

La Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) se configura como un sistema compuesto por medidores inteligentes, redes de comunicación y sistemas de gestión de datos, los cuales, en conjunto, facilitan una comunicación bidireccional efectiva entre las empresas de energía y sus clientes (Ministerio del Ambiente del Perú, 2022), tal como se ve en la Figura 2.7:

Figura 2.7

Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)



Nota. Ministerio del Ambiente del Perú, 2022.

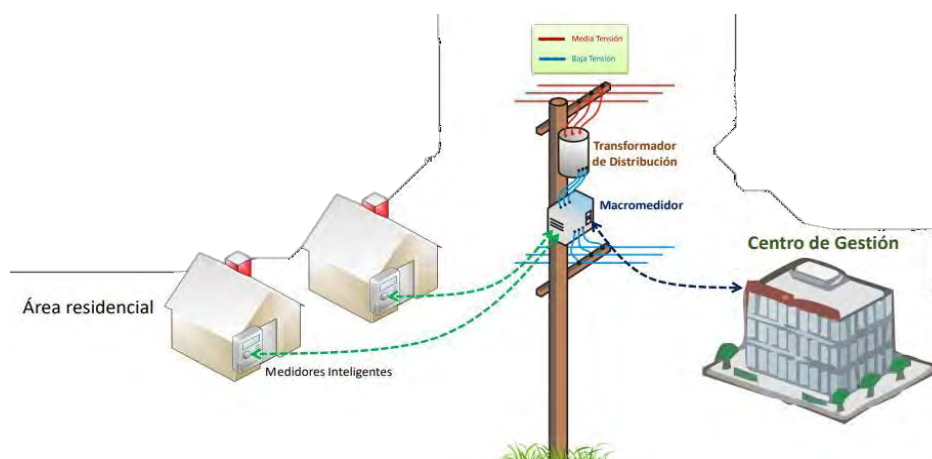
2.3.4.2. Componentes Sistema AMI

Un sistema de Infraestructura de Medición Avanzada está compuesto por un conjunto integrado de dispositivos y plataformas que permiten la medición, transmisión, gestión y análisis de datos eléctricos de manera automatizada y bidireccional. Sus componentes esenciales incluyen: i) medidores inteligentes, encargados de registrar energía, potencia, variables eléctricas y eventos con capacidad de almacenamiento y comunicación; ii) redes de comunicación (PLC, radiofrecuencia mallada, redes celulares o IP), que permiten el intercambio continuo de información entre el campo y los sistemas centrales; iii) unidades concentradoras de datos (DCU), responsables de recopilar y reenviar la información de múltiples medidores; y iv) plataformas de gestión central, principalmente el Head-End System (HES) y el Meter Data Management System (MDMS), donde se realiza la validación, procesamiento, almacenamiento y explotación analítica de los datos (Kabalci, 2016; Gonen, 2014).

Desde el punto de vista normativo y funcional, la interoperabilidad entre estos componentes se apoya en protocolos estandarizados de intercambio de información, como los definidos en la serie de normas de la International Electrotechnical Commission (IEC 62056), que establecen el modelo de objetos y los mecanismos de comunicación para sistemas de medición eléctrica. Esta integración estructural permite no solo la lectura remota de consumos, sino también la supervisión en tiempo casi real, la detección de pérdidas, la gestión de la demanda y la implementación de estrategias de modernización de redes de distribución (Momoh, 2012), tal como se ve en la Figura 2.8.

Figura 2.8

Componentes de la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)



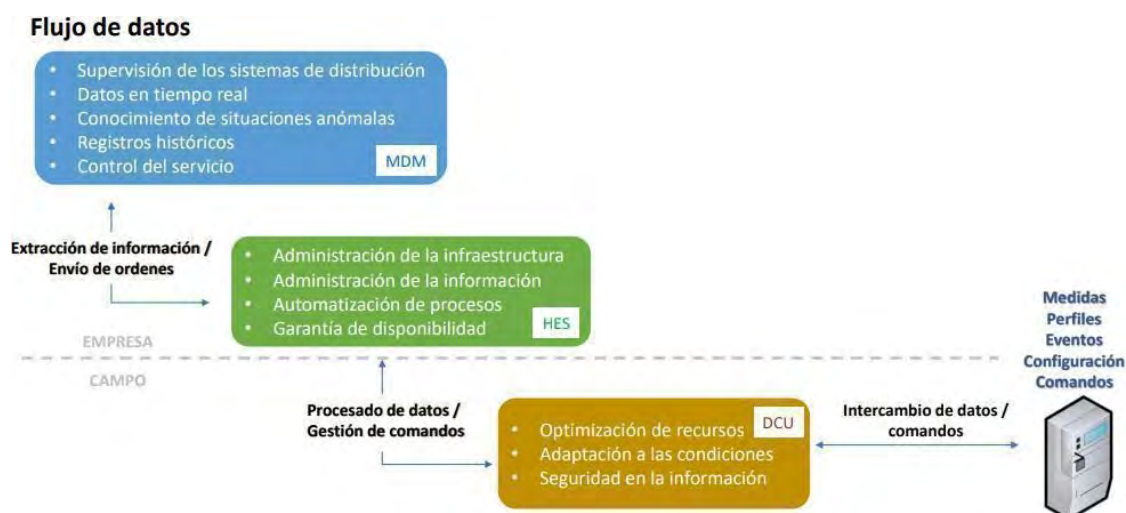
Nota. Ministerio del Ambiente del Perú, 2022.

2.3.4.3. Flujo de datos

El flujo de datos en el Sistema de AMI (Infraestructura de Medición Avanzada) sigue un proceso estructurado que garantiza la recolección, transmisión y procesamiento de información de consumo energético de manera eficiente y precisa. Los medidores inteligentes recopilan datos detallados de uso y los envían a través de redes de comunicación seguras hacia los centros de gestión. Estos datos se almacenan y analizan en plataformas de gestión de datos, lo que permite a las empresas de energía realizar monitoreos en tiempo real, detectar fallas y gestionar la demanda energética de forma óptima. La comunicación bidireccional del sistema permite, además, enviar instrucciones y actualizaciones a los dispositivos en campo, asegurando un flujo de información continuo y controlado entre los usuarios y el proveedor de energía (Ministerio del Ambiente del Perú, 2022), tal como se ve en la Figura 2.9.

Figura 2.9

Flujo de datos



Nota. Ministerio del Ambiente del Perú, 2022.

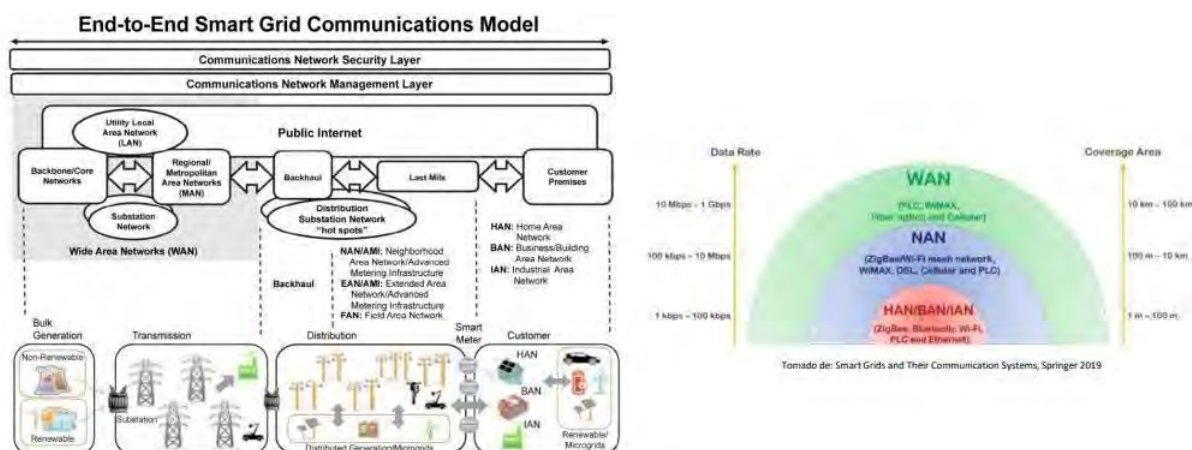
2.3.4.4. Redes de comunicación

Las redes de comunicación en el sistema de Telemedición AMI (Infraestructura de Medición Avanzada) son un componente fundamental que permite la transmisión de datos en tiempo real entre los medidores inteligentes y los centros de gestión. Estas redes soportan la comunicación bidireccional, facilitando la recopilación continua de información sobre el consumo energético y la gestión de incidencias, lo que optimiza tanto el control de la red eléctrica como la respuesta a eventos. Se emplean tecnologías de comunicación como redes de área amplia (WAN),

redes de área metropolitana (MAN) y redes de área local (LAN), adaptadas para la transmisión segura y eficiente de datos, garantizando una infraestructura robusta y flexible que respalda el funcionamiento integral del sistema AMI (Ministerio del Ambiente del Perú, 2022), tal como se ve en la Figura 2.10.

Figura 2.10

Redes de comunicación



Nota. Ministerio del Ambiente del Perú, 2022.

2.3.4.5. Principio de funcionamiento de la comunicación

La Infraestructura de Medición Avanzada (Advanced Metering Infrastructure – AMI) es un sistema integral de medición que incorpora medidores inteligentes, redes de comunicación y plataformas de gestión centralizada, permitiendo el intercambio bidireccional de información entre el usuario y la empresa distribuidora. Su principio de funcionamiento se basa en la transmisión automatizada, segura y periódica de datos eléctricos mediante protocolos estandarizados.

La estructura funcional del sistema AMI se da de la siguiente forma, primero se define el funcionamiento de la comunicación AMI se organiza en tres niveles jerárquicos:

- **Nivel de campo (Smart Meter):** El medidor inteligente registra variables eléctricas (energía activa/reactiva, potencia, tensión, corriente, eventos y perfil de carga). La información es procesada digitalmente y almacenada en memoria interna.
- **Nivel de concentración (Data Concentrator Unit – DCU):** Actúa como nodo intermedio que agrupa la información de múltiples medidores y la transmite hacia el sistema central. Puede gestionar cientos o miles de equipos.
- **Nivel central (Head-End System – HES / MDMS):** Recibe, valida, almacena y procesa los

datos para facturación, análisis técnico, detección de pérdidas y gestión operativa.

Este esquema establece una arquitectura de red distribuida con capacidad de supervisión continua, luego se estudia el principio de transmisión de datos, para esto, el proceso de comunicación sigue una secuencia estructurada de la siguiente manera:

- Captura y procesamiento local: el medidor calcula magnitudes eléctricas mediante muestreo digital.
- Formateo y encapsulamiento: los datos se organizan bajo protocolos normalizados, principalmente DLMS/.COSEM, definidos en la serie de normas de la International Electrotechnical Commission (IEC 62056).
- Transmisión por red de acceso: la información se envía al concentrador o directamente al sistema central mediante: PLC (Power Line Communication), RF Mesh, Redes celulares (GPRS/.3G/4G/5G) ó Enlaces IP dedicados
- Recepción y validación central: el sistema HES/.MDMS valida integridad, auténtica dispositivos y almacena la información en bases de datos estructuradas.
- Comunicación bidireccional: el centro de control puede enviar comandos al medidor (corte, reconexión, actualización de parámetros, sincronización horaria).

2.3.4.6. Monitoreo de la medición inteligente

El procedimiento de medición en sistemas AMI (Infraestructura de Medición Avanzada) inicia con la instalación de medidores inteligentes en los puntos de consumo. Estos dispositivos están equipados con sensores avanzados que registran, de manera continua, parámetros como el consumo de energía, voltaje, corriente y calidad del servicio. Los medidores operan de forma autónoma, recopilando datos a intervalos regulares, generalmente configurados por la empresa distribuidora, lo que asegura un monitoreo constante y preciso.

Una vez recopilados, los datos son transmitidos automáticamente a través de una red de comunicación. Dependiendo de la infraestructura disponible, esta transmisión puede realizarse mediante tecnologías como PLC (comunicación por líneas de energía), redes de radiofrecuencia, redes celulares o fibra óptica. El sistema también permite la comunicación bidireccional, lo que significa que los operadores pueden enviar comandos a los medidores para realizar ajustes, cortes remotos o verificaciones sin necesidad de intervención física. Se muestra en la Figura 2.11

Figura 2.11

Integración a la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)



Nota. Ministerio del Ambiente del Perú, 2022.

Los datos llegan a una plataforma de gestión centralizada, donde se procesan y analizan. Aquí, se validan las lecturas para identificar posibles anomalías, como picos de consumo inusuales o pérdidas de energía. Este sistema permite generar reportes detallados para la facturación, proporcionar información a los consumidores a través de portales o aplicaciones, y optimizar la operación de la red eléctrica mediante el análisis en tiempo real de los patrones de consumo. Este enfoque asegura mayor precisión, eficiencia y transparencia en la gestión del servicio eléctrico, tal como se ve en la Figura 2.12.

Figura 2.12

Comunicación bidireccional mediante el medidor inteligente



Nota. Información útil medición-inteligente, ENEL, 2025.

2.3.5. Medidor inteligente

El medidor inteligente constituye el corazón del sistema AMI. A diferencia del medidor electrónico convencional, incorpora funcionalidades de comunicación avanzada (bidireccional), registro granular de consumo (cada 5, 10, 15 o 30 minutos), y control remoto de parámetros del servicio. Permite que el distribuidor y el usuario final interactúen de manera continua: por ejemplo, el usuario puede acceder a su perfil de consumo en línea, y la empresa puede emitir órdenes de corte, ajuste tarifario o detectar anomalías en el suministro en tiempo casi real. Esta evolución es clave en los esquemas de red inteligente (smart grid) ya que facilita la integración de generación distribuida, almacenamiento, respuesta a la demanda y mejores prácticas de eficiencia energética, tal como se ve en la Figura 2.13.

Figura 2.13

Medidor inteligente iTechene



Nota. Medidor inteligente monofásico marca iTechene. Electro sur este S.A.A., 2025.

2.3.5.1. Principio de medición inteligente

El principio de medición inteligente se fundamenta en la adquisición digital de variables eléctricas mediante técnicas de muestreo de alta precisión, procesamiento numérico y almacenamiento estructurado de información. A diferencia de los medidores convencionales, el medidor inteligente no solo calcula energía acumulada, sino que registra perfiles de carga, eventos eléctricos y parámetros de calidad de suministro. El proceso inicia con la captación de tensión y corriente a través de sensores (divisores resistivos, transformadores de corriente o shunts), cuyas señales son acondicionadas y convertidas a formato digital mediante convertidores analógico–digitales (ADC) de alta resolución. Un circuito integrado de medición o microcontrolador ejecuta algoritmos que determinan potencia activa, reactiva y aparente a partir del producto instantáneo

de las señales muestreadas, realizando la integración discreta para el cálculo de energía en intervalos programables (Gonen, 2014).

El carácter “inteligente” radica en que el sistema incorpora capacidades adicionales de sincronización temporal, almacenamiento de perfiles con marcas de tiempo, autodiagnóstico y registro de eventos (interrupciones, variaciones de tensión, intentos de manipulación), integrándose a plataformas externas mediante protocolos normalizados como los definidos por la International Electrotechnical Commission (serie IEC 62056). De esta forma, la medición deja de ser únicamente acumulativa y se convierte en una fuente estructurada de datos para análisis operativo, gestión de la demanda y optimización de redes eléctricas (Kabalci, 2016; Momoh, 2012).

2.3.5.2. Principio de funcionamiento de la comunicación

El medidor inteligente forma parte de una Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), cuya característica esencial es la comunicación bidireccional permanente entre el medidor instalado en el usuario y el centro de control de la empresa distribuidora. A diferencia de los medidores convencionales, la comunicación no depende de intervención física, sino de una arquitectura de telecomunicaciones integrada, donde primero se da la arquitectura general de comunicación AMI, el principio de funcionamiento se sustenta en una estructura jerárquica compuesta por tres niveles:

- Nivel de medición (Smart Meter): El medidor registra variables eléctricas (energía, potencia, tensión, corriente, eventos) mediante procesamiento digital interno.
- Nivel de concentración (Data Concentrator Unit – DCU): Agrupa información de múltiples medidores dentro de un área geográfica.
- Nivel central (Head-End System – HES / Centro de Control): Recibe, almacena y procesa los datos para facturación, análisis y gestión operativa.

Este modelo permite transmisión continua o programada de datos en intervalos definidos (15 min, 30 min, 1 h, etc.). Luego los medios de comunicación, el canal de transmisión puede implementarse mediante diferentes tecnologías:

- PLC (Power Line Communication): utiliza la propia red eléctrica como medio de transmisión.
- RF Mesh: red mallada por radiofrecuencia.

- GPRS/.3G/4G/5G: redes celulares.
- Ethernet o fibra óptica (en aplicaciones específicas).

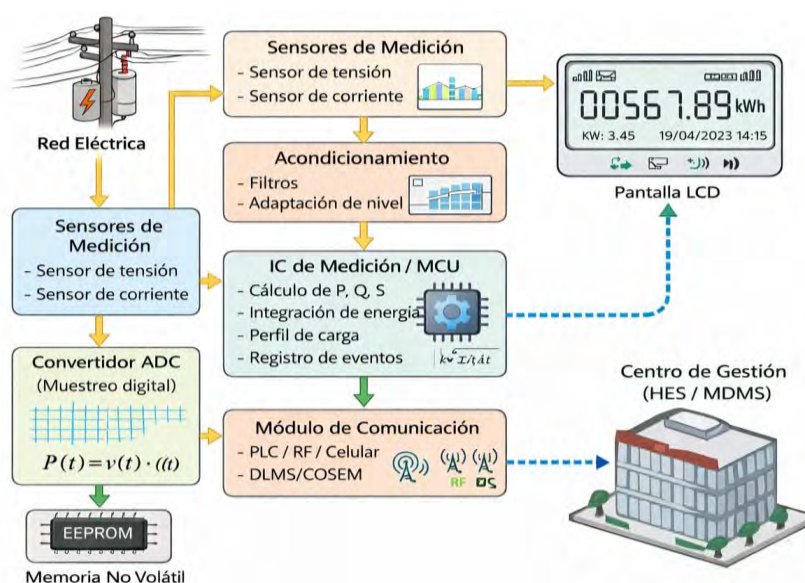
La selección depende de la topología de red, densidad de usuarios y condiciones geográficas (Kabalcí, 2016). Finalmente para el principio de intercambio de datos, el proceso de comunicación sigue la siguiente secuencia funcional:

- El medidor adquiere y procesa datos eléctricos.
- La información es almacenada en memoria interna.
- Un módulo de comunicación integrado encapsula los datos bajo un protocolo estandarizado (por ejemplo, DLMS/.COSEM).
- El paquete es transmitido al concentrador o directamente al sistema central.
- El sistema central puede enviar comandos de retorno (corte, reconexión, actualización de parámetros).

Esta bidireccionalidad permite no solo lectura remota, sino también control operativo del suministro eléctrico. Según la International Electrotechnical Commission (serie IEC 62056), los protocolos DLMS/.COSEM establecen el marco de intercambio de datos para sistemas de medición avanzada, asegurando interoperabilidad y estandarización internacional, tal como se ve en la Figura 2.14.

Figura 2.14

Diagrama de funcionamiento de un medidor inteligente



Nota. Elaboración propia, 2026.

2.3.6. Concentrador de Datos - DCU

El Data Concentrator Unit (DCU) se sitúa como nodo intermedio que agrupa la información de varios medidores inteligentes en el campo y la transmite al sistema central de gestión mediante una red de comunicaciones (celular, PLC, fibra, radio, etc.). Ubicado típicamente en el secundario de un transformador de distribución, el DCU supervisa de forma local los medidores conectados, gestiona la comunicación con la infraestructura central y puede realizar tareas de supervisión, diagnóstico y reenvío de datos. En un sistema moderno de medición inteligente, el DCU puede considerarse la “columna vertebral” de la AMI, pues actúa como enlace esencial entre el medidor inteligente y la infraestructura de back-office, tal como se ve en la Figura 2.15.

Figura 2.15

Concentrador de Datos - DCU iTechene



Nota. Concentrador de Datos - DCU marca iTechene. Electro Sur Este S.A.A., 2025.

2.3.7. Software HES - Meter Data Collection (MDC)

El software de nivel HES (Head End System) o MDC (Meter Data Collection) es la plataforma de gestión de datos que recibe, procesa, valida, almacena y analiza los datos recogidos por los medidores inteligentes a través de la AMI, tal como se ve en la Figura 2.16. Entre sus funciones se encuentran:

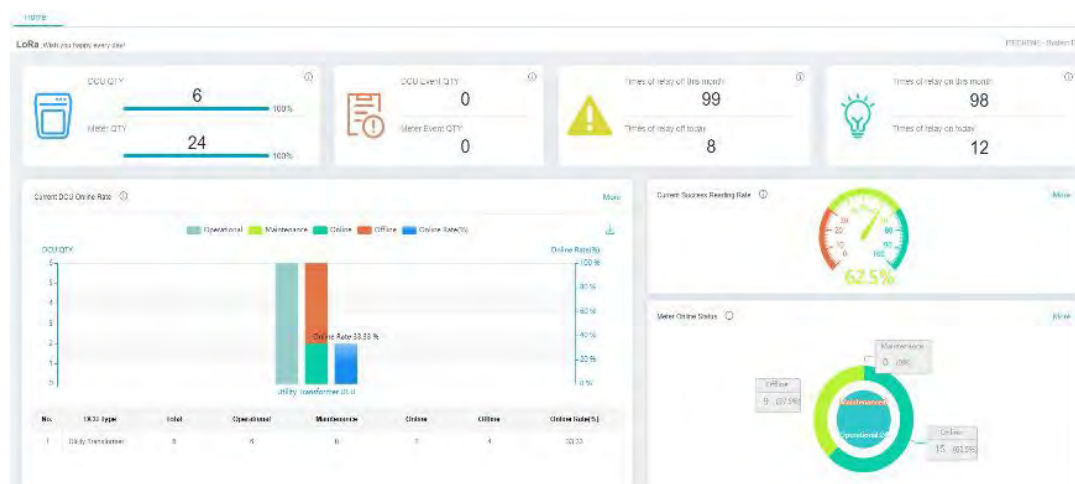
- Recolección automatizada de lecturas de consumo y otros parámetros (voltaje, corriente, potencia, etc.).

- Monitoreo de cortes y detección de manipulación o fraude.
- Integración con sistemas de facturación, gestión de clientes, mantenimiento de redes y respuesta a eventos.
- Visualización para usuarios finales y operadores del sistema eléctrico.

Este sistema permite aumentar la precisión, consistencia y frecuencia de los datos, así como habilitar nuevas aplicaciones de valor agregado como tarifas dinámicas, gestión de demanda, calidad de energía y alertas de servicio. Por ejemplo, se señala que el MDC “permite la comunicación bidireccional entre medidores, distintos sistemas empresariales y usuarios finales, ampliando la frecuencia, la usabilidad, la granularidad y el volumen de datos al borde de la red”.

Figura 2.16

Interfaz Gráfica de MDC



Nota. Interfaz Gráfica de MDC, Electro Sur Este S.A.A., 2025.

2.3.8. Operaciones técnico-comerciales

Los procesos técnico-comerciales son el conjunto de actividades operativas y administrativas que permiten gestionar adecuadamente la medición, facturación, suspensión, restablecimiento y verificación del consumo de energía eléctrica en los usuarios finales. Estas actividades se encuentran normadas y estandarizadas por cada empresa distribuidora, bajo la supervisión del organismo regulador OSINERGMIN (OSINERGMIN, 2021).

En empresas de distribución y comercialización eléctrica como Electro Sur Este S.A.A., los procesos de toma de lectura, corte, reconexión y detección de pérdidas no técnicas se realizan principalmente de manera presencial y manual, lo cual implica el desplazamiento de personal

técnico hacia los puntos de suministro para intervenir, registrar y validar la información asociada al consumo eléctrico (Electro Sur Este S.A.A., 2017).

2.3.8.1. Proceso de toma de lectura

La toma de lectura consiste en registrar los valores de consumo acumulado mostrados en el medidor eléctrico para calcular la facturación mensual correspondiente al usuario. Este proceso es crítico para la administración comercial del servicio, ya que asegura la correcta determinación del monto a pagar (MINEM, 2023).

La secuencia de ejecución es:

- Se programa la ruta de lectura, organizada por zonas o libros.
- Se verifica el estado de herramientas y equipos de protección personal.
- El lector se desplaza al predio e identifica el medidor asignado.
- Se inspecciona visualmente la caja de medición, sellos y condiciones físicas.
- Se registra la lectura mostrada en el medidor.
- Si la lectura es ilegible, se reporta para corrección o inspección.
- Se almacena la información en el sistema comercial.
- Se valida el registro para emisión de facturación posterior.

La toma de lectura es una actividad rutinaria pero esencial para asegurar la transparencia y precisión de la facturación. Al ejecutarse de manera manual, puede verse afectada por errores humanos, inaccesibilidad del medidor o dificultades de interpretación visual (OSINERGMIN, 2022).

2.3.8.2. Proceso de corte del servicio

El corte de servicio consiste en la suspensión temporal del suministro eléctrico al usuario debido a falta de pago, solicitud del cliente o disposición de la empresa distribuidora. Este procedimiento busca asegurar la sostenibilidad económica del sistema y el cumplimiento contractual del servicio (MINEM, 2022).

a) Corte Tipo 1A / 1B (en fusible o interruptor)

- Recepción del listado de suministros a cortar.

- Verificación previa de información del usuario.
- Señalización y aseguramiento del área de trabajo.
- Apertura de la caja de medición (con o sin ranura).
- Desconexión del conductor o apertura del interruptor.
- Colocación de sticker y sello de seguridad.
- Registro de la intervención y reporte al sistema comercial.

b) Corte Tipo II (en borneras del medidor)

Similar al tipo 1, pero la intervención se realiza en el punto de conexión del medidor, aislando los terminales de acometida.

c) Corte Tipo III (en línea aérea)

Se realiza directamente en el empalme aéreo, requiriendo maniobras en altura y mayor protección. El corte de suministro es un proceso crítico que requiere personal técnico especializado, protocolos de seguridad y registro documental. Al depender del desplazamiento físico, puede resultar costoso y lento para la empresa distribuidora.

2.3.8.3. Proceso de reconexión del servicio

La reconexión es el restablecimiento del suministro eléctrico una vez subsanada la causa del corte, ya sea mediante el pago de la deuda o la corrección de una irregularidad (OSINERGMIN, 2021).

Secuencia típica:

- Confirmación del cumplimiento de obligaciones del usuario (pago o regularización).
- Verificación del suministro en campo.
- Intervención física para reconectar el medidor o acometida.
- Reinstalación de precintos y dispositivos de seguridad.
- Registro en el sistema comercial.

La reconexión restablece el servicio al usuario y debe realizarse garantizando seguridad y continuidad operativa. La naturaleza presencial del proceso implica tiempos de respuesta variables.

2.3.8.4. Proceso de detección de hurtos de energía

Este proceso busca identificar y corregir consumos no registrados derivados de conexiones clandestinas, manipulación de medidores o alteración del sistema de medición (MINEM, 2023).

Secuencia:

- Análisis de balances energéticos (energía comprada vs. facturada).
- Identificación de consumos sospechosos.
- Inspección en campo del medidor y conexiones.
- Registro de evidencia (fotografías, actas, pruebas).
- Cálculo de energía no facturada.
- Notificación y procedimiento de sanción.

La detección de hurtos es un proceso reactivo y manual, y puede presentar limitaciones en la capacidad de respuesta temprana, lo que favorece pérdidas económicas sostenidas.

Los procesos descritos dependen en gran medida de la intervención presencial, lo que genera costos operativos elevados, tiempos prolongados de atención, riesgos de errores humanos y dificultades para la detección temprana de irregularidades. Por ello, en los últimos años se ha promovido el uso de tecnologías de medición inteligente y monitoreo remoto como alternativa de mejora (OSINERGMIN, 2021; MINEM, 2023).

2.3.9 Diseño de Medidores Inteligentes

2.3.9.1 Concepto de diseño de medidores inteligentes

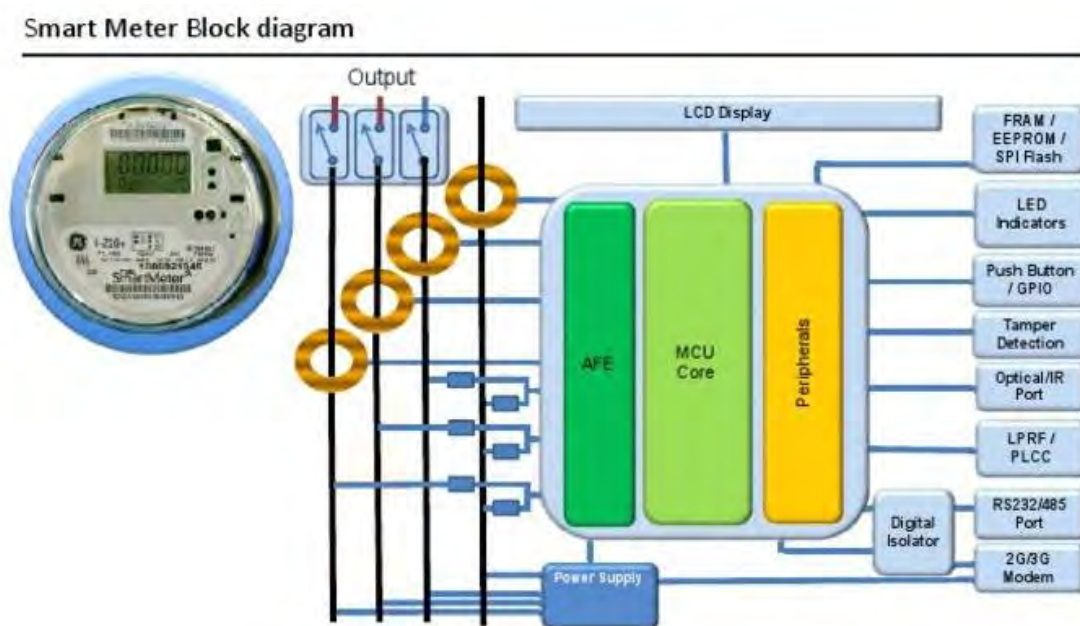
El diseño de un medidor inteligente comprende el proceso de selección, integración y configuración de componentes electrónicos, sistemas de medición, unidades de procesamiento y tecnologías de comunicación que permiten registrar, procesar y transmitir información relacionada con el consumo de energía eléctrica. A diferencia de los medidores convencionales, los medidores inteligentes incorporan capacidades de procesamiento digital y comunicación bidireccional, permitiendo la interacción entre el usuario y la empresa distribuidora mediante plataformas de supervisión remota.

Según Gungor et al. (2013), un medidor inteligente constituye un nodo de adquisición de datos dentro de una infraestructura AMI, capaz de medir variables eléctricas en tiempo real,

almacenar información histórica y transmitir datos mediante diferentes tecnologías de comunicación como PLC, RF, Wi-Fi o redes celulares. El diseño de estos dispositivos debe garantizar precisión metrológica, confiabilidad operativa, seguridad eléctrica y compatibilidad con protocolos de comunicación utilizados en sistemas de gestión energética.

Figura 2.17

Arquitectura general de un medidor inteligente



Nota. Smart Meters for Power Grid, 2021.

La figura anterior muestra los principales bloques funcionales de un medidor inteligente, los cuales son los sensores, el acondicionamiento de señal, el procesamiento digital y las comunicaciones.

2.3.9.2 Etapas funcionales del diseño de un medidor inteligente

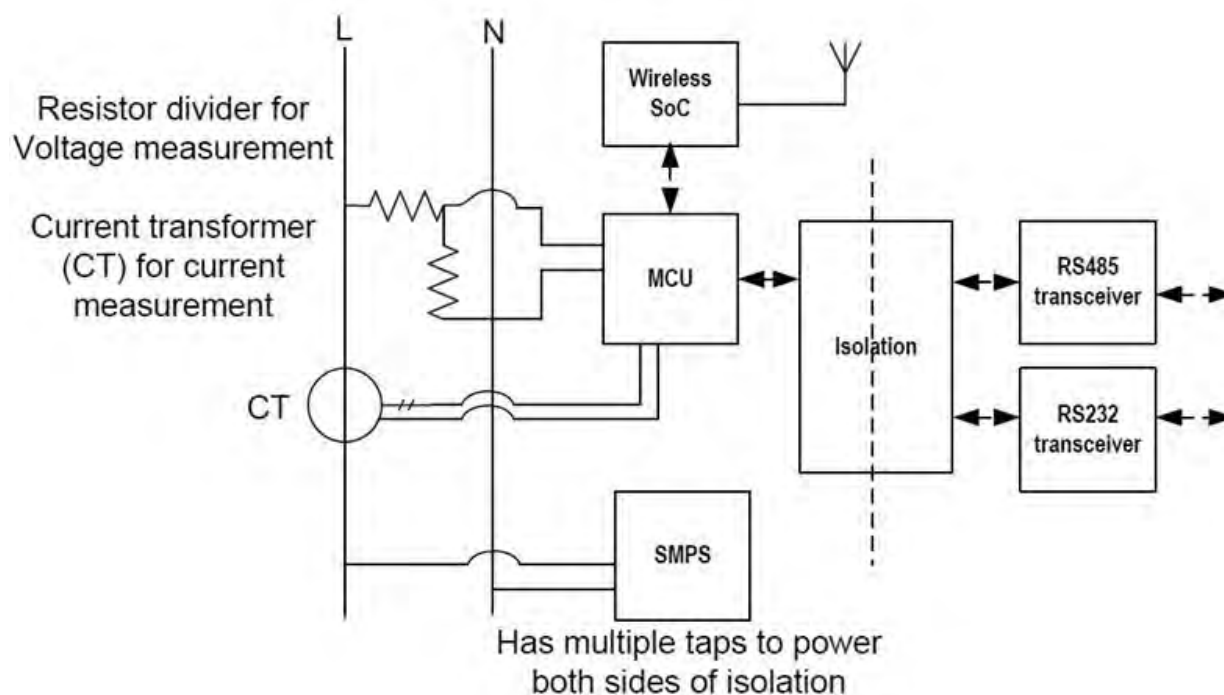
El diseño funcional de un medidor inteligente puede dividirse en cuatro etapas principales:

- a) **Etapas de adquisición de señales:** Consiste en la captación de las variables eléctricas presentes en la red, principalmente tensión y corriente. Para ello se utilizan sensores de tensión, divisores resistivos, transformadores de corriente (TC), sensores Hall o resistencias shunt.

La finalidad de esta etapa es adaptar los niveles eléctricos de la red a valores compatibles con los circuitos electrónicos internos del sistema de medición.

Figura 2.18

Etapa de adquisición de señales eléctricas



Nota. ATM90E32 Energy Metering IC Application Note, 2021.

b) Etapa de acondicionamiento de señal: Las señales provenientes de los sensores requieren filtrado y adecuación para ser procesadas correctamente por los convertidores analógico-digitales.

Esta etapa puede incluir:

- Amplificadores operacionales.
- Filtros pasa bajos.
- Circuitos de aislamiento galvánico.
- Protección contra sobretensiones.

El objetivo es minimizar errores de medición y mejorar la relación señal-ruido.

c) Etapa de procesamiento digital: Una vez acondicionadas las señales, estas son

convertidas a formato digital mediante convertidores ADC. Posteriormente, un microcontrolador o circuito integrado especializado realiza los cálculos eléctricos correspondientes.

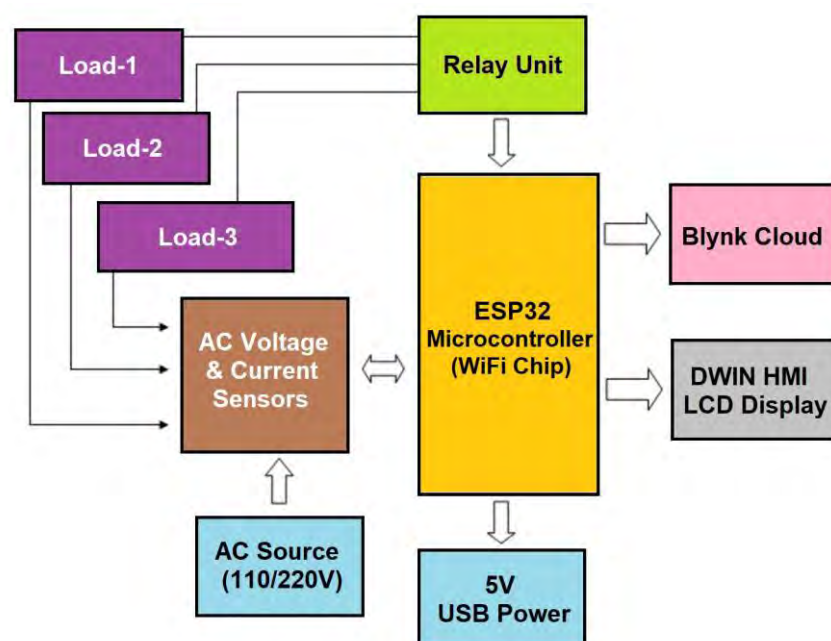
Entre los parámetros calculados se encuentran:

- Voltaje RMS.
- Corriente RMS.
- Potencia activa.
- Potencia reactiva.
- Potencia aparente.
- Factor de potencia.
- Energía acumulada.

En el caso de sistemas basados en IoT, microcontroladores como ESP32 permiten integrar simultáneamente funciones de medición y comunicación.

Figura 2.19

Procesamiento digital en medidores inteligentes



Nota. ESP32 Series Datasheet, 2024.

- d) **Etapas de comunicación:** La información calculada debe transmitirse hacia sistemas externos para su almacenamiento y análisis.

Las tecnologías más utilizadas son:

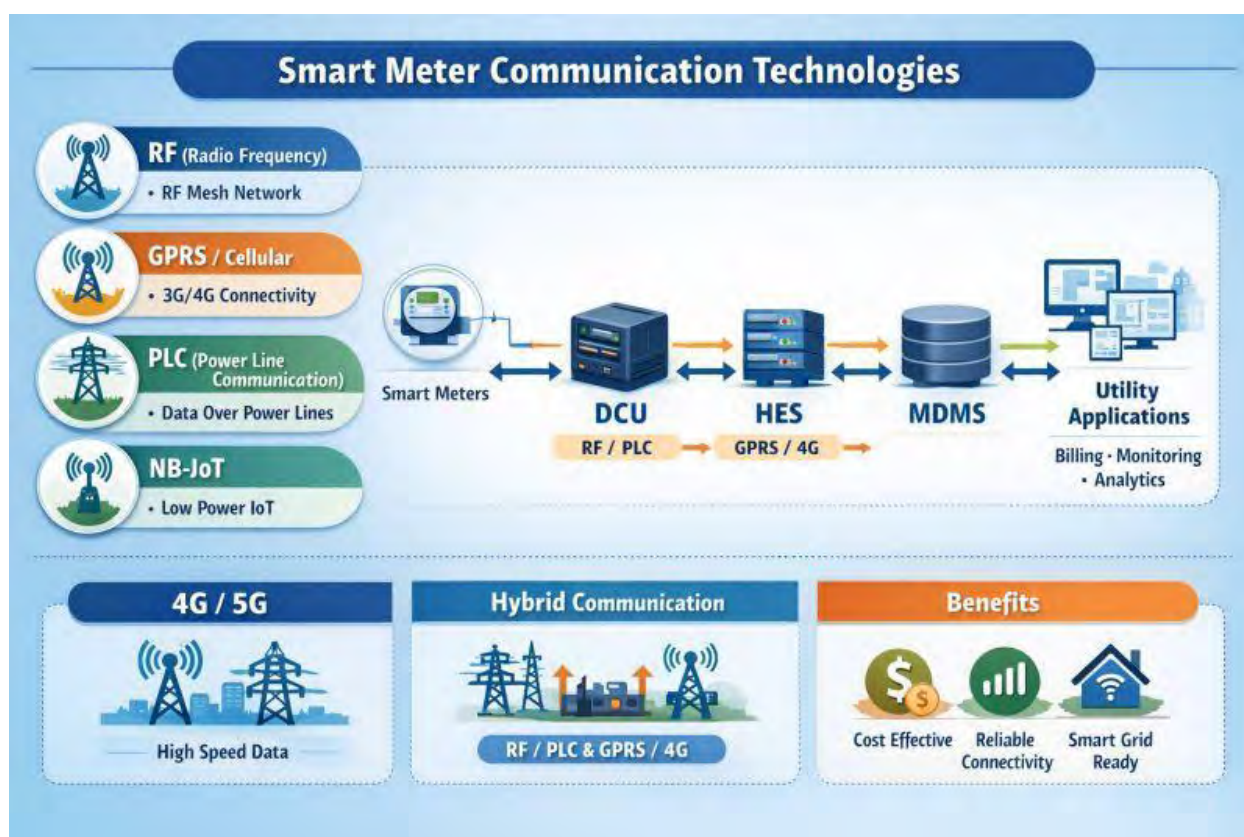
- PLC (Power Line Communication).
- RF Mesh.
- Wi-Fi.
- ZigBee.
- LoRaWAN.
- Redes celulares 4G/5G.

La elección de la tecnología depende de factores como cobertura, costo, velocidad de transmisión y facilidad de implementación.

Según Mahmood et al. (2015), la comunicación bidireccional constituye uno de los elementos fundamentales que diferencian a los medidores inteligentes de los medidores electrónicos convencionales.

Figura 2.20

Tecnologías de comunicación empleadas en medidores inteligentes



Nota. Gungor et al., 2023.

2.3.9.3 Criterios de diseño de medidores inteligentes

Durante el desarrollo de un medidor inteligente deben considerarse diversos criterios técnicos:

- a) **Precisión de medición:** La precisión determina la capacidad del medidor para registrar correctamente la energía consumida.

Las normas IEC 62053 establecen clases de precisión para medidores de energía activa:

- Clase 0.2S
- Clase 0.5S
- Clase 1
- Clase 2

Mientras menor sea el número de clase, mayor será la exactitud del instrumento.

- b) **Seguridad eléctrica:** El diseño debe contemplar:

- Protección contra sobretensiones.
- Aislamiento galvánico.
- Protección contra cortocircuitos.
- Compatibilidad electromagnética.
- Escalabilidad

El sistema debe permitir la integración de múltiples dispositivos dentro de una misma plataforma AMI.

- c) **Interoperabilidad:** Debe garantizar compatibilidad con protocolos abiertos y plataformas de gestión energética.

2.3.9.4 Diseño basado en IoT para medición inteligente

El Internet de las Cosas (IoT) ha permitido desarrollar medidores inteligentes de bajo costo

capaces de transmitir información en tiempo real mediante redes IP.

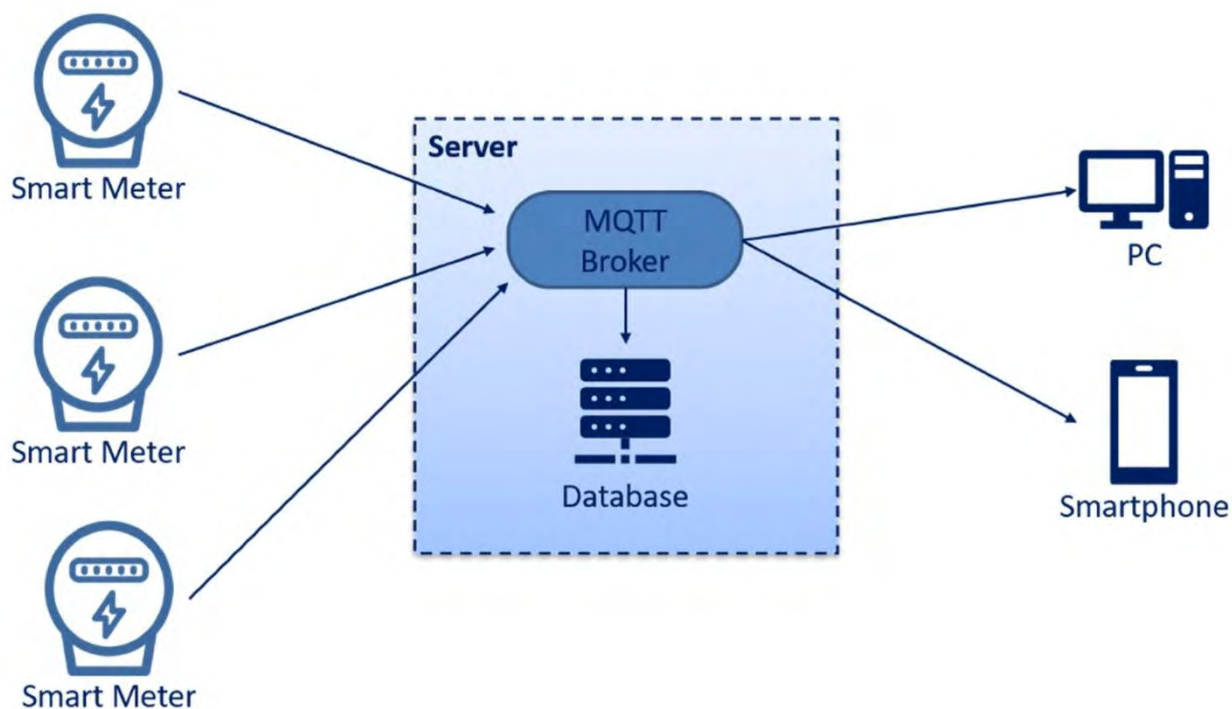
Los sistemas IoT aplicados a medición eléctrica incorporan:

- Sensores eléctricos.
- Microcontroladores con conectividad.
- Protocolos MQTT.
- Plataformas de supervisión.
- Aplicaciones móviles.

En investigaciones recientes, el ESP32 se ha convertido en una de las plataformas más utilizadas debido a su bajo costo, conectividad Wi-Fi integrada y capacidad de procesamiento.

Figura 2.21

Arquitectura IoT aplicada a medidores inteligentes



Nota. Mahmood et al., 2025.

CAPÍTULO III: DIAGNÓSTICO DEL ESTUDIO

3.1. Introducción

El Capítulo III describe la situación actual del sistema piloto de telemedición en la ciudad del Cusco, donde se evidencian avances parciales en la implementación de la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) por parte de la empresa Electro Sur Este S.A.A., la cual cuenta con 176 223 suministros eléctricos distribuidos en los distritos de Cusco, Santiago, San Sebastián, San Jerónimo, Wanchaq y Ccorca. De este total, solo 2,178 suministros (1,24 %) cuentan con medidores inteligentes conectados al sistema AMI mediante 13 concentradores ubicados estratégicamente en 09 subestaciones de distribución. Este reducido porcentaje demuestra la necesidad de ampliar el alcance de la medición inteligente en los usuarios residenciales, con el fin de mejorar la eficiencia operativa, la detección de pérdidas y la calidad del servicio eléctrico. En este contexto, el capítulo desarrolla la descripción técnica y funcional del sistema AMI existente, su arquitectura, componentes, flujo de datos, redes de comunicación y proceso de monitoreo. Asimismo, se presenta la evolución tecnológica de los medidores (desde los electromecánicos hasta los inteligentes) y las ventajas que ofrece la comunicación bidireccional en tiempo real entre usuario y empresa distribuidora. Esta información permite comprender el entorno tecnológico sobre el cual se diseña el prototipo de medidor inteligente, planteado como una alternativa innovadora, escalable y compatible con las condiciones del sistema eléctrico cusqueño (Cahuana Yapo, 2020; Ministerio del Ambiente del Perú, 2022; Electro Sur Este S.A.A., 2025).

3.2. Diagnóstico del Sistema AMI piloto

El sistema de telemedición avanzada (AMI) piloto instalado en empresas distribuidoras de energía eléctrica, como Electro Sur Este S.A.A., ha permitido evaluar en campo el desempeño de la infraestructura de comunicación, la precisión de los medidores inteligentes y la gestión de datos energéticos. Sin embargo, se han identificado limitaciones relacionadas con la pérdida de conexión entre concentradores y medidores, la saturación del canal de datos y las deficiencias en la cobertura de red, lo que afecta directamente la continuidad y confiabilidad de las operaciones técnico-comerciales. Este diagnóstico evidencia la necesidad de diseñar e implementar un prototipo de medidor inteligente adaptado a las condiciones locales, que mejore la recolección y transmisión de datos energéticos, optimizando así la facturación, detección de pérdidas y control remoto de suministros (Rodríguez & Quispe, 2022), tal como se ve en la Figura 3.1 y Tabla 3.1.

Figura 3.1

Ubicación geográfica de los concentradores de datos DCU



Nota. GIS - Electro Sur Este S.A.A., 2025.

Así mismo en la siguiente Tabla 3.1 se detallan las ubicaciones de las SED's del AMI piloto:

Tabla 3.1

Coordenadas de ubicación de las SED's

Código SED	Coordenadas Geográficas	
	Longitud	Latitud
0010010	-71.97826403	-13.51872191
0010041	-71.97699486	-13.51759584
0010171	-71.97875656	-13.51546602
0010191	-71.98025903	-13.51971367
0010194	-71.98220507	-13.5166169
0010200	-71.97865476	-13.52096051
0010201	-71.97767116	-13.51870048
0010203	-71.97895233	-13.51454555
0010208	-71.97495461	-13.51918662

Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2025.

3.3. Descripción del sistema AMI piloto

El Sistema de Medición Inteligente o SMI que está actualmente implementado se compone de cuatro elementos principales: los equipos de medición inteligente (medidores inteligentes trifásicos y monofásicos, y concentradores de datos), la red de comunicación, el centro de datos y la aplicación de gestión. Cada uno de estos componentes cumple un papel esencial dentro del sistema de telemedición, garantizando la captura, transmisión y análisis eficiente de los datos energéticos.

En cuanto al equipamiento instalado, el sistema contempla el uso de:

- Medidores monofásicos de dos hilos modelo TA35R
- Medidores trifásicos de tres hilos modelo TC35W3
- Concentradores de datos modelo TD12

Todos pertenecientes a la marca iTechene, los cuales cuentan con sus respectivos códigos de homologación según los registros del INACAL (Códigos DM/HLE-009-2021 y DM/HLE-003-2021). Estos dispositivos están diseñados para integrarse en una arquitectura de comunicación inteligente que posibilita la lectura remota, la gestión de incidencias y la optimización de las operaciones técnico-comerciales del sistema eléctrico (Cahuana Yapó, 2020; Ministerio del Ambiente del Perú, 2022).

En la siguiente figura se muestra la arquitectura funcional del sistema AMI piloto implementado por la empresa Electro Sur Este S.A.A., la cual se estructura en cuatro niveles principales: equipos de medición inteligente, red de comunicación, centro de datos y aplicación de gestión.

En el nivel inferior, correspondiente a los equipos de medición inteligente, se encuentran los medidores monofásicos y trifásicos instalados en los usuarios finales. Estos dispositivos registran las variables eléctricas del consumo energético y se comunican con un concentrador de datos (DCU – Data Concentrator Unit). La comunicación entre los medidores y el concentrador se realiza mediante tecnología PLC G3 (Power Line Communication), que utiliza la propia red eléctrica de baja tensión como medio de transmisión de datos.

Posteriormente, en el nivel de red de comunicación, el concentrador de datos transmite la información recopilada hacia el centro de control utilizando redes de telecomunicaciones móviles,

tales como GPRS, 3G o 4G. Este enlace permite transportar los datos desde el campo hacia los servidores centrales de la empresa distribuidora.

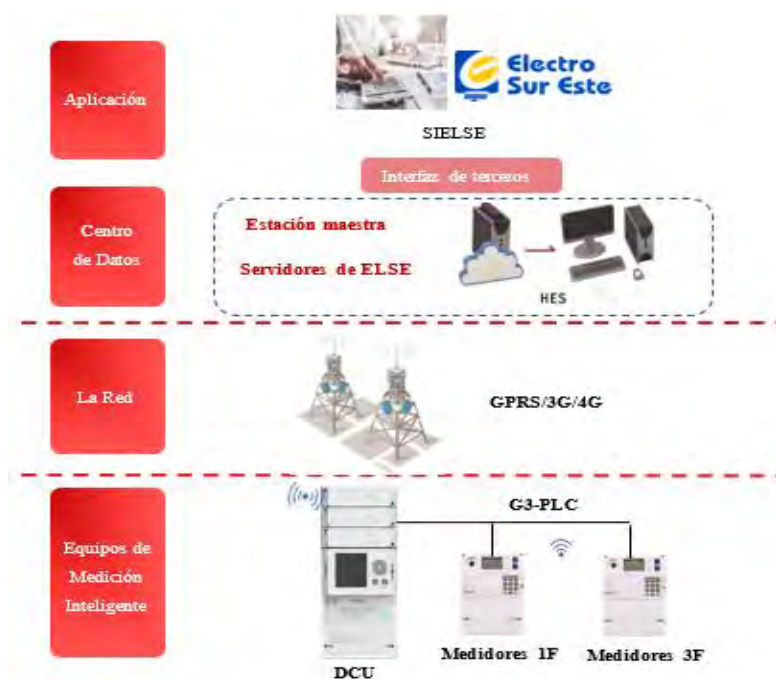
En el nivel de centro de datos, la información es recibida y gestionada por los servidores del sistema HES (Head End System), que constituyen la estación maestra encargada de administrar la comunicación con los dispositivos de medición. Este sistema permite la recopilación, almacenamiento y procesamiento de los datos provenientes de los medidores inteligentes.

Finalmente, en el nivel de aplicación, los datos procesados se integran al sistema SIELSE, el cual funciona como plataforma de gestión utilizada por la empresa para el análisis de información, monitoreo del consumo energético, gestión de incidencias y soporte a las operaciones técnico-comerciales del sistema eléctrico.

De esta manera, la arquitectura AMI permite establecer un flujo continuo de información desde los medidores instalados en campo hasta las plataformas de gestión centralizadas, facilitando la telemedición, supervisión y optimización del sistema de distribución eléctrica, tal como se ve en la Figura 3.2.

Figura 3.2

Diseño del proyecto piloto de la empresa Electro Sur Este S.A.A.



Nota. Martinez y Magallanes, 2023.

Dentro del Sistema de Medición Inteligente (SMI), la red se define como el medio de comunicación que conecta el concentrador de datos (DCU) con el Centro de Datos, permitiendo la transmisión bidireccional de información. En el caso del proyecto piloto, esta comunicación se realiza a través de la red 3G/4G (red celular o telefonía móvil) proporcionada por una empresa de telecomunicaciones externa, cuya estabilidad y calidad del servicio resultan determinantes para el correcto funcionamiento del sistema (Ministerio del Ambiente del Perú, 2022).

El Centro de Datos corresponde a la infraestructura tecnológica de Electro Sur Este S.A.A. (ELSE), donde se implementó el software MDC Power Gate, encargado de centralizar la información proveniente de los medidores inteligentes. Desde esta plataforma se gestionan las operaciones de supervisión, control y análisis del SMI, asegurando la integridad y disponibilidad de los datos energéticos (Cahuana Yapo, 2020).

Por su parte, la Aplicación se asocia al sistema informático SIELSE, también propiedad de ELSE, el cual se encuentra integrado con el software MDC Power Gate mediante interfaces API internas. A través de esta integración, el sistema permite realizar gestiones comerciales, tales como la lectura remota de consumos, el control de órdenes de corte y reconexión, y la supervisión general del suministro eléctrico, fortaleciendo la automatización y eficiencia operativa de la empresa distribuidora (Ministerio del Ambiente del Perú, 2022; Cahuana Yapo, 2020).

3.4. Desarrollo del sistema piloto

3.4.1. Etapa de fabricación y envío de los componentes

Durante la fase de fabricación del Sistema de Medición Inteligente se cumplieron las especificaciones técnicas establecidas por Electro Sur Este S.A.A. (ELSE), definiéndose las características físicas y funcionales de los medidores y concentradores de datos. En coordinación con la empresa, se configuraron los perfiles de almacenamiento para medidores monofásicos y trifásicos, estableciendo los parámetros a registrar y los intervalos de medición. Posteriormente, se realizó la fabricación y envío de los equipos en un plazo de 90 días, incluyendo las Pruebas de Aceptación en Fábrica (FAT) conforme a la NMP 021:2015 (IEC 62058-31:2008), asegurando la calidad técnica y metrológica de los dispositivos. Además, se elaboró un lote de equipos de prueba entregado a ELSE en 50 días, permitiendo validar el funcionamiento del sistema antes de su implementación total (INACAL, 2015).

3.4.2. Etapa de ingeniería

En esta etapa del proyecto se efectuó una visita técnica de campo con el propósito de evaluar el estado actual de las instalaciones eléctricas en el área de intervención, permitiendo anticipar posibles contingencias antes de la instalación del sistema de medición inteligente. Esta verificación fue esencial, ya que el rendimiento del estándar de comunicación G3-PLC depende directamente de la calidad de las líneas de distribución eléctrica, cuyo deterioro puede afectar la estabilidad de la transmisión de datos. De igual forma, se realizó la revisión de los diagramas unifilares de las subestaciones eléctricas, con el fin de identificar las conexiones y flujos eléctricos internos, garantizando una instalación libre de interferencias. Finalmente, se elaboró y presentó el Plan de Proyecto con la documentación técnica requerida por Electro Sur Este S.A.A. (ELSE), la cual fue evaluada y aprobada como condición previa para el inicio de las labores en campo (Torres Ccorahua, 2023) , tal como se ve en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2

Plan de la implementación del proyecto piloto del AMI existente

Ítem	Título
1	Glosario de documentos
2	Documentos informativos
3	Estudio de campo - levantamiento de información
4	Memoria descriptiva
5	Especificaciones técnicas - medidor monofásico 2 hilos
6	Especificaciones técnicas - medidor trifásico 3 hilos
7	Especificaciones técnicas - concentrador de datos
8	Especificaciones técnicas - configuración del sistema
9	Especificaciones técnicas - modelo de base de datos
10	Arquitectura - software hes/.mdc
11	Arquitectura - integración del hes/.mdc al sielse
12	Guía de instalación - concentrador de datos

13	Diagrama de conexonado - concentrador de datos
14	Manual de usuario - medidor monofásico 2 hilos
15	Manual de usuario - medidor trifásico 3 hilos
16	Manual de usuario - concentrador de datos
17	Manual de usuario - software hes/.mdc
18	Plan de capacitación
19	Plan de pruebas fat
20	Plan de pruebas sat

Nota. Martinez y Magallanes, 2023.

3.4.3. Fase técnica

Una vez aprobado el Plan de Proyecto tras la visita a campo, ELSE lideró la fase de preparativos, que incluyó:

- Verificación de instalaciones en usuarios finales: ELSE inspeccionará las instalaciones existentes y determinará los puntos de intervención para prevenir problemas durante la instalación de los medidores inteligentes.
- Adaptación de instalaciones: Se realizarán adecuaciones eléctricas necesarias y se definirá la ruta de instalación para asegurar un despliegue eficiente.
- Campaña de concientización: Se informará a los usuarios sobre los beneficios del sistema de medición inteligente, mitigando la posible resistencia a la nueva tecnología.
- Preparación de módulos de prueba: ELSE implementará un módulo de prueba en oficinas con las muestras proporcionadas por iTechene, permitiendo ensayos remotos previos al despliegue completo.

3.4.4 Fase de despliegue de software

El despliegue del software MDC se dividió en dos etapas:

3.4.4.1. MDC listo para despliegue

Se consideró la instalación del MDC con comunicación activa con los equipos en campo.

- Preparación del entorno de trabajo: 5 días (ELSE).
- Verificación del entorno: 1 día (iTechene).
- Instalación del software: 3 días (iTechene).
- Pruebas de funcionamiento: 3 días (iTechene).
- Verificación de conexión SIM/Ethernet: 2 días (iTechene).
- Pruebas de comunicación HES/.MDC: 3 días (iTechene).

3.4.4.2. MDC integrado al SIELSE

Comprendió la integración del MDC con el sistema SIELSE de ELSE.

- Confirmación de requisitos: 5 días.
- Desarrollo de interfaz: 12 días.
- Instalación de interfaz: 2 días.
- Pruebas de funcionalidad: 2 días.
- Corrección de errores: 5 días.
- Implementación de interfaz: 5 días.
- Validación de interfaz: 3 días.

Durante todas las subtarefas, iTechene mantuvo comunicación constante con ELSE para coordinar el correcto desarrollo de actividades.

3.4.5. Fase de despliegue de equipos

3.4.5.1. Concentradores de datos (DCU) del proyecto piloto

Se instalaron en las subestaciones de distribución (SED). Se reutilizaron los cables de tensión y corriente de los medidores totalizadores existentes para garantizar alimentación y comunicación G3-PLC con los medidores inteligentes. Dentro de las tareas principales se tuvo la identificación de espacios, la instalación de DCU, el tendido de cables, la conexión, la ubicación de antenas 3G/4G, la configuración y finalmente la verificación de conectividad.

Figura 3.3

Concentrador de datos de la empresa Electro Sur Este S.A.A.



Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2025.

En la Figura 3.3 anterior se visualiza un concentrador de datos instalado en una subestación del centro histórico de la ciudad del Cusco, este concentrador fue inspeccionado por el supervisor encargado de la empresa Electro Sur Este S.A.A., para constatar el correcto funcionamiento de este equipo.

3.4.5.2. Medidores inteligentes del proyecto piloto

Se realizó el reemplazo de 2,340 medidores electrónicos convencionales. Se notificó a los usuarios finales previamente y se realizaron adecuaciones de cajas porta medidores según fue necesario. Las actividades a desarrollarse fueron la notificación a usuarios, las adecuaciones, el reemplazo de medidores, el almacenamiento de medidores retirados y la actualización de información en el sistema GOS.

Figura 3.4

Medidor inteligente monofásico de la empresa Electro Sur Este S.A.A.



Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2025.

En la Figura 3.4 anterior se visualiza un medidor inteligente instalado en un suministro del centro histórico de la ciudad del Cusco, este medidor fue inspeccionado por el supervisor encargado de la empresa Electro Sur Este S.A.A., para constatar el correcto funcionamiento de este equipo.

3.4.6. Transmisión de datos

En el sistema AMI piloto implementado por Electro Sur Este S.A.A., la arquitectura de comunicaciones sigue un esquema jerárquico típico compuesto por medidor inteligente al concentrador de datos (DCU) y luego al centro de gestión (HES/MDMS). El proceso de transmisión involucra etapas físicas (capa 1), de enlace (capa 2) y de aplicación (capa 7), integrando modulación digital, protocolos estandarizados y redes de telecomunicaciones públicas o privadas.

3.4.6.1. Transmisión del medidor inteligente hacia el concentrador (Red de Acceso)

Para la adquisición y encapsulamiento de datos el medidor realiza el muestreo digital de tensión y corriente, calcula energía y genera registros (perfiles de carga, eventos, alarmas). Estos datos se almacenan en memoria interna y luego son encapsulados bajo un protocolo de aplicación, comúnmente DLMS/COSEM (IEC 62056), definido por la International Electrotechnical Commission, que estructura los objetos de datos y su intercambio.

La modulación y transmisión (capa física) se da en los despliegues típicos de distribución urbana y rural, la comunicación entre el medidor y el DCU emplea PLC (Power Line Communication), con las características de ser:

- Medio físico: la propia red eléctrica de baja tensión.
- Principio: la señal de datos se superpone a la onda de 50/60 Hz.
- Modulación: técnica digital BPSK/QPSK (según estándar PLC utilizado)

El proceso técnico simplificado inicia con el microcontrolador que genera la trama digital, luego el módem PLC del medidor modula la señal binaria sobre una portadora en banda estrecha o banda ancha, seguidamente la señal modulada se inyecta en la red eléctrica, finalmente cuando la información viaja como una señal de alta frecuencia superpuesta a la tensión de servicio el módem PLC del concentrador realiza la demodulación, filtrando la componente de potencia y recuperando la señal digital.

La red eléctrica actúa como canal de transmisión, aunque presenta atenuación, ruido impulsivo y variaciones de impedancia; por ello se emplean técnicas de corrección de errores (FEC) y repetición automática (ARQ).

3.4.6.2. Transmisión del concentrador (DCU) hacia el centro de gestión

La transmisión del concentrador (DCU) hacia el centro de gestión se realiza una vez recibidos los datos de múltiples medidores, el DCU:

- Consolida y almacena temporalmente la información.
- Ejecuta validaciones básicas.
- Encapsula los datos en protocolos IP.

Para el canal de comunicación (Backhaul), el enlace DCU al Centro de Control se realiza mediante GPRS / 3G / 4G / 5G (red celular). En esta red celular:

- El DCU integra un módem LTE.
- Los datos se encapsulan en TCP/IP.
- La información se modula digitalmente en la red celular (por ejemplo, QPSK/16QAM en LTE).
- Viaja a través de la infraestructura del operador móvil.
- Es recibida por el servidor HES mediante una conexión segura (VPN/APN privada).

3.4.6.3. Demodulación y procesamiento en el Centro de Gestión

La demodulación y procesamiento en el Centro de Gestión en el Head-End System (HES) sigue la siguiente secuencia (tal como se ve en la Figura 3.5):

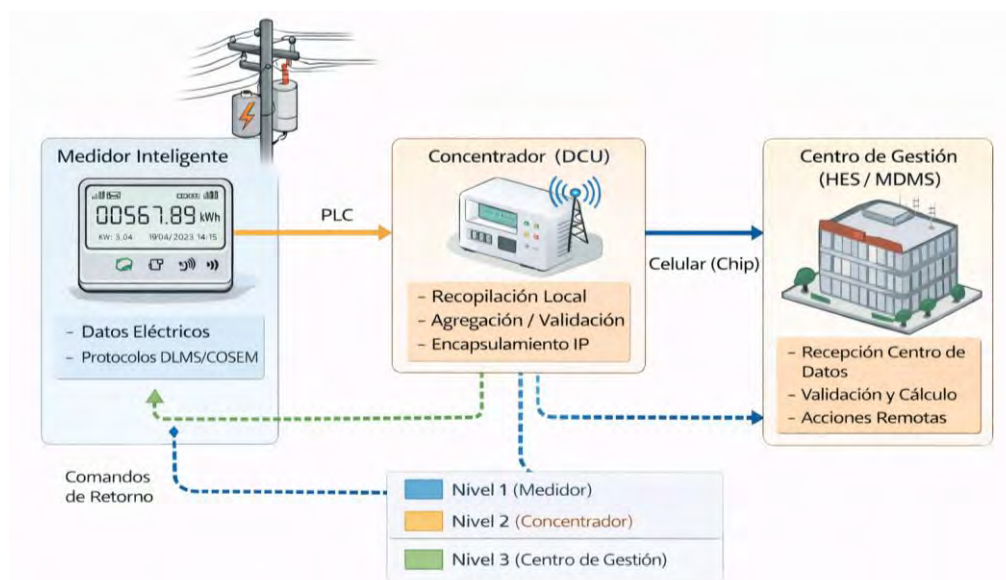
- Se reciben paquetes IP.
- Se validan certificados de seguridad.
- Se decodifican las tramas DLMS/COSEM.
- Los datos son enviados al MDMS para facturación, análisis de pérdidas, gestión de demanda y monitoreo de calidad de servicio

El canal es bidireccional, por lo que el centro puede enviar comandos:

- Corte y reconexión
- Actualización de firmware
- Cambio tarifario
- Solicitud de lectura inmediata

Figura 3.5

Resumen de flujo de transmisión de datos AMI actual



Nota. Electro Sur Este S.A.A., 2026.

En la imagen anterior se observan las tres etapas de transmisión de datos del sistema AMI piloto implementado.

En el sistema AMI implementado, la transmisión de datos combina modulación digital sobre canales eléctricos o inalámbricos en la red de acceso y tecnologías IP sobre redes celulares

o dedicadas en el backhaul. La modulación (OFDM, FSK, QPSK, QAM), los mecanismos de corrección de errores y los protocolos normalizados garantizan integridad, interoperabilidad y comunicación bidireccional segura entre el usuario final y el centro de gestión, asegurando supervisión casi en tiempo real y control operativo del suministro eléctrico.

3.5. Validación del proyecto piloto

Se aplicó un Plan de Pruebas de Aceptación en Sitio (Pruebas SAT) que verificará:

- Comunicación bidireccional entre medidores, DCU y MDC.
- Transferencia correcta de datos hacia el MDC.
- Recepción, almacenamiento y redireccionamiento de eventos y alarmas.
- Operación correcta de corte y reconexión de medidores desde el MDC.

3.5.1 Protocolo de pruebas de comunicación

Ensayos principales:

- Uplink: Se probó el envío de datos desde todos los concentradores hacia la estación maestra.
- Downlink: Se verificó la recepción de comandos y lectura de parámetros en el 95% de medidores instalados.

3.5.2 Protocolo de pruebas de funcionalidad

Ensayos principales:

- Operación remota de corte y reconexión del relé: éxito si el 97% de los medidores ejecutan correctamente los comandos.
- Medición bidireccional: incluye energía activa y reactiva, importada y exportada, con una tasa mínima de éxito del 97%.
- Configuración y registro de perfil de carga: validación de potencia y energía cada 15 minutos, con éxito mínimo del 97%.
- Lectura de máxima demanda: validación mensual de energía activa y reactiva, con tasa mínima de éxito del 97% (Lopez et al., 2021).

3.6. Resultados esperados

3.6.1 Medidores inteligentes

- Almacenamiento completo de datos según perfiles establecidos.
- Comunicación efectiva con DCU $\geq 97\%$.

- Cumplimiento de todas las pruebas SAT

3.6.2. Concentradores de datos

- Recepción y envío correcto de datos.
- Transmisión de eventos y órdenes desde el MDC.
- Cumplimiento de todas las pruebas SAT.

3.6.3. Software HES/MDC

- Almacenamiento correcto de los datos enviados desde medidores.
- Emisión y recepción de órdenes de manera confiable.
- Integración eficiente con SIELSE.
- Facilidad de uso para operadores y personal técnico.

3.7. Problemas Identificados en el Sistema AMI piloto

Durante la fase de diagnóstico del proyecto de implementación de medidores inteligentes y concentradores de datos (DCU), se identificaron diversas limitaciones y problemas que afectan la operación eficiente del sistema AMI. Estos problemas impactan tanto la comunicación como la gestión de datos, comprometiendo la confiabilidad y precisión de la información.

3.7.1. Desconexión de concentradores por falta de señal

Uno de los problemas más frecuentes observados es la desconexión de los concentradores de datos debido a una señal celular débil o intermitente. La ubicación de algunos concentradores dentro de subestaciones de distribución, con estructuras metálicas o barreras físicas, provoca que la cobertura 3G/4G sea insuficiente, interrumpiendo la comunicación con el software HES/.MDC. Esta desconexión genera retrasos en la recolección de información y puede afectar el monitoreo en tiempo real de la red eléctrica (Alvarado & Soto, 2021).

3.7.2. Saturación de datos en la comunicación

Otro problema crítico es la saturación de datos en la transmisión desde los concentradores hacia el HES/MDC. Dado las condiciones de severa inaccesibilidad que genera débiles comunicaciones y al elevado número de medidores comunicando simultáneamente, se producen cuellos de botella en la red de comunicación, lo que provoca pérdida de paquetes de datos y demora en el procesamiento de la información. Esta saturación puede generar inconsistencias en los registros de consumo y en la detección de eventos como cortes o reconexiones remotas (Martínez

et al., 2020).

3.7.3. Fallas en medidores inteligentes

Los medidores inteligentes también presentan problemas relacionados con la comunicación y la operación remota. Entre los principales se encuentran:

- Desconexión intermitente: Similar a los concentradores, algunos medidores presentan pérdida de conectividad debido a la señal débil o interferencias en el canal de comunicación PLC/G3-PLC.
- Errores en el envío de datos: Cuando se produce saturación en la red, los medidores no logran transmitir los datos completos de consumo o eventos, afectando la confiabilidad del sistema.
- Problemas de reconexión remota: La ejecución de comandos de corte y reconexión puede fallar, principalmente por latencia en la red o desconexiones temporales, lo que afecta la operación y control del suministro eléctrico.

3.7.4. Impacto en la gestión operativa

Estos problemas generan varias consecuencias operativas:

- Retrasos en la lectura de consumos y generación de facturación.
- Necesidad de intervención manual en casos de desconexión prolongada.
- Posible insatisfacción de los usuarios finales debido a fallas en la operación remota de cortes o reconexiones.
- Incremento de costos operativos al requerir soporte técnico y monitoreo adicional.

3.7.5. Recomendaciones Iniciales

Para mitigar los problemas identificados, se recomendó:

- Optimización de la ubicación de concentradores: Ubicarlos en zonas con mejor señal celular y menor interferencia.
- Implementación de redundancia en la comunicación: Considerar rutas alternativas de comunicación para garantizar continuidad ante desconexiones.
- Filtrado y priorización de datos: Diseñar el sistema de recolección de datos de manera que se prioricen los eventos críticos y se reduzca la saturación de la red.
- Monitoreo continuo y alertas tempranas: Configurar alertas automáticas en caso de desconexión de concentradores o medidores, para una intervención rápida.

3.8. Costos de adquisición e implementación del Sistema AMI piloto

El análisis económico del sistema de telemedición avanzada (AMI) implementado por Electro Sur Este S.A.A. se basa en la información contractual establecida en el Contrato N.º 055-2023 – ITECHENE PERÚ S.A.C., documento que regula el suministro, instalación, configuración y puesta en marcha de los equipos y software correspondientes al proyecto piloto de medición inteligente en la ciudad del Cusco.

Dicho contrato define los componentes principales del sistema —medidores inteligentes, concentradores de datos, software HES/MDC, infraestructura de comunicaciones y servicios de ingeniería— junto con los precios unitarios, cronogramas de entrega y actividades de validación (FAT y SAT). Estos datos permiten establecer una referencia real de los costos de implementación de una red AMI comercial en condiciones operativas locales.

3.8.1. Costos unitarios de los equipos principales

De acuerdo con la información técnica-económica del contrato suscrito, los costos de los equipos suministrados por ITECHENE PERÚ S.A.C. como se ve en la siguiente Tabla 3.3:

Tabla 3.3

Costos unitarios de los equipos principales del Sistema AMI piloto

Componente principal	Modelo / Descripción	Costo unitario (S/.)	Observaciones
Medidor monofásico 2 hilos	iTechene TA35R	272.00	Incluye módulo G3-PLC, relé interno de corte y reconexión remota.
Medidor trifásico 3 hilos	iTechene TC35W3	515.00	Para suministros comerciales o residenciales de mayor potencia.
Concentrador de datos (DCU)	iTechene TD12	2,270.00	Equipo de comunicación con capacidad de hasta 250 medidores vía PLC-G3 y transmisión 4G/LTE.
Software HES/MDC	Licencia corporativa	≈ 18,500.00	Incluye instalación, base de datos, interfaz API y capacitación inicial.

Power Gate			
Servicios técnicos de instalación y pruebas	Mano de obra, FAT/SAT, configuración inicial	≈ 7,200.00	Por subestación o grupo equivalente de 200 medidores.
Capacitación y soporte post-venta	Asistencia técnica durante seis meses	≈ 3,500.00	Incluye sesiones presenciales y soporte remoto.

Nota. Contrato N.º 055-2023 – ITECHENE PERÚ S.A.C., 2023.

Estos valores reflejan los costos reales de adquisición y puesta en marcha de la infraestructura AMI comercial. El precio de S/. 272.00 por medidor monofásico representa un incremento notable respecto a los medidores electrónicos convencionales, pero se justifica por las funcionalidades adicionales de lectura remota, registro horario de consumo y control automatizado del suministro.

Asimismo, el concentrador de datos (DCU), con un costo de S/. 2,270.00, constituye el núcleo de la red de comunicación. Este dispositivo recopila la información proveniente de los medidores, la almacena temporalmente y la transmite al sistema central mediante la red 3G/4G. Sin embargo, su elevado costo unitario y la necesidad de cobertura móvil estable condicionan la expansión del sistema en zonas de topografía compleja como el área urbana del Cusco.

3.8.2. Costos asociados al software y servicios de implementación

El sistema de gestión de datos HES/MDC Power Gate suministrado por ITECHENE se considera un componente esencial dentro de la arquitectura AMI. Este software permite la administración centralizada de medidores y concentradores, la ejecución de órdenes remotas de corte y reconexión, la lectura masiva de consumos, la detección de eventos y el análisis de perfiles de carga. El costo aproximado de S/. 18,500.00 por licencia corporativa incluye el desarrollo de la base de datos, las interfaces de comunicación con el sistema comercial SIELSE, y el soporte inicial de capacitación al personal técnico.

Sin embargo, este sistema presenta limitaciones de escalabilidad, dado que su modelo de

licenciamiento propietario requiere pagos adicionales por actualizaciones o incorporación de nuevos medidores al sistema. Los servicios de instalación y configuración, valorados en S/. 7,200.00 por grupo de equipos, comprenden la ejecución de pruebas FAT (Factory Acceptance Test) y SAT (Site Acceptance Test), asegurando la conformidad metrológica de los dispositivos y la correcta transmisión de datos en campo. A ello se suman los costos de capacitación técnica (S/. 3,500.00), orientada al manejo del software HES/MDC y al mantenimiento preventivo de los equipos.

3.8.3. Evaluación económica global del sistema piloto

Tomando como referencia los precios unitarios y los volúmenes instalados en el proyecto piloto (2,178 medidores inteligentes y 13 concentradores de datos), se obtiene una estimación general del costo de equipamiento, tal como se ve en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4

Evaluación económica global del sistema piloto

Elemento	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)
Medidores monofásicos y trifásicos	2,178 unidades	272.00 (promedio)	592,416.00
Concentradores de datos DCU	13 unidades	2,270.00	29,510.00
Software HES/.MDC Power Gate	1 licencia	18,500.00	18,500.00
Servicios técnicos, pruebas FAT/SAT y capacitación	–	–	≈ 10,700.00
Total estimado de implementación piloto	–	–	≈ 651,000.00

Nota. Elaboración propia con base en el Contrato N.º 055-2023 – ITECHENE PERÚ S.A.C. (2023).

El costo total estimado de S/. 651,000.00 refleja la magnitud de inversión necesaria para la operación del sistema AMI en su fase piloto. Esta cifra evidencia que la infraestructura de medición avanzada, aunque tecnológicamente eficiente, representa una inversión elevada por

punto de medición, principalmente debido al alto costo del concentrador y del software propietario.

3.8.4. Conclusiones del diagnóstico económico

El diagnóstico económico del sistema AMI piloto implementado por Electro Sur Este S.A.A. permite identificar los siguientes aspectos clave:

- Alto costo por nodo de medición: El costo promedio de instalación de un punto AMI supera los S/. 400.00, lo que limita su implementación masiva en los usuarios residenciales.
- Dependencia tecnológica: La infraestructura depende de equipos y software de un solo proveedor, incrementando los costos de actualización y mantenimiento.
- Escasa escalabilidad: Los costos de licencia del software y del hardware propietario dificultan la ampliación del sistema a nuevos sectores.

En síntesis, aunque el sistema AMI piloto actual cumple parcialmente con los requerimientos técnicos de medición avanzada y control remoto, su estructura de costos también revela una brecha significativa entre la inversión requerida y la capacidad económica para su expansión regional, situación que justifica la búsqueda de alternativas tecnológicas más flexibles, económicas y adaptadas a las condiciones locales (ITECHENE PERÚ S.A.C., 2023).

CAPÍTULO IV: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE MEDIDOR INTELIGENTE

4.1. Introducción

En este capítulo se detalla el proceso de desarrollo del prototipo de medidor inteligente, desde su diseño hasta la implementación para puesta en marcha o funcionamiento, orientado a la mejora de las operaciones técnico-comerciales del servicio eléctrico. El desarrollo se centra en la implementación de un microcontrolador ESP32 integrado con sensores inteligentes Tuya, una pantalla OLED, LED's y el uso de plataformas de programación, control y monitoreo como Smart Life, Home Assistant y ESPHome, que permiten registrar, supervisar y controlar el consumo energético de manera remota, todo mediante comunicación inalámbrica WiFi. Asimismo, se explica la selección de los dispositivos, la configuración de la red inalámbrica, la interconexión de los equipos y las pruebas de funcionamiento, demostrando la viabilidad técnica del sistema bajo un entorno doméstico similar al de los usuarios residenciales. (Tuya Smart, 2024; Home Assistant, 2023).

4.2. Procedimiento de diseño del prototipo de medidor inteligente

En esta sección se describe el diseño del prototipo de medidor inteligente, desde la selección de componentes, dispositivos, equipos, materiales y otros seleccionados según su función, compatibilidad y disponibilidad comercial, hasta el diagrama de conexión. Los dispositivos empleados cuentan con certificaciones de garantía de buen funcionamiento, bajo costo y fácil integración mediante Wi-Fi 2.4 GHz. Estos dispositivos, así como plataformas de gestión son los siguientes:

- Microcontrolador ESP32
- Pantalla OLED 0.96"
- LED's RGB
- Fuente de alimentación Mean Well 5V
- Home Assistant Green
- Plataforma de Home Assistant
- Interruptor Wi-Fi Tuya 16A (1 Vía)
- Módulo medidor de energía Wi-Fi Tuya 16A (1 Vía)
- Plataforma de gestión móvil Smart Life
- Repetidor Wi-Fi inalámbrico de 300 Mbps
- Módem portátil ZTE MF920V 4G LTE

- Chip 4G LTE para internet
- Caja para medidor impresa en 3D (más accesorios)
- Laptop
- Cable ethernet
- Otros (pegamento, placa perforada, tornillos etc.)

4.2.1. Microcontrolador ESP32

4.2.1.1. Descripción general

El ESP32 es un microcontrolador de arquitectura avanzada desarrollado por Espressif Systems, ampliamente empleado en aplicaciones IoT por su alto rendimiento, bajo consumo y conectividad inalámbrica integrada. Se trata de un dispositivo System-on-Chip (SoC) que combina un procesador dual-core de 32 bits, módulos de comunicación Wi-Fi y Bluetooth, además de una amplia gama de periféricos digitales que facilitan la integración con sensores, pantallas y actuadores.

En el contexto del presente prototipo de medidor inteligente, el ESP32 cumple el rol de unidad de procesamiento auxiliar, encargada de recibir datos desde Home Assistant, que es una plataforma de software libre y de código abierto para automatización, supervisión y control de dispositivos IoT/domóticos, mostrarlos en la pantalla OLED, activar el LED RGB para señalización de calidad del suministro eléctrico y mantener comunicación permanente con la red local mediante ESPHome. Por sus características, el ESP32 es altamente adecuado para aplicaciones de medición inteligente, domótica y sistemas AMI residenciales, gracias a su estabilidad, eficiencia energética y flexibilidad de programación, tal como se ve en la Figura 4.1.

Figura 4.1

Microcontrolador ESP32 DevKit V1



Nota. Espressif, 2024.

4.2.1.2. Características técnicas del hardware

Las características técnicas principales del componente se detallan en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1
Características técnicas del microcontrolador ESP32

Parámetro	Especificación técnica
Procesador	Dual-core Xtensa LX6, 32 bits @ hasta 240 MHz
Memoria RAM	520 KB SRAM
Memoria Flash	4–16 MB (según módulo)
Conectividad inalámbrica	Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz), Bluetooth v4.2 + BLE
Interfaces de comunicación	I²C, SPI, UART, ADC, DAC, PWM, GPIO
ADC	12 bits (18 canales aprox.)
DAC	8 bits (2 canales)
Voltaje de operación	3.0 – 3.3 V DC
Consumo típico	80–260 mA (modo Wi-Fi activo)
Programación	ESPHome, Arduino Core, ESP-IDF, MicroPython
Seguridad	Cifrado AES, RSA, SHA, Secure Boot, Flash Encryption
Dimensiones	50 mm × 27 mm (DevKit V1)

Nota. Espressif Systems, 2024.

4.2.1.3. Función dentro del prototipo

En este proyecto, el ESP32 tiene un rol fundamental como nodo IoT local, encargado de ejecutar el firmware ESPHome que establece comunicación directa con Home Assistant mediante la API nativa ESPHome. Esto permite:

- Recibir valores eléctricos en el dominio físico y binarios en el dominio digital/transmisión del medidor Tuya a través de Home Assistant.
- mostrar dichos valores en la pantalla OLED SSD1306 mediante el protocolo I²C.

- Controlar un LED RGB como indicador del estado del suministro eléctrico (tensión baja, normal o alta).
- Garantizar comunicación estable vía Wi-Fi en la banda de 2.4 GHz.

El ESP32 no realiza la medición ni la decodificación física de señales eléctricas, ya que el módulo Tuya entrega la información previamente digitalizada y transmitida mediante protocolos IP. El microcontrolador lo que hace es actuar como un nodo de comunicación que recibe datos binarios codificados, los interpreta a nivel de aplicación y los procesa para su visualización o almacenamiento.

4.2.1.4. Costos y disponibilidad

El ESP32 DevKit V1 es un dispositivo económico y ampliamente disponible. Su precio comercial varía entre S/. 20.00 a S/. 30.00 en tiendas especializadas de electrónica locales y S/. 12.00 a S/. 15.00 en plataformas internacionales como AliExpress, tal como se ve en la Figura 4.2.

Su bajo costo lo convierte en una solución altamente competitiva frente a otros microcontroladores más complejos o de licenciamiento cerrado. Además, su compatibilidad con múltiples frameworks (ESPHome, Arduino, MicroPython) facilita su adopción en proyectos académicos y de investigación.

Figura 4.2

Precio referencial de ESP32 DevKit V1



AliExpress

sensor de vibración

Placa de desarrollo de módulo WiFi D1 MINI ESP32 BT para Internet de las cosas CP2102 CH9102F serie 40 pines USB Micro tipo C

★★★★★ 4.9 51 valoraciones | 600+ vendido(s)

BLACK FRIDAY Termina : 4 dic., 02:59 (GMT-5)

S/12.05 **Ahorra S/1.22**

Precio mostrado antes de impuestos

-S/6.98 en S/34.91

Color: CH9102F Micro

Fuente: AliExpress, 2025.

4.2.1.5. Ventajas principales

- Conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada en un solo chip.
- Muy bajo costo y alta disponibilidad.
- Compatible con múltiples entornos de desarrollo (ESPHome, Arduino, ESP-IDF).
- Amplia cantidad de pines GPIO para manejo de periféricos.
- Operación estable en modo 24/7 para aplicaciones IoT.
- Permite actualización de firmware vía OTA.
- Ideal para prototipos AMI residenciales, domótica y monitoreo eléctrico.
- Bajo consumo energético (<1 W en operación típica).
- Posibilidad de integrarse con plataformas abiertas como Home Assistant.

4.2.1.6. Justificación de selección para el prototipo

La selección del microcontrolador ESP32 para este proyecto responde a criterios técnicos y económicos:

- Conectividad Wi-Fi nativa, necesaria para integrarse en la arquitectura del sistema AMI local basado en Home Assistant.
- Capacidad de manejar periféricos como pantallas OLED, LEDs y sensores.
- Compatibilidad directa con ESPHome, lo que permite una integración sin código complejo y facilita el mantenimiento.
- Bajo consumo energético, adecuado para operación continua.
- Costo reducido, ideal para prototipos y despliegues iniciales en entornos residenciales.
- Estabilidad y soporte de comunidad, lo que garantiza actualizaciones y documentación abundante.

Gracias a estos atributos, el ESP32 constituye la opción óptima para un prototipo de medición inteligente de bajo costo alineado a la realidad de usuarios residenciales, se aprecia el microcontrolador ESP32 en el Anexo 4.

4.2.2. Pantalla OLED 0.96" SSD1306

4.2.2.1. Descripción general

La pantalla OLED 0.96" SSD1306 es un dispositivo de visualización de matriz orgánica de puntos (OLED) ampliamente utilizado en sistemas embebidos por su bajo consumo energético,

excelente contraste y facilidad de integración. Utiliza un controlador SSD1306 que permite manejar hasta 128×64 píxeles mediante interfaces serie estándar como I²C o SPI, tal como se ve en la Figura 4.3.

En el contexto del presente prototipo de medidor inteligente, la pantalla OLED se emplea como módulo de visualización local, permitiendo mostrar parámetros eléctricos obtenidos del medidor Tuya y procesados por Home Assistant, tales como tensión, corriente, potencia y energía acumulada. Esta visualización inmediata facilita la interpretación del estado del suministro eléctrico sin necesidad de acceder a un computador o smartphone.

Figura 4.3
Pantalla OLED 0.96” SSD1306



Nota. Adafruit, 2024.

4.2.2.2. Características técnicas del hardware

Las características técnicas principales del componente se detallan en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2
Características técnicas de la pantalla OLED SSD1306

Parámetro	Especificación técnica
Tecnología	OLED monocromática
Resolución	128×64 píxeles
Tamaño	0.96 pulgadas

Interfaz	I ² C (SDA/SCL) o SPI
Voltaje de operación	3.3 – 5 V DC
Consumo	15–25 mA (típico)
Controlador	SSD1306
Temperatura de operación	–40 °C a 85 °C
Dirección I ² C	0x3C (por defecto)

Nota. Datasheet SSD1306, 2024.

4.2.2.3. Función dentro del prototipo

La pantalla OLED funciona como una interfaz local de usuario, permitiendo visualizar en tiempo real las variables eléctricas provenientes del medidor inteligente. Estas variables son enviadas desde Home Assistant al ESP32 mediante la API ESPHome, y el ESP32 las imprime en la pantalla mediante comandos gráficos simples.

Mediante la comunicación I²C, la pantalla permite:

- Visualizar tensión instantánea (V).
- Corriente eléctrica (I).
- Potencia (W).
- Energía acumulada (kWh).
- Mensajes de estado o alertas.
- Señales gráficas según la calidad del suministro eléctrico.

La comunicación entre el ESP32 y la pantalla se realiza mediante el protocolo I²C, utilizando únicamente dos pines (SDA y SCL), lo cual reduce el cableado y mejora la estabilidad del sistema. Su bajo consumo energético permite que la pantalla funcione las 24 horas sin afectar significativamente el rendimiento del prototipo, siendo adecuada para entornos de monitoreo continuo como viviendas residenciales o instalaciones educativas.

4.2.2.4. Costos y disponibilidad

El precio comercial de la pantalla OLED SSD1306 varía según proveedor DE S/. 12.00 a S/. 20.00 en tiendas locales y de S/. 7.00 a S/. 12.00 en plataformas como AliExpress. Es un componente económico, de alta disponibilidad y muy usado en prototipos educativos y de investigación, tal como se ve en la Figura 4.4.

Figura 4.4

Costo referencial de pantalla OLED SSD1306



Nota. AliExpress, 2025.

4.2.2.5. Ventajas principales

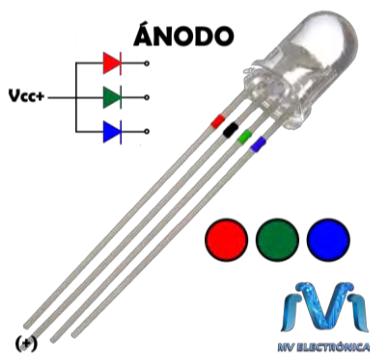
- Excelente contraste debido a la tecnología OLED.
- Bajo consumo energético.
- Interfaz I²C que utiliza solo dos pines del ESP32.
- Compatible con ESPHome y Arduino.
- Tamaño compacto ideal para prototipos.
- No requiere retroiluminación.
- Actualización rápida (ideal para datos en tiempo real).
- Alta vida útil (más de 50.000 horas).

4.2.3. LED RGB indicador del estado del suministro eléctrico

4.2.3.1. Descripción general

El LED RGB es un diodo emisor de luz capaz de generar una amplia gama de colores combinando internamente tres emisores: rojo (R), verde (G) y azul (B) , tal como se ve en la Figura 4.5. En el presente prototipo se emplean dos LED RGB de ánodo común, destinados a proporcionar señalización visual inmediata sobre el estado del suministro eléctrico y el comportamiento energético del usuario residencial. Este tipo de indicadores luminosos resulta altamente útil en sistemas AMI domésticos, ya que permiten visualizar información básica del servicio sin necesidad de acceder a la plataforma digital, lo que contribuye a la comprensión del comportamiento eléctrico por parte del usuario final y facilita las pruebas durante la etapa de prototipo.

Figura 4.5
LED RGB de ánodo común



Nota. Electronic Components Catalog, 2024.

4.2.3.2. Características técnicas del LED RGB

Las características técnicas principales del componente se detallan en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3
Características del LED RGB y LED de pulsos

Parámetro	Especificación técnica
Tipo	LED RGB de ánodo común (4 pines)
Colores emitidos	Rojo, verde, azul (combinables)

Control	Salidas PWM del ESP32
Pines	Ánodo común + 3 cátodos independientes
Resistencias recomendadas	220–330 Ω por canal
Tensión umbral / directa (Vf)	Rojo: 1.8–2.2 V; Verde: 3.0–3.4 V; Azul: 3.0–3.4 V
Corriente directa nominal (If)	20 mA por canal
Corriente máxima (If max)	25 mA por canal
Potencia máxima	Aproximadamente 80 mW por canal

Nota. LED Manufacturer Datasheet, 2024.

La configuración de ánodo común facilita el control de ESP32, ya que los tres canales se manejan mediante salidas PWM independientes, permitiendo regular brillo e intensidad del color.

La modulación por ancho de pulso (PWM, Pulse Width Modulation) es una técnica de control digital mediante la cual el ESP32 regula la potencia promedio suministrada a una carga variando el tiempo que una señal permanece en estado alto dentro de un período fijo. En el prototipo desarrollado, esta técnica permite controlar la intensidad luminosa de cada canal del LED RGB, facilitando la representación visual de los diferentes estados de calidad de tensión eléctrica mediante distintos colores e intensidades de iluminación.

4.2.3.3. Función dentro del prototipo

En el prototipo se implementan dos LED RGB, cada uno con una función específica dentro del sistema de monitoreo inteligente:

a) Primer LED RGB: Indicador de calidad del suministro eléctrico

Este LED funciona como un semáforo eléctrico que informa el estado de la tensión medida por el medidor Tuya 16 A, utilizando datos obtenidos en tiempo real desde Home Assistant:

- Verde: tensión dentro de límites permitidos (209 V – 231 V).
- Rojo: tensión fuera de rango (+/-5% de la tensión nominal que son 220V según la NTCSE).
- Azul: reservado para futuras ampliaciones (por ejemplo, estado del sistema, reconexiones

o alarmas).

El ESP32 controla dinámicamente este LED mediante salidas PWM, permitiendo ajustar la intensidad y mejorar la visualización incluso en ambientes iluminados. Esta señal luminosa facilita la supervisión inmediata del estado del suministro, sin necesidad de acceder a la interfaz digital.

b) Segundo LED RGB: Indicador de pulsos equivalente a 1600 imp/kWh

Como aporte innovador dentro del prototipo, se incorpora un segundo LED RGB programado para comportarse como el indicador de pulsos del medidor, emulando la salida típica de los medidores inteligentes y electrónicos convencionales.

El diseño se basa en que cuando los datos de energía instantánea son enviados por el medidor Tuya hacia Home Assistant, se realiza el cálculo de la frecuencia de parpadeo equivalente a 1600 impulsos por kWh, estándar ampliamente utilizado en medición electrónica, entonces se activa el canal rojo o blanco del LED para representar cada pulso energético.

Esto permite visualizar el consumo energético en tiempo real mediante una secuencia de parpadeos, validar experimentalmente la coherencia entre energía acumulada y pulsos emitidos, contar los pulsos mediante el ESP32 para pruebas y calibraciones comparativas y simular el funcionamiento real de un medidor electrónico clase 1 dentro del entorno AMI.

Este segundo LED RGB funciona exclusivamente como indicador de energía, no como indicador de calidad del suministro a diferencia del anterior LED RGB.

4.2.3.4. Ventajas del uso de LED RGB en el prototipo

- Proporcionan información visual sencilla y directa al usuario.
- Bajo consumo energético (menor a 0.1 W por LED).
- Control preciso mediante PWM desde el ESP32.
- Permiten mostrar múltiples estados sin necesidad de más hardware.
- Facilitan pruebas de laboratorio y validación del sistema.
- El segundo LED RGB permite emular un medidor clase 1 con pulsos estandarizados.

4.2.3.5. Justificación de selección

El uso de LED RGB aporta valor tanto técnico como experimental al prototipo:

- Simplicidad y robustez: requieren poco hardware y son altamente confiables.
- Compatibilidad con el ESP32: se controlan fácilmente mediante salidas PWM.
- Versatilidad visual: un solo componente admite múltiples colores y patrones.
- Representación estándar de energía: el LED de pulsos replica la lógica usada en medidores comerciales (1600 imp/kWh).
- Adecuado para entornos académicos y AMI domésticos: permite interpretar estados del sistema sin herramientas adicionales.

4.2.4. Fuente de alimentación Mean Well 5V

4.2.4.1. Descripción general

La fuente de alimentación Mean Well 5V utilizada en el presente prototipo corresponde a una unidad de conversión AC–DC de tipo conmutada (switching), diseñada para transformar la tensión de alimentación de red eléctrica residencial (220 V AC) a un nivel seguro y estable de 5 V DC, adecuado para alimentar dispositivos electrónicos de baja potencia como el ESP32, la pantalla OLED y los LEDs RGB. Mean Well es un fabricante reconocido internacionalmente por sus fuentes de alta fiabilidad, utilizadas en sistemas industriales, comerciales y prototipos de ingeniería eléctrica debido a su robustez, bajo nivel de ruido eléctrico, eficiencia y protección contra sobrecargas, tal como se ve en la Figura 4.6.

En este proyecto, la fuente Mean Well cumple un rol crítico, ya que garantiza una corriente estable y segura para los componentes digitales que conforman el módulo de visualización y señalización del prototipo de medidor inteligente. Su uso permite evitar caídas de tensión, ruidos eléctricos o sobrecalentamientos que podrían afectar la operación del ESP32.

Figura 4.6

Fuente switching Mean Well 5V



Nota. Mean Well, 2024.

4.2.4.2. Características técnicas del hardware

Las características técnicas principales del componente se detallan en la Tabla 4.4:

Tabla 4.4
Especificaciones técnicas de la fuente Mean Well 5V

Parámetro	Especificación técnica
Modelo referencial	Mean Well APV-8-5 / IRM-05-5
Tipo	Fuente conmutada (switching) AC–DC
Tensión de entrada	90–264 V AC (50/60 Hz)
Tensión de salida	5 V DC
Corriente de salida	0.8–1.0 A (según modelo)
Potencia nominal	5–8 W
Eficiencia	75–78 %
Protección incorporada	Cortocircuito, sobrecarga, sobrevoltaje
Temperatura de operación	–30 °C a 70 °C
Dimensiones	77 × 40 × 29 mm aprox.
Tipo de conexión	Doble terminal (AC IN / DC OUT)

Nota. Mean Well Enterprises, 2024.

4.2.4.3. Función dentro del prototipo

Dentro del prototipo de medición inteligente, la fuente Mean Well 5V es la encargada de proporcionar energía regulada al:

- ESP32, microcontrolador principal del módulo de visualización.
- Pantalla OLED 0.96", que opera entre 3.3–5 V.
- LED RGB indicador del estado del suministro, el cual requiere corriente estable para evitar fluctuaciones de brillo.
- LED RGB secundario, utilizado como pulsador visual equivalente a un emisor de impulsos de 1600 pulsos/.kWh para efectos demostrativos.

Su misión es garantizar que todos los componentes operen dentro de los rangos seguros de alimentación, evitando daños a causa de picos de tensión típicos de redes residenciales. Esta estabilidad es fundamental para evitar reinicios del ESP32, congelamiento del display o lecturas erróneas producto de ruido eléctrico, especialmente importante en entornos donde se miden parámetros sensibles como tensión y potencia.

4.2.4.4. Criterios de selección

La elección de una fuente Mean Well 5V se justifica en base a los siguientes criterios:

- Fiabilidad profesional: Mean Well es estándar de la industria por su durabilidad y estabilidad.
- Aislamiento eléctrico robusto, necesario para trabajos en proximidad a la red de 220 V AC.
- Protecciones integradas que previenen daños por cortocircuitos o sobrecarga.
- Eficiencia energética, reduciendo pérdidas térmicas y aumentando la vida útil del prototipo.
- Compatibilidad eléctrica con todos los módulos digitales utilizados.
- Dimensiones compactas, adecuadas para el interior de la caja impresa en 3D del prototipo.

Estos elementos permiten asegurar un funcionamiento 24/7 del sistema, condición necesaria para un escenario AMI domiciliario.

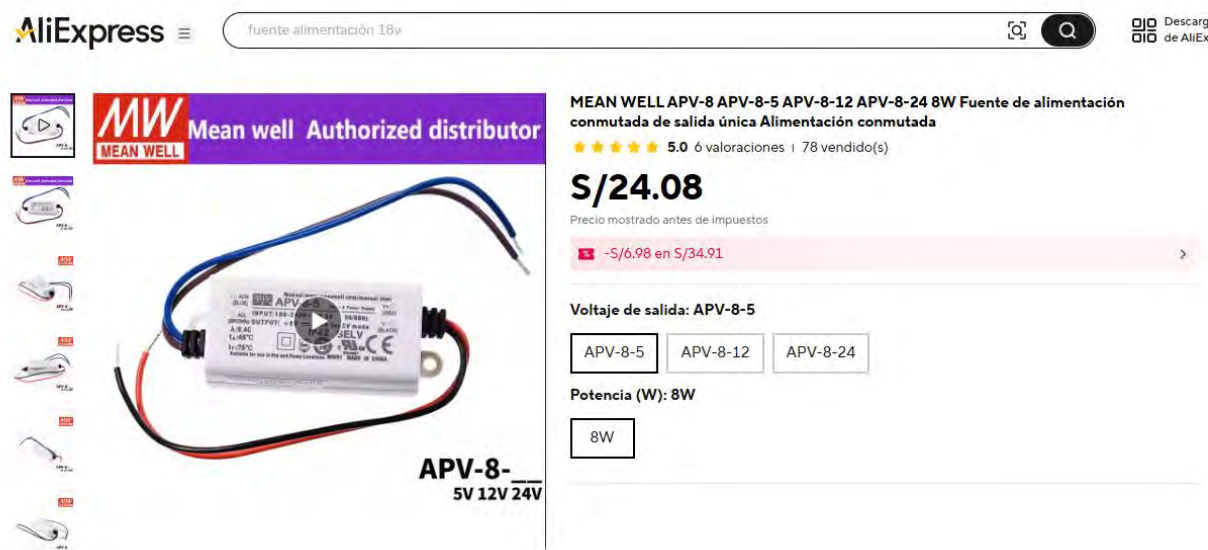
4.2.4.5. Costos y disponibilidad

En el mercado peruano, las fuentes Mean Well de 5V en tiendas locales de electrónica

cuestan entre S/. 30.00 a S/. 45.00, pero en AliExpress está entre S/. 22.00 – S/. 30.00 (dependiendo del modelo y envío). La disponibilidad es amplia tanto en Perú como internacionalmente, lo cual permite su reemplazo, escalabilidad o mantenimiento futuro del prototipo, tal como se ve en la Figura 4.7.

Figura 4.7

Precio referencial de Mean Well 5V



AliExpress

fuentes alimentación 18v

MEAN WELL APV-8 APV-8-5 APV-8-12 APV-8-24 8W Fuente de alimentación conmutada de salida única Alimentación conmutada

★★★★★ 5.0 ó valoraciones | 78 vendido(s)

S/24.08

Precio mostrado antes de impuestos

-S/6.98 en S/34.91

Voltaje de salida: APV-8-5

APV-8-5 APV-8-12 APV-8-24

Potencia (W): 8W

8W

APV-8-5V 12V 24V

Nota. AliExpress, 2025.

4.2.4.6. Ventajas principales

- Alta fiabilidad y larga vida útil.
- Protección integrada ante riesgos eléctricos.
- Compatible con equipos digitales de 3.3–5 V.
- Ideal para aplicaciones domóticas, IoT y AMI residencial.
- Bajo nivel de ruido eléctrico, lo que mejora la estabilidad del ESP32.
- Operación segura con voltajes de red de 220 V AC.
- Tamaño compacto y montaje sencillo.

4.2.5. Home Assistant Green

4.2.5.1. Descripción general

El Home Assistant Green es un equipo de automatización inteligente diseñado por Nabu Casa Inc. que dentro del contexto de Sistema AMI puede entenderse como un “concentrador” para

términos prácticos a fines a la presente investigación, fue lanzado oficialmente en octubre de 2023. Es un dispositivo preensamblado y optimizado para ejecutar el sistema operativo Home Assistant OS, el cual permite gestionar dispositivos IoT (Internet de las Cosas) dentro de un entorno local (Home Assistant, 2024) , tal como se ve en la Figura 4.8.

Figura 4.8

Home Assistant Green



Nota. Home Assistant, 2023.

A diferencia de versiones previas que requerían hardware externo (como Raspberry Pi o mini PC), el Green integra todas las funciones necesarias en un solo dispositivo plug and play, ofreciendo un arranque inmediato y una configuración simplificada. Su diseño compacto, silencioso y con disipación pasiva lo hace ideal para aplicaciones domésticas, académicas o experimentales en domótica y medición inteligente.

4.2.5.2. Características técnicas del hardware

Las características técnicas principales del equipo se detallan en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5*Características técnicas del hardware*

Parámetro	Especificación técnica
Procesador	Quad-core ARM Cortex-A55 @ 1.8 GHz
Memoria RAM	4 GB LPDDR4
Almacenamiento interno	32 GB eMMC
Conectividad	Ethernet 10/100/1000 Mbps
Puertos USB	2 × USB 3.0 tipo A
Alimentación	12 V DC / 2 A
Sistema operativo	Home Assistant OS
Dimensiones	112 mm × 112 mm × 32 mm
Carcasa	Aluminio anodizado verde, disipación pasiva
Compatibilidad adicional	Dongles Zigbee, Z-Wave, Thread, Matter, Tuya LAN, MQTT

Nota. Home Assistant Web, 2024.

4.2.5.3. Función dentro del prototipo

En el prototipo de medidor inteligente, el Home Assistant Green funciona como el servidor físico principal donde se ejecuta la lógica de monitoreo, control y almacenamiento local de datos eléctricos. Permite comunicar el medidor Tuya 16A (que mide consumo energético) y el interruptor Tuya 16A (que controla el suministro eléctrico) dentro de una red Wi-Fi local, sin necesidad de servicios en la nube. Esto garantiza mayor estabilidad, privacidad y menor latencia, aspectos cruciales en aplicaciones de sistemas AMI domésticos o residenciales.

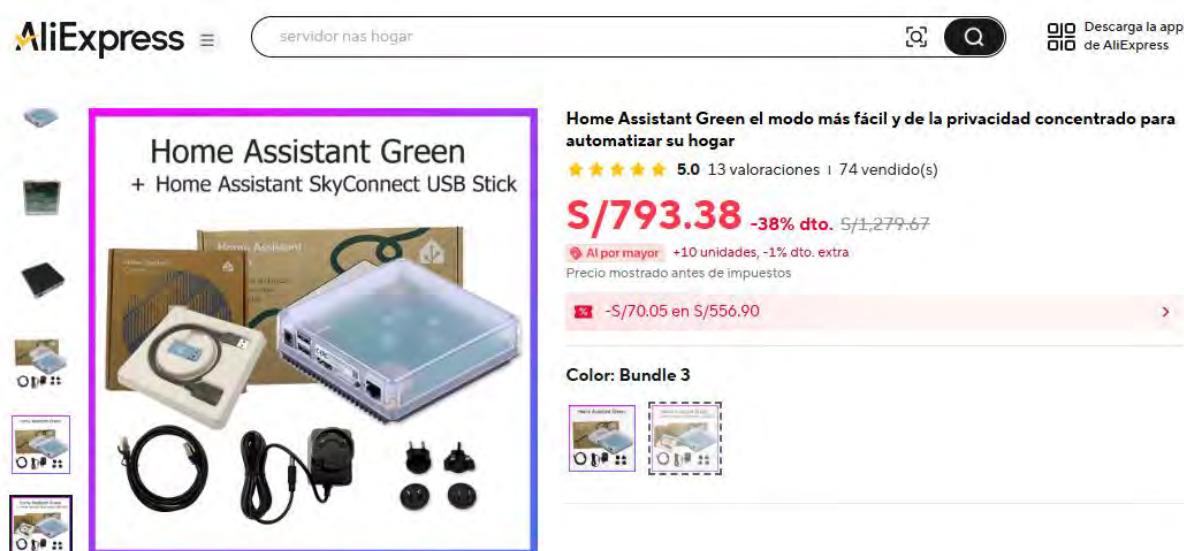
4.2.5.4. Costos y disponibilidad

El Home Assistant Green tiene un precio aproximado de \$ 99.00 dólares, que equivale a S/. 365.00 soles aproximadamente dependiendo del distribuidor, tal como se ve en la Figura 4.9. Pero incluidos los costos de importación su precio es de S/. 793.38 soles aproximadamente. Su

valor resulta competitivo frente a la opción de construir un servidor manualmente con Raspberry Pi y módulos adicionales, considerando que ya incluye hardware optimizado y soporte oficial de Nabu Casa.

Figura 4.9

Costo de Home Assistant Green



Nota. AliExpress, 2025.

4.2.5.5. Ventajas principales

- Configuración inmediata sin conocimientos de programación.
- Operación completamente local y sin dependencia de la nube.
- Compatibilidad amplia con protocolos estándar (MQTT, Zigbee, Z-Wave, Matter, Tuya, etc.).
- Bajo consumo energético (≤ 10 W).
- Posibilidad de uso continuo 24/7 como servidor domótico o AMI residencial.
- Referencia

4.2.6. Plataforma Home Assistant (software de automatización)

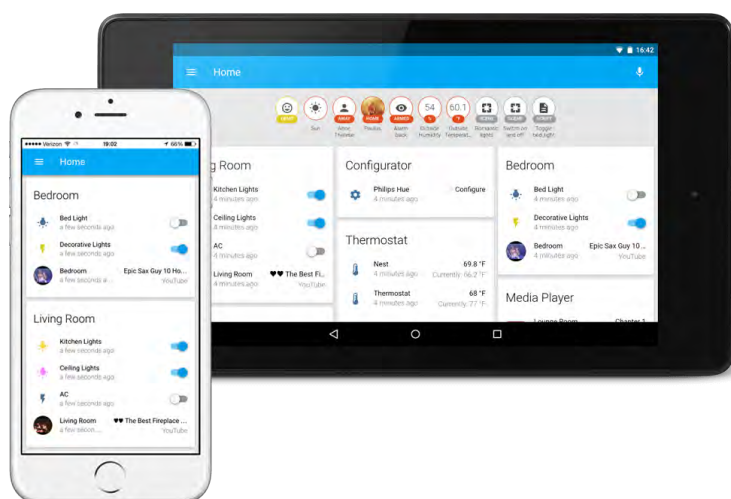
4.2.6.1. Descripción general

La plataforma Home Assistant es un software libre y de código abierto desarrollado por la comunidad Home Assistant y mantenido por Nabu Casa Inc. Permite integrar, automatizar y

controlar dispositivos inteligentes desde una única interfaz local, funcionando como el cerebro de un sistema domótico o de medición inteligente (Home Assistant, 2024) , tal como se ve en la Figura 4.10.

Figura 4.10

Plataforma Home Assistant



Nota. Home Assistant Web y App, 2023.

Su filosofía se basa en la independencia de la nube, es decir, el control de los dispositivos IoT se realiza dentro de la red local sin requerir conexión constante a Internet, lo que ofrece mayor seguridad y privacidad frente a plataformas comerciales como Tuya o Alexa.

4.2.6.2. Arquitectura del sistema

El Home Assistant se estructura en tres capas principales:

- Capa de integración: conecta dispositivos mediante protocolos como MQTT, Zigbee, Z-Wave, Modbus, o API REST.
- Capa de automatización: permite definir reglas lógicas (por ejemplo, “si el consumo supera 2000 W → apagar el circuito”).
- Capa de visualización: muestra los datos en paneles (dashboards) personalizables en tiempo real.

Esta arquitectura lo convierte en un sistema modular y escalable, ideal para proyectos de investigación o implementación de infraestructura AMI doméstica.

4.2.6.3. Integración en el prototipo

La plataforma Home Assistant recibe datos del medidor inteligente Tuya mediante la red Wi-Fi local y los procesa en un panel visual. Permite almacenar, graficar y analizar el consumo energético, además de enviar órdenes de control al interruptor Tuya 16A, simulando el flujo de información y control que realizan las empresas eléctricas en sistemas AMI).

Asimismo, Home Assistant admite complementos de análisis como Energy Dashboard, InfluxDB o Grafana, que posibilitan la generación de reportes técnicos sobre consumo, potencia y tiempo de uso de carga, esenciales para el análisis técnico-comercial.

4.2.6.4. Ventajas técnicas

- Procesamiento local: evita la dependencia de servidores externos.
- Seguridad avanzada: los datos permanecen dentro de la red doméstica.
- Compatibilidad universal: soporta más de 1 000 integraciones IoT.
- Interfaz intuitiva: panel configurable desde navegador o app móvil.
- Escalabilidad: puede crecer con más medidores, sensores o actuadores.

4.2.6.5. Aplicación en la investigación

Dentro de la tesis “Diseño de un prototipo de medidor inteligente para mejorar las operaciones técnico-comerciales”, la plataforma Home Assistant se considera la herramienta de software central que permite:

- Registrar y procesar mediciones eléctricas en tiempo real.
- Ejecutar automatizaciones lógicas de control de energía.
- Evaluar el desempeño técnico del sistema.

De este modo, Home Assistant cumple una función equivalente al software de gestión central de un sistema AMI a nivel piloto.

4.2.7. Interruptor Wi-Fi Tuya 16A

4.2.7.1. Descripción general

El interruptor Wi-Fi Tuya 16A es un dispositivo de automatización eléctrica diseñado para el control remoto de cargas monofásicas de hasta 16 amperios. Funciona mediante conectividad inalámbrica Wi-Fi 2.4 GHz, lo que permite su gestión desde la aplicación móvil Smart Life,

compatible con los ecosistemas de Alexa, Google Home y Alice. Su estructura integra un relé electromecánico de potencia, un módulo de comunicación inalámbrica (basado en chip ESP8266 o CB2S) y un microcontrolador Tuya MCU, que ejecuta los comandos de encendido/apagado y temporización (Tuya Smart, 2024), tal como se ve en la Figura 4.11.

Figura 4.11
Mini interruptor Tuya



Nota. Tuya Developer, 2023.

4.2.7.2. Características técnicas

Las características principales del equipo se detallan en la Tabla 4.6 y Anexos 6 y 7:

Tabla 4.6
Características técnicas del interruptor

Parámetro	Valor típico	Descripción
Tensión nominal	100 – 240 V AC	Rango de operación estándar doméstico
Corriente máxima	16 A	Permite controlar cargas de hasta 3500 W
Frecuencia Wi-Fi	2.4 GHz IEEE 802.11 b/g/n	Conexión inalámbrica estándar
Tipo de control	Relé mecánico de 1 vía (SPST)	Permite apertura/cierre remoto del circuito

Aplicación de control	Smart Life / Tuya Smart	Compatible con Android e iOS
Integración por voz	Alexa, Google Home, Alice	Control por comandos de voz
Modo de instalación	Empotrado o en tablero eléctrico	Compatible con interruptores tradicionales
Consumo en espera	< 1 W	Bajo consumo energético

Nota. Tuya IoT Developer, 2024.

4.2.7.3. Principio de funcionamiento

El interruptor funciona como un relé inteligente controlado vía Wi-Fi. Al ser alimentado con corriente alterna, el módulo interno establece conexión con la red inalámbrica y se sincroniza con la cuenta del usuario en Smart Life. A través de la aplicación móvil o por comandos de voz, el usuario puede activar o desactivar el circuito eléctrico, programar horarios de encendido/apagado y establecer automatizaciones basadas en tiempo o consumo. El dispositivo también permite la supervisión de estado en tiempo real y notificaciones automáticas cuando cambia el estado del relé.

4.2.7.4. Funciones y prestaciones

- Control remoto: encendido y apagado desde cualquier lugar con conexión a Internet.
- Temporización: permite programar el tiempo de operación de la carga conectada.
- Automatización: integración con rutinas y escenarios en Smart Life o Home Assistant.
- Compatibilidad por voz: permite control mediante Alexa, Google Assistant o Alice (Yandex).
- Retroalimentación de estado: notifica al usuario si el dispositivo está encendido o apagado.
- Protección contra sobrecarga: el relé se abre en caso de superar los 16 A nominales.

4.2.7.5. Integración en sistemas IoT

El interruptor Wi-Fi Tuya 16A forma parte del ecosistema Tuya Smart IoT, basado en la nube Tuya Cloud. A través de protocolos seguros de comunicación MQTT y HTTPS, el dispositivo

se sincroniza con el servidor en la nube o con un hub local (Home Assistant). Esta conectividad le permite ser monitoreado y controlado desde entornos domóticos y adaptarse a aplicaciones residenciales o comerciales de bajo consumo (Tuya Developer, 2024).

4.2.7.6. Costo del dispositivo

Este dispositivo es económico, pero los costos de envío pueden ser elevados, para la presente tesis se hizo el pedido de 03 interruptores para poner a prueba su funcionamiento en varios circuitos, siendo el costo estimado de S/. 15.11 soles por cada uno, con un total de S/. 45.33 soles, tal como se ve en la Figura 4.12. El tiempo en llegada de los equipos es de al menos 2 semanas.

Figura 4.12

Costo del mini interruptor



Nota. AliExpress, 2025.

4.2.7.7. Aplicación en el prototipo

En el contexto del prototipo de medidor inteligente, el interruptor Tuya 16A actúa como módulo de control remoto de la carga, permitiendo realizar cortes y reconexiones desde la plataforma Smart Life o Home Assistant. Además, su capacidad de programación y automatización se utiliza para gestionar el consumo eléctrico en horas punta, mejorando las operaciones técnico-comerciales mediante el control de la demanda.

4.2.8. Módulo medidor de energía Wi-Fi Tuya 16A (1 Vía)

4.2.8.1. Descripción general

El medidor de energía Wi-Fi Tuya 16A es un dispositivo inteligente que combina las funciones de medición de variables eléctricas (voltaje, corriente, potencia y energía) con control remoto del circuito eléctrico mediante relé de una vía. Está diseñado para uso residencial y cuenta con comunicación Wi-Fi de 2.4 GHz compatible con la aplicación Smart Life. Permite visualizar el consumo energético en tiempo real, generar estadísticas de uso y controlar el suministro eléctrico de forma remota o automatizada (Tuya Smart, 2024), tal como se ve en la Figura 4.13.

Figura 4.13
Módulo medidor de energía



Nota. Tuya Developer, 2023.

4.2.8.2. Características técnicas

Las características técnicas principales del equipo se detallan en la Tabla 4.7 y Anexo 5:

Tabla 4.7
Características técnicas del módulo medidor de energía

Parámetro		Valor típico	Descripción		
Tensión nominal	100 – 240 V AC		Rango	de	funcionamiento universal
Corriente nominal	16 A		Adecuado para cargas domésticas		
Potencia máxima	3500 W		Capacidad	de	conmutación estándar

Medición de energía	Activa y acumulada (kWh)	Permite seguimiento del consumo
Medición de tensión	$\pm 1\%$ precisión	Visualización en tiempo real
Comunicación	Wi-Fi 2.4 GHz (IEEE 802.11 b/g/n)	Conectividad directa sin hub
Aplicación	Smart Life / Tuya Smart	Compatible con iOS y Android
Protocolos	MQTT, HTTPS	Comunicación segura con la nube
Integración	Alexa, Google Home, Home Assistant	Domótica interoperable

Nota. Tuya IoT Developer, 2024.

4.2.8.3. Principio de funcionamiento

El módulo medidor de energía Wi-Fi integra un sistema electrónico de sensado, acondicionamiento analógico, digitalización y procesamiento embebido, cuyo objetivo es transformar magnitudes eléctricas físicas (tensión y corriente) en variables digitales que permitan estimar la potencia activa y la energía eléctrica consumida. Este principio de medición se basa en técnicas de instrumentación electrónica y procesamiento digital de señales ampliamente empleadas en medidores electrónicos inteligentes y sistemas de telemedición (smart metering).

El proceso inicia con la captura de las señales primarias del sistema eléctrico. La corriente que circula por la carga es determinada mediante un transformador de corriente (TC) externo tipo clamp con relación 80 A – 1000:1, el cual se conecta a los terminales de entrada de señal del equipo (S1–S2). El conductor de fase que alimenta la carga atraviesa el núcleo magnético del TC y constituye el devanado primario, equivalente a una sola espira efectiva. El devanado secundario interno posee aproximadamente 1000 espiras, estableciendo la relación de transformación indicada por el fabricante.

El principio físico de operación se fundamenta en la Ley de Faraday de la inducción electromagnética, según la cual una variación temporal del flujo magnético genera una fuerza electromotriz inducida en el devanado secundario.

La relación de transformación del TC se expresa como:

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

Donde:

I_p = corriente primaria que circula por el conductor de fase (A)

I_s = corriente secundaria inducida en el TC (A)

N_p = número de espiras del primario (en este caso, 1)

N_s = número de espiras del secundario (≈ 1000)

Dado que $N_p = 1$, la ecuación se simplifica a:

$$I_s = \frac{I_p}{1000}$$

Esto significa que la corriente secundaria es mil veces menor que la corriente primaria. La corriente secundaria generada por el TC no es medida directamente por el convertidor analógico-digital (ADC), sino que primero se convierte en una señal de tensión mediante una resistencia de carga (burden resistor) instalada en la etapa de entrada del medidor. Esta conversión se rige por la Ley de Ohm:

$$V_s = I_s \cdot R_b$$

Donde:

V_s = tensión desarrollada en la resistencia burden (V)

I_s = corriente secundaria del TC (A)

R_b = resistencia burden (Ω)

En paralelo, el módulo mide la tensión de línea mediante un divisor resistivo conectado a L y N mediante:

$$V_{ADC} = V_{red} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Donde:

V_{ADC} = tensión reducida que ingresa al circuito de medición (V)

V_{red} = tensión instantánea de red (V)

R_1, R_2 = resistencias del divisor (Ω)

Para fines prácticos del principio de funcionamiento, considerando una tensión nominal de 220 V RMS, los valores equivalentes de $R1=3.3\text{M}\Omega$ y $R2=10\text{k}\Omega$ son obtenidos de acuerdo a las características técnicas del módulo medidor de energía eléctrica, obteniéndose una señal reducida de aproximadamente 0.665 V RMS para la etapa de digitalización. De manera similar, para un TC de relación 80 A:1000:1 y una resistencia burden de $10\ \Omega$, la tensión máxima generada en la entrada de medición es aproximadamente 0.8 V, según se observa en la Tabla 4.8:

Tabla 4.8

Valores del circuito del módulo medidor de energía eléctrica

Parámetro	Valor asumido
Tensión de red (Vred)	220 V RMS
Resistencia superior (R1)	3.3 M Ω
Resistencia inferior (R2)	10 k Ω
Tensión reducida (VADC)	0.665 V RMS
Relación del TC	80 A (1000:1)
Corriente secundaria máxima (Is)	80 mA
Burden resistor (Rb)	10 Ω
Tensión desarrollada (Vs)	0.8 V

Nota. Tuya IoT Developer, 2024.

Una vez reducido el nivel de red (220–240 V AC) a un valor adecuado para la electrónica. Con ambas señales digitalizadas, el sistema calcula la potencia instantánea según:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t)$$

Donde:

$p(t)$ = potencia instantánea (W)

$v(t)$ = tensión instantánea (V)

$i(t)$ = corriente instantánea (A)

La potencia activa promedio se obtiene mediante el valor eficaz (RMS):

$$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \phi$$

Donde:

V_{rms} = tensión eficaz (V)

I_{rms} = corriente eficaz (A)

$\cos \phi$ = factor de potencia

Finalmente, la energía eléctrica consumida se determina por integración temporal:

$$E = \int P dt$$

o en forma discreta:

$$E = P \cdot t$$

donde:

E = energía (Wh o kWh)

P = potencia (W o kW)

t = tiempo de operación (h)

En consecuencia, el transformador de corriente constituye el elemento fundamental del sistema de medición, ya que proporciona aislamiento galvánico, reducción segura de corriente, proporcionalidad lineal y compatibilidad con la etapa electrónica de adquisición, permitiendo que el módulo Wi-Fi Tuya 16A realice mediciones precisas de corriente, potencia y energía dentro de su rango nominal de operación.

Posteriormente, estas señales analógicas ingresan a un convertidor analógico–digital (ADC), encargado de muestrearlas a una frecuencia superior a la componente fundamental de 50/60 Hz, garantizando la correcta reconstrucción de la señal según el criterio de Nyquist. El resultado es un conjunto de muestras discretas $v[n]$ e $i[n]$ que pueden ser procesadas digitalmente por el microcontrolador (Oppenheim & Schafer, 2010).

Una vez digitalizadas, el microcontrolador ejecuta algoritmos de procesamiento digital de señales para calcular la potencia eléctrica. La potencia instantánea se determina mediante la multiplicación de las muestras de tensión y corriente:

$$p[n] = v[n] \cdot i[n]$$

A partir de esta señal, la potencia activa promedio se obtiene promediando las muestras durante un período:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v[n]i[n]$$

Este procedimiento corresponde a la definición física de potencia real en circuitos de corriente alterna (Nilsson & Riedel, 2019).

Posteriormente, la energía eléctrica consumida se calcula integrando la potencia en el tiempo. En forma discreta:

$$E = \sum P \cdot \Delta t$$

Donde Δt es el intervalo de muestreo. El resultado se expresa normalmente en watt-hora (Wh) o kilowatt-hora (kWh). Este método de integración temporal constituye la base de funcionamiento de los medidores electrónicos de energía utilizados en sistemas de medición avanzada (AMI) (Gungor et al., 2011).

Finalmente, los valores calculados se almacenan como datos digitales binarios y se transmiten mediante el módulo de comunicación Wi-Fi hacia plataformas locales o en la nube. En esta etapa ya no se manejan señales eléctricas analógicas, sino paquetes de información codificados, los cuales pueden ser visualizados o gestionados por aplicaciones de monitoreo energético. En conjunto, este esquema convierte magnitudes eléctricas físicas en información digital cuantificable, permitiendo una medición precisa, automatizada y compatible con arquitecturas de telemedición inteligente.

4.2.8.4. Funciones principales

- Medición en tiempo real: muestra tensión, corriente, potencia instantánea y energía acumulada.
- Historial de consumo: permite revisar registros diarios, semanales y mensuales.
- Control remoto de energía: permite encender o apagar el circuito desde el móvil.
- Programación horaria: temporizador y automatizaciones configurables.
- Protección eléctrica: corte automático por sobrecarga o sobrecalentamiento.
- Notificaciones inteligentes: alertas al alcanzar valores límite de potencia.
- Compatibilidad IoT: integración con Alexa, Google Home y Home Assistant.

4.2.8.5. Ventajas técnicas

- Instalación sencilla: no requiere cableado adicional ni módulos externos.
- Alta compatibilidad: funciona con redes Wi-Fi domésticas estándar.
- Monitoreo de consumo energético: contribuye al uso racional de la energía.
- Gestión remota: ideal para proyectos de control técnico-comercial de energía eléctrica.

4.2.8.6. Costo del dispositivo

Este dispositivo es económico, pero los costos de envío pueden ser elevados, para la presente tesis se hizo el pedido de 01 módulo medidor de energía, siendo el costo estimado de S/. 50.89 soles (sin considerar el costo del envío), tal como se ve en la Figura 4.14. Pero se debe tomar en cuenta el tiempo en llegada del equipo que fue de al menos 2 semanas.

Figura 4.14

Costo del módulo de medidor de energía

The image shows a screenshot of an AliExpress product page for a 'Tuya WiFi inteligente medidor de energía 1 canal con abrazadera de transformador de corriente aplicación Monitor potencia 80A 100V/240V 50/60Hz'. The product is displayed with its packaging and a black cable. The price is listed as S/50.89, with a 'Próximo precio S/46.90' indicated. The product has a 4.8-star rating and 36 reviews. The page also features a 'Mega ChoiceDay' promotion and compatibility logos for Smart Life, Google Home, and Amazon Alexa.

Nota. AliExpress, 2025.

4.2.8.7. Integración en el sistema del prototipo

En el prototipo del medidor inteligente, este dispositivo cumple la función de módulo de medición principal. Proporciona datos eléctricos al sistema Home Assistant mediante el protocolo MQTT, los cuales se registran en un panel de control para su análisis. También se utiliza para acciones automáticas: corte del suministro cuando el consumo supera los valores umbral,

reconexión programada y registro estadístico del consumo. Gracias a su conectividad, permite replicar el comportamiento de un sistema AMI simplificado (Advanced Metering Infrastructure) para usuarios residenciales.

4.2.8.8. Comparación técnica entre ambos dispositivos

Las características técnicas principales del equipo se detallan en la Tabla 4.9:

Tabla 4.9

Comparación técnica entre interruptor y medidor de energía

Característica	Interruptor Wi-Fi Tuya 16A	Medidor de energía Wi-Fi Tuya 16A
Función principal	Control remoto (encendido/apagado)	Medición y control de energía
Medición eléctrica	No posee	Voltaje, corriente, potencia, energía
Control por voz	Sí (Alexa, Google, Alice)	Sí (Alexa, Google, Alice)
Comunicación	Wi-Fi 2.4 GHz	Wi-Fi 2.4 GHz
Relé interno	Sí, 1 vía (SPST)	Sí, 1 vía (SPST)
Aplicación móvil	Smart Life / Tuya Smart	Smart Life / Tuya Smart
Integración domótica	Home Assistant, Tuya Cloud	Home Assistant, Tuya Cloud
Uso típico	Encendido de cargas eléctricas	Medición del consumo energético
Precio promedio (2025)	USD 8 – 10	USD 12 – 15

Nota. Tuya IoT Developer, 2024.

4.2.9. Plataforma de gestión móvil Smart Life

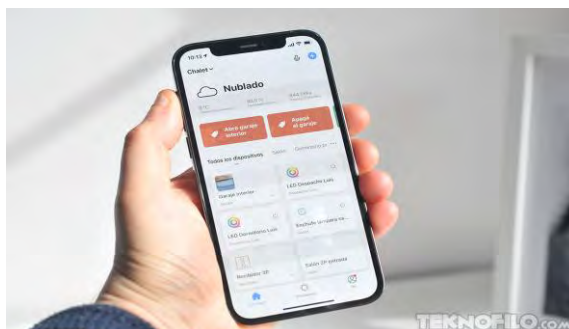
4.2.9.1. Descripción general

La plataforma Smart Life es una aplicación móvil desarrollada por la empresa Tuya Smart, que permite controlar, automatizar y supervisar dispositivos inteligentes conectados mediante Wi-

Fi, Bluetooth o Zigbee. Se encuentra disponible de forma gratuita para los sistemas Android e iOS, y es una de las plataformas de IoT más utilizadas a nivel mundial gracias a su interfaz intuitiva, su compatibilidad universal y su capacidad de integrarse con asistentes de voz como Amazon Alexa, Google Home y Alice (Tuya Smart, 2024).

Figura 4.15

Plataforma de gestión de Smart Life



Nota. Teknofilo.com, 2025.

En el contexto del presente trabajo de investigación, Smart Life cumple un rol esencial como plataforma de gestión remota de los dispositivos Tuya Wi-Fi 16A (medidor de energía e interruptor), los cuales se comunican directamente con la aplicación a través de la red inalámbrica del sistema de prueba. De este modo, el usuario puede visualizar los consumos eléctricos, programar horarios de encendido/apagado, y realizar el control de cargas desde un teléfono inteligente o tableta, sin necesidad de equipos adicionales.

4.2.9.2. Arquitectura y funcionamiento

La aplicación Smart Life se basa en la arquitectura Tuya IoT Cloud, que enlaza los dispositivos inteligentes con los usuarios mediante tres capas:

- Capa de dispositivo: sensores, medidores, actuadores o interruptores conectados a Wi-Fi o Zigbee.
- Capa de nube (Tuya Cloud): gestiona la comunicación, autenticación y almacenamiento de datos.
- Capa de usuario (App Smart Life): interfaz móvil donde se ejecutan las funciones de monitoreo y control.

Cuando un usuario agrega un dispositivo Tuya (por ejemplo, el medidor de energía Wi-Fi

16A), este se registra automáticamente en la nube de Tuya, permitiendo la sincronización en tiempo real con la aplicación. Smart Life también permite asignar escenas automatizadas, como “Apagar circuito cuando el consumo exceda los 2 000 W” o “Encender a las 6 p.m.”, que se configuran desde la interfaz de la app.

4.2.9.3. Funciones principales

Entre las funciones más relevantes de Smart Life para el desarrollo del prototipo se destacan:

- Monitoreo de consumo eléctrico: muestra en tiempo real los valores de tensión, corriente, potencia y energía acumulada del medidor inteligente Tuya.
- Control remoto de cargas: permite encender o apagar el interruptor Wi-Fi de 16A desde cualquier ubicación con acceso a Internet.
- Automatización de horarios: posibilita crear temporizadores o reglas de automatización para optimizar el uso de energía.
- Integración con asistentes de voz: compatible con Alexa, Google Home y Alice para control mediante comandos de voz.
- Reportes energéticos: presenta estadísticas diarias o mensuales sobre consumo eléctrico, facilitando el análisis técnico-comercial.

4.2.9.4. Aplicación dentro del prototipo

En el diseño del prototipo de medidor inteligente, la plataforma Smart Life cumple dos funciones fundamentales:

- Interfaz de usuario y control remoto: permite al investigador o al usuario final interactuar con los dispositivos sin acceder directamente al servidor Home Assistant.
- Verificación y calibración: al visualizar los valores eléctricos reportados por el medidor Tuya, se puede contrastar la exactitud de las mediciones con los registros obtenidos en el servidor local (Home Assistant Green).

Asimismo, la integración de Smart Life con Home Assistant mediante la API de Tuya facilita la comunicación bidireccional, de modo que las acciones ejecutadas en la app se reflejan en el panel de control local y viceversa (Tuya Developer, 2024).

4.2.9.5. Ventajas técnicas

- Compatibilidad amplia: soporta más de 500 marcas y 100 000 dispositivos IoT certificados por Tuya.
- Facilidad de configuración: permite vincular dispositivos en pocos pasos mediante protocolo EZ Mode (Easy Connect) o AP Mode.
- Control remoto global: gestión completa desde cualquier red con acceso a Internet.
- Integración con plataformas locales: interoperabilidad con Home Assistant, Node-RED o MQTT mediante claves API.
- Soporte gratuito y actualizaciones automáticas: garantiza estabilidad y continuidad del servicio.

Estas características hacen que Smart Life sea una herramienta ideal para implementar proyectos de automatización energética, monitoreo de consumos y telecontrol de equipos eléctricos a bajo costo, sin necesidad de desarrollar software adicional.

4.2.9.6. Consideraciones sobre privacidad y operación local

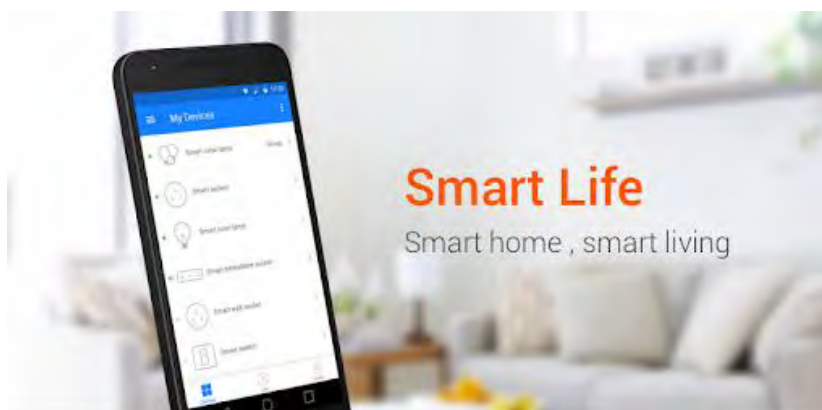
A pesar de sus múltiples ventajas, Smart Life depende de la nube Tuya, por lo que requiere conexión constante a Internet para ejecutar la mayoría de sus funciones. Sin embargo, al integrarse con Home Assistant, se logra una reducción en la dependencia de la nube, permitiendo el funcionamiento parcial de los dispositivos en modo local mediante Tuya LAN API, garantizando así mayor privacidad y autonomía operativa (Tuya Developer, 2024).

4.2.9.7. Costos y disponibilidad

La aplicación Smart Life es completamente gratuita, y se encuentra disponible en las tiendas digitales Google Play y App Store, tal como se ve en la Figura 4.16. Su uso no requiere licencias ni pagos adicionales, lo que la convierte en una herramienta económica para la gestión de dispositivos IoT en proyectos de investigación o implementación piloto de sistemas AMI domésticos.

Figura 4.16

Costo de la plataforma de gestión de Smart Life



Nota. Smart Life, 2025.

4.2.10. Repetidor Wi-Fi inalámbrico de 300 Mbps

4.2.10.1. Descripción general

El repetidor Wi-Fi inalámbrico de 300 Mbps es un dispositivo de red que amplifica la señal inalámbrica existente para extender su cobertura en áreas donde la intensidad del Wi-Fi es débil. Opera bajo el estándar IEEE 802.11 n, compatible con versiones anteriores (802.11 b/g), y alcanza velocidades de hasta 300 Mbps en banda de 2.4 GHz (TP-Link, 2023). Su configuración se realiza mediante los modos Repeater, Router, Access Point o WPS, siendo el primero el más utilizado en este prototipo, tal como se ve en la Figura 4.17.

Figura 4.17

Repetidor WiFi



Nota. Amazon.es, 2025.

4.2.10.2. Función dentro del prototipo

En el sistema de medición inteligente, el repetidor tiene la función de garantizar la

conectividad estable entre el Home Assistant Green, los dispositivos Tuya Wi-Fi 16A (medidor e interruptor) y el módem 4G LTE. Esto resulta crucial para mantener la comunicación constante y evitar pérdidas de paquetes o desconexiones, especialmente durante el envío de datos eléctricos hacia la plataforma de gestión (Smart Life o Home Assistant).

4.2.10.3. Ventajas técnicas

- Incrementa el rango de cobertura hasta 50 metros adicionales.
- Permite conexión simultánea de varios dispositivos IoT.
- Bajo consumo (< 5 W).
- Fácil configuración mediante WPS.
- Mejora la estabilidad del enlace en zonas con interferencia.

4.2.10.4. Costo y disponibilidad

En el Perú se encuentra este dispositivo muy económico, pero los costos de envío pueden ser elevados, para la presente tesis se hizo el pedido de 01 repetidor, siendo el costo estimado de S/. 18.46 soles por cada uno, tal como se ve en la Figura 4.18. El tiempo en llegada del equipo fue de al menos 2 semanas.

Figura 4.18

Costo del repetidor WiFi

The screenshot shows the AliExpress product page for a 'WiFi Repeater'. The product is described as a 'Repetidor WiFi inalámbrico, extensor de 300Mbps, amplificador, enrutador 802.11N, WPS, largo alcance, luz de 7 Estados, para PC'. It has a rating of 4.5 stars from 872 reviews and over 4,000 units sold. The current price is S/18.46, with a 'Próximo precio' of S/16.15. The page also features a 'Mega ChoiceDay • SuperOfertas' banner and a 'Color: White 7 Status Light' selection. The 'Tipo de enchufe' is set to 'enchufe europeo'.

AliExpress home assistant green

WiFi Repeater 300Mbps

Long Range Extender

2.4Ghz Super Signal

7 kind of Status Light

WPS Quick Connect

Repetidor WiFi inalámbrico, extensor de 300Mbps, amplificador, enrutador 802.11N, WPS, largo alcance, luz de 7 Estados, para PC

★★★★★ 4.5 872 valoraciones | 4.000+ vendido(s)

Mega ChoiceDay • SuperOfertas Empieza: 1 nov., 02:00 (GMT-5)

S/18.46 ⚡ Próximo precio S/16.15

Precio mostrado antes de impuestos ; 1% de descuento extra

👉 -S/7.00 en S/49.04

Color: White 7 Status Light

Tipo de enchufe: enchufe europeo

enchufe europeo Enchufe estadounidense

Nota. AliExpress, 2025.

4.2.11. Módem portátil ZTE MF920V 4G LTE

4.2.11.1. Descripción general

El ZTE MF920V es un módem portátil 4G LTE (MiFi) que permite compartir una conexión móvil de banda ancha mediante Wi-Fi o cable USB. Ofrece una velocidad máxima de 150 Mbps de descarga y 50 Mbps de subida, soportando hasta 10 dispositivos conectados simultáneamente. Su batería de 2000 mAh permite una autonomía de 6 a 8 horas de funcionamiento continuo (ZTE Corporation, 2024), tal como se ve en la Figura 4.19.

Figura 4.19

Módem portátil ZTE



Nota. Mercado Libre, 2025.

4.2.11.2. Función dentro del prototipo

Este módem proporciona la conectividad principal a Internet para todo el sistema, permitiendo la comunicación entre la app Smart Life, la plataforma Home Assistant, y los dispositivos Tuya. En entornos donde no existe una red fija (como viviendas rurales o zonas piloto), el ZTE MF920V asegura la transmisión inalámbrica de datos AMI en tiempo real, esto es muy importante debido a las condiciones desfavorables antes descritas en esta investigación.

4.2.11.3. Ventajas técnicas

- Compatible con operadores 4G LTE como Entel, Claro, Movistar y Bitel.
- Interfaz web de administración simple.
- Funciona como punto de acceso Wi-Fi o enrutador USB.
- Compatible con IPv4 e IPv6.

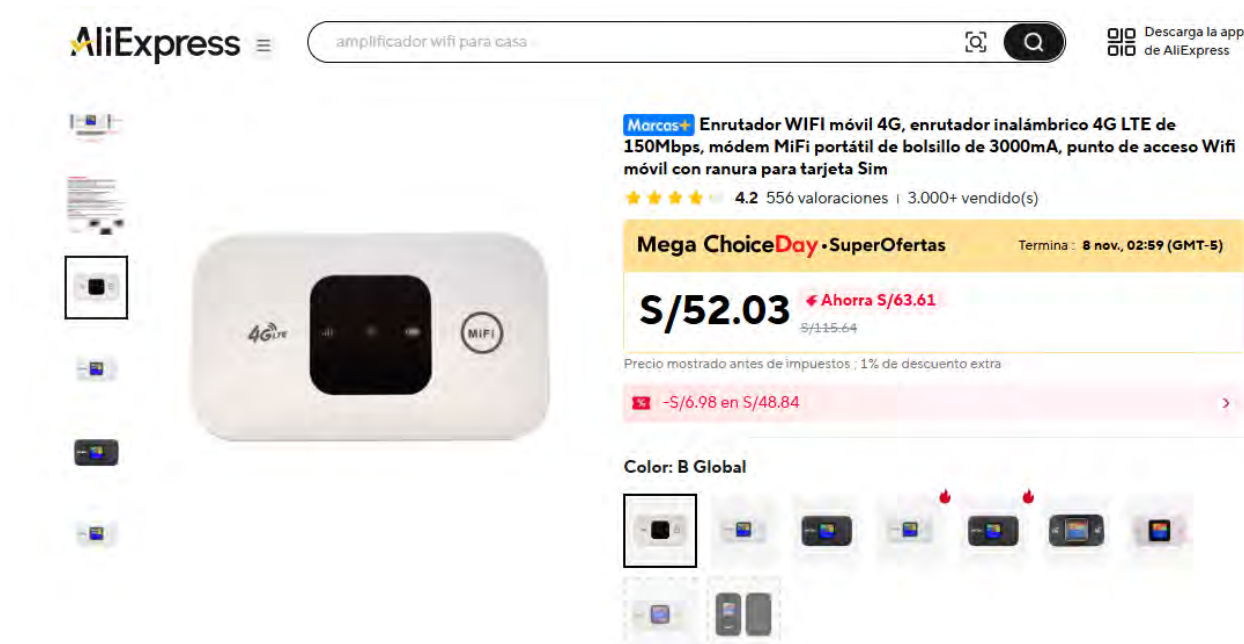
- Permite conexión a repetidor Wi-Fi para ampliar cobertura.

4.2.11.4. Costo y disponibilidad

En tiendas físicas o virtuales el ZTE MF920V se vende en aproximadamente en S/. 52.03, tal como se ve en la Figura 4.20. En este caso el tiempo en llegada y entrega del equipo fue inmediato.

Figura 4.20

Costo del módem portátil



Nota. Saga Falabella, 2025.

4.2.12. Chip 4G LTE para Internet

4.2.12.1. Descripción general

El chip 4G LTE o SIM card es el elemento de conectividad que proporciona acceso a la red de datos móviles del operador (Movistar, Entel, Claro o Bitel). Su función es establecer la conexión de red del módem 4G LTE y garantizar la comunicación hacia la nube o aplicaciones móviles (Osipitel, 2024), tal como se ve en la Figura 4.21. Así como en el Sistema AMI piloto implementado en Cusco, los concentradores usan la red de telefonía móvil para comunicar los datos recolectados a la página de Power Gate de la Empresa Electro Sur Este S.A.A.

Figura 4.21*Chip de datos móviles*

Nota. freepik.es, 2025.

4.2.12.2. Función dentro del prototipo

Permite que el módem ZTE MF920V se conecte a Internet, brindando acceso remoto y sincronización de los dispositivos Tuya Wi-Fi con la aplicación Smart Life. Es fundamental para realizar pruebas en campo o zonas donde no exista red fija, simulando la conectividad típica de un sistema AMI móvil o residencial independiente.

4.2.12.3. Ventajas técnicas

- Portabilidad total y conexión inmediata.
- Amplia cobertura nacional.
- Capacidad para compartir Internet con múltiples nodos IoT.
- Posibilidad de elegir operador con mejor latencia según ubicación.

4.2.12.4. Costo y disponibilidad

Existen muchas empresas de telefonía móvil en el Perú, pero dentro del Sistema AMI piloto implementado en Cusco, los concentradores usan la red Bittell, siendo esta red un poco inestable, por lo que se optó por tomar la red de Claro, la cual tiene mayor cobertura, el precio del chip es de tan solo S/. 5.00 soles aproximadamente, tal como se ve en la Figura 4.22, pero los paquetes de datos tienen otro precio, siendo de distintos costos mensuales, al tratarse de la comunicación de un solo medidor se optó por usar el paquete de internet de 250 MB que viene incluido con el chip.

Figura 4.22*Costo de chip de datos móviles*

Nota. Claro Perú, 2025.

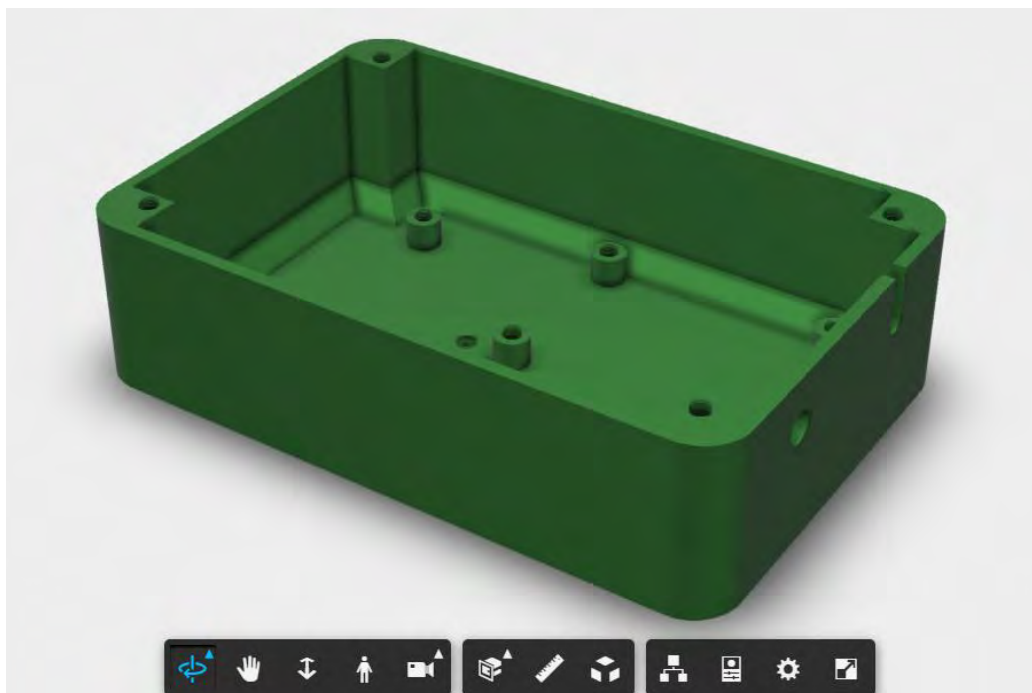
4.2.13. Caja para medidor impresa en 3D (con accesorios)

4.2.13.1. Descripción general

La caja protectora impresa en 3D se modeló en el software Blender y posteriormente se fabricó mediante tecnología de modelado por deposición fundida (FDM), utilizando filamento PLA (ácido poliláctico), tal como se ve en la Figura 4.23. Esta carcasa fue diseñada específicamente para alojar el medidor de energía Wi-Fi Tuya 16A, el interruptor Wi-Fi, los cables de conexión, el sensor de corriente, el modem WiFi y un adaptador de corriente para alimentación, garantizando aislamiento eléctrico y seguridad estructural (Gómez & Ramírez, 2023).

Así mismo la caja impresa ofrece espacio adicional para añadir o mejorar con cualquier otro sensor o dispositivo adicional para hecer del prototipo de medidor inteligente más óptimo en situaciones reales de uso.

Figura 4.23*Modelo 3D de la caja para el medidor inteligente*



Nota. Blender, 2025.

4.2.13.2. Función dentro del prototipo

Actúa como soporte físico y de protección, asegurando la correcta disposición de los componentes electrónicos y facilitando su transporte o instalación. Además, incluye perforaciones para ventilación, terminales de entrada/salida y ranuras para fijación de accesorios, permitiendo un diseño compacto y ergonómico del sistema.

4.2.13.3. Ventajas técnicas

- Personalización total del diseño según dimensiones del prototipo.
- Material ligero, reciclable y dieléctrico.
- Costo reducido frente a cajas metálicas.
- Permite modificaciones rápidas y mantenimiento accesible.

4.2.13.4. Costo y disponibilidad

En la ciudad del Cusco existen pocas impresoras en 3D, el costo por hora de impresión es de aproximadamente S/. 70.00, teniendo el modelo en 3D la impresión costó S/. 80.00 soles exactamente, tal como se ve en la Figura 4.24, siendo el color azul como se muestra en la imagen, cabe señalar que se hicieron configuraciones posteriores para acoplar todos los elementos del

medidor inteligente, tal como se muestra en el Anexo 14.

Figura 4.24

Impresión 3D de la caja para el medidor inteligente



Nota. Elaboración propia, 2025.

4.2.14. Laptop (centro de monitoreo)

4.2.14.1. Descripción técnica y función en el prototipo

La laptop cumple un rol fundamental en la implementación del prototipo de medidor inteligente, ya que actúa como estación de configuración, monitoreo, control y análisis de datos del sistema Home Assistant. Este software requiere un equipo con buena capacidad de procesamiento para ejecutar tareas de automatización, integración de dispositivos IoT, gestión de base de datos local y conexión simultánea a la red Wi-Fi o Ethernet. Según la documentación oficial de Home Assistant Operating System (HAOS) y la versión Home Assistant Supervised, los requisitos mínimos para un funcionamiento estable son:

- Procesador: Dual-Core de 64 bits (Intel o AMD)
- Memoria RAM: 4 GB (recomendado ≥ 8 GB)
- Almacenamiento: 32 GB mínimo (SSD recomendado para reducir latencia y desgaste del sistema)
- Sistema operativo compatible: Windows 10/11, Linux o macOS (para ejecución mediante máquina virtual o Docker)
- Conectividad: Adaptador de red Ethernet y Wi-Fi de doble banda (2.4 y 5 GHz)

Este equipo permite analizar los datos en tiempo real del consumo energético, simular la facturación y controlar el encendido o corte remoto del suministro, cumpliendo los objetivos técnico-comerciales del prototipo. Además, ofrece portabilidad y flexibilidad para realizar pruebas de campo y configuraciones en distintos entornos, lo que no sería posible con un servidor fijo. Esto es especialmente relevante en proyectos piloto donde el sistema debe ser replicable o escalable.

4.2.14.2. Requerimientos del sistema Home Assistant

Los requerimientos principales del software se detallan en la Tabla 4.10:

Tabla 4.10

Requerimientos mínimos de la laptop

Componente	Requerimiento mínimo	Recomendado para prototipos IoT	Implementado en el proyecto
CPU	Dual-Core 64 bits	Intel i5 o Ryzen 5 (≥ 2.4 GHz)	Ryzen 7 7. ^a gen
RAM	4 GB	8 GB	16 GB DDR4
Almacenamiento	32 GB	SSD 256 GB	SSD 500 GB
Sistema operativo	Windows/.Linux/macOS	Windows 11 + Docker o HAOS VM	Windows 11
Red	Wi-Fi/Ethernet	Doble banda 2.4/5 GHz	Wi-Fi 2.4 GHz + Ethernet Cat6
Pantalla y puertos	$\geq 13"$ + USB	HDMI + USB 3.0 + RJ45 (opcional)	HDMI + USB-C + RJ45 adaptador

Nota. Home Assistant OS Documentation, 2025.

4.2.14.3. Ventajas del uso de laptop en el sistema AMI

- Permite configurar y monitorear Home Assistant de forma local o remota.
- Facilita el procesamiento y visualización de datos energéticos en dashboards.

- Sirve como servidor intermedio o estación de respaldo del Home Assistant Green.
- Reduce los tiempos de respuesta en tareas de automatización local (sin depender de la nube).
- Facilita la integración con software de análisis estadístico o modelamiento energético (como Excel, Python o Power BI).

Estas características refuerzan la confiabilidad del sistema AMI piloto desarrollado, cumpliendo con las necesidades de un entorno residencial inteligente y mejorando la gestión técnico-comercial de energía.

4.2.15. Cable Ethernet

4.2.15.1. Descripción general

El cable Ethernet categoría 6 (Cat 6) es un medio físico de transmisión de datos que soporta velocidades de hasta 1 Gbps en distancias de 100 m. Está compuesto por pares trenzados de cobre y conectores RJ-45, proporcionando una conexión estable y de baja latencia (IEEE, 2023).

4.2.15.2. Función dentro del prototipo

Conecta el Home Assistant Green al repetidor Wi-Fi que a su vez está conectado vía WiFi al módem ZTE, asegurando una comunicación continua entre el servidor local y los dispositivos IoT. Su uso reduce las interferencias electromagnéticas típicas de las conexiones inalámbricas, especialmente durante pruebas de transmisión de datos eléctricos.

4.2.15.3. Ventajas técnicas

- Mayor estabilidad y velocidad que el Wi-Fi.
- Alta inmunidad al ruido electromagnético.
- Compatible con equipos de red Gigabit.
- Bajo costo y durabilidad prolongada.

4.2.16. Multímetro Sanwa DCL1000

4.2.16.1. Descripción general

El multímetro tipo pinza Sanwa DCL1000 es un instrumento de medición eléctrica diseñado para registrar magnitudes fundamentales del sistema eléctrico tales como corriente

alterna (AC), tensión (T), resistencia (R) y frecuencia (F), de manera segura y sin necesidad de interrumpir el circuito. Este equipo utiliza el principio del efecto Hall para detectar el campo magnético generado por la corriente que circula por un conductor, transformándolo en una lectura precisa de amperaje, tal como se muestra en el Anexo 13.

En la presente tesis, el Sanwa DCL1000 se emplea como instrumento de contraste y verificación de los valores eléctricos medidos por el módulo Tuya Wi-Fi Smart Energy Meter, asegurando la validez de las mediciones de tensión, corriente, potencia y energía. Su uso permite comparar los datos reportados por el medidor inteligente con los valores reales obtenidos por un instrumento profesional calibrado, garantizando trazabilidad metrológica y precisión en la validación experimental del sistema, tal como se ve en la Figura 4.25.

Figura 4.25

Multímetro tipo pinza Sanwa DCL1000



Nota. Sanwa Electric Instrument Co., Ltd., 2023.

4.2.16.2. Características técnicas

Las especificaciones principales del equipo se detallan en la Tabla 4.11:

Tabla 4.11

Características técnicas del multímetro Sanwa DCL1000

Parámetro	Valor típico	Descripción
Corriente alterna (AC)	0 – 1000 A	Medición de corriente mediante sensor Hall con alta precisión
Tensión alterna (AC)	0 – 1000 V	Permite mediciones directas sin necesidad de desconexión
Precisión de corriente	± 1.5 % del valor de lectura	Margen de error bajo, ideal para validaciones técnicas
Precisión de tensión	± 1.2 % del valor de lectura	Lectura estable y confiable
Resolución mínima	0.1 A / 0.1 V	Alta sensibilidad para mediciones residenciales
Frecuencia	40 Hz – 1 kHz	Adecuado para redes eléctricas de baja tensión
Funciones adicionales	Retención de datos (Hold), registro máximo/mínimo, apagado automático	Mejora la seguridad y comodidad del operador
Alimentación	2 baterías AA (1.5 V)	Bajo consumo energético
Peso	310 g	Ligero y portátil

Nota. Sanwa Electric Instrument Co., Ltd., 2023.

4.2.16.3. Principio de funcionamiento

El Sanwa DCL1000 opera bajo el principio del efecto Hall, según el cual un campo magnético perpendicular al flujo de corriente en un conductor induce una diferencia de potencial proporcional a la magnitud de dicha corriente. El sensor Hall incorporado en la pinza detecta el campo magnético generado por el paso de corriente eléctrica, convirtiéndolo en una señal eléctrica procesada por el circuito interno del multímetro para mostrar el valor en su pantalla digital (Flores & Cárdenas, 2022).

Este método no invasivo evita la apertura del circuito eléctrico, garantizando la seguridad del operador y la integridad del sistema bajo prueba. Además, su capacidad para medir tanto corriente como tensión y potencia aparente lo convierte en un instrumento indispensable para la verificación del correcto funcionamiento del medidor inteligente.

4.2.16.4. Funciones principales

- Medición de corriente alterna (AC) hasta 1000 A con alta precisión.
- Medición de tensión alterna (AC) hasta 1000 V en sistemas monofásicos.
- Cálculo de potencia aparente (VA) y factor de potencia ($\cos \phi$).
- Medición de resistencia y continuidad eléctrica.
- Función “Data Hold” y registro de valores máximos/.mínimos.
- Protección contra sobrecarga y polaridad inversa.
- Apagado automático para ahorro de batería.
- Indicador de batería baja para evitar errores de lectura.

4.2.16.5. Ventajas técnicas

- Alta precisión y confiabilidad, ideal para validaciones de prototipos eléctricos.
- Medición sin contacto, lo que incrementa la seguridad del operador.
- Compatibilidad con sistemas monofásicos de baja tensión, adecuados para instalaciones residenciales.
- Diseño robusto y ergonómico, permite su uso en campo o laboratorio.
- Amplio rango de corriente, útil para evaluar diversos tipos de cargas.
- Soporte de mediciones complementarias (voltaje, resistencia, potencia, frecuencia), facilitando el análisis integral de las pruebas experimentales.

4.2.16.6. Integración en el sistema del prototipo

En el contexto del prototipo de medidor inteligente, el Sanwa DCL1000 cumple la función de instrumento de verificación externa. Durante las pruebas experimentales, se utilizó para medir en paralelo la corriente y la tensión de las cargas conectadas al módulo medidor Tuya Wi-Fi Smart Energy Meter, permitiendo comparar las lecturas registradas en la aplicación Smart Life con los valores reales obtenidos mediante la pinza.

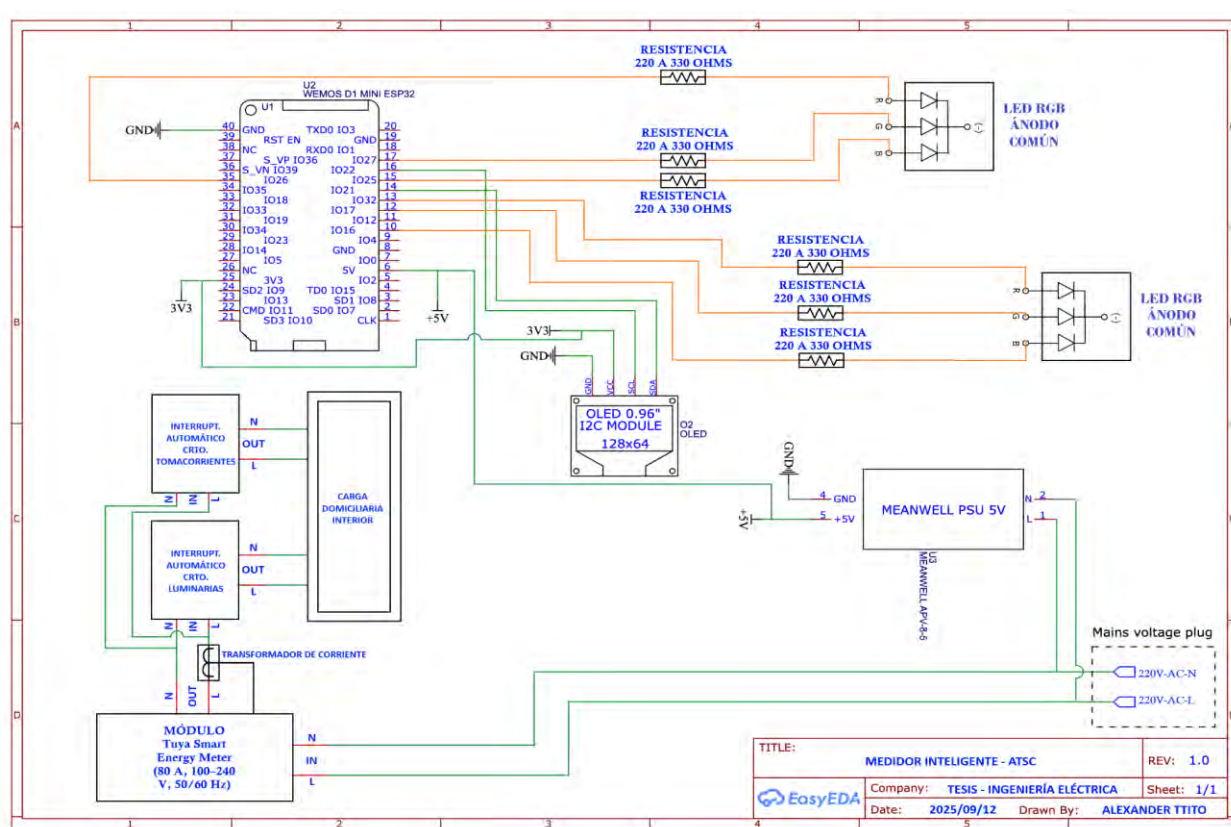
Estas mediciones permitieron determinar el margen de error del sistema Tuya, el cual se mantuvo dentro de $\pm 2\%$ respecto a las lecturas del Sanwa DCL1000, validando así la exactitud de los datos obtenidos por el medidor inteligente. Gracias a este procedimiento, se garantizó la confiabilidad del sistema de lectura remota, asegurando su viabilidad técnica en aplicaciones de monitoreo energético y control técnico-comercial.

4.2.16.7. Esquema de conexión eléctrica

El esquema interno del medidor inteligente se muestra en la siguiente figura. En él se observa la conexión del microcontrolador, la pantalla OLED, los leds RGB (del pulsador y de calidad), el adaptador de 5V, el módulo medidor de energía y los dos interruptores automáticos línea abajo, destacando el transformador de corriente conectado a la salida del módulo medidor de energía. Las líneas de alimentación y retorno están protegidas mediante el interruptor termomagnético, asegurando la desconexión rápida en caso de sobrecarga o cortocircuito, tal como se ve en la Figura 4.26.

Figura 4.26

Esquema de diseño del prototipo de medidor inteligente



Nota. Elaboración propia, 2025.

De acuerdo con el Reglamento Nacional de Instalaciones Eléctricas (RNE, 2021), toda instalación debe incorporar dispositivos de protección adecuados al calibre del conductor, con el fin de garantizar la integridad del sistema y del operador.

4.3. Procedimiento de programación y configuración del prototipo de medidor inteligente

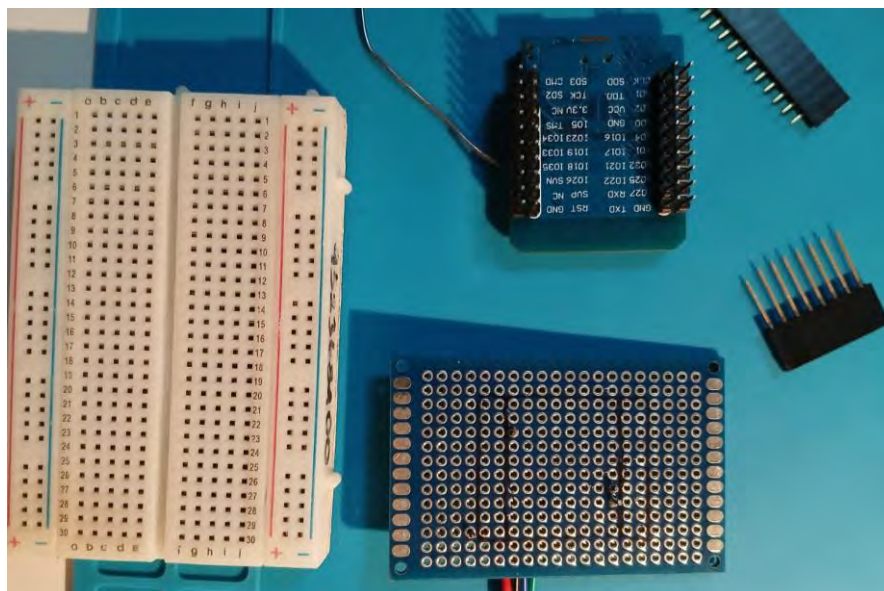
4.3.1. Configuración del prototipo de medidor inteligente

4.3.1.1 Verificación inicial de componentes

El proceso de configuración del prototipo de medidor inteligente siguió una secuencia metodológica estructurada, orientada a garantizar la correcta integración entre los módulos electrónicos, el sistema de comunicación inalámbrica y la plataforma de gestión Home Assistant, tal como se ve en la Figura 4.27. El desarrollo inició con la verificación visual del buen estado de los componentes principales, incluyendo el medidor inteligente Tuya 16 A, el interruptor Tuya, el microcontrolador ESP32, la pantalla OLED SSD1306, los dos LED indicadores (LED RGB de calidad y el LED pulsador de 1600 impulsos/.kWh), la fuente Mean Well 5 V, el módem MiFi ZTE MF920V y el repetidor Wi-Fi de 300 Mbps.

Figura 4.27

Verificación inicial de los componentes principales



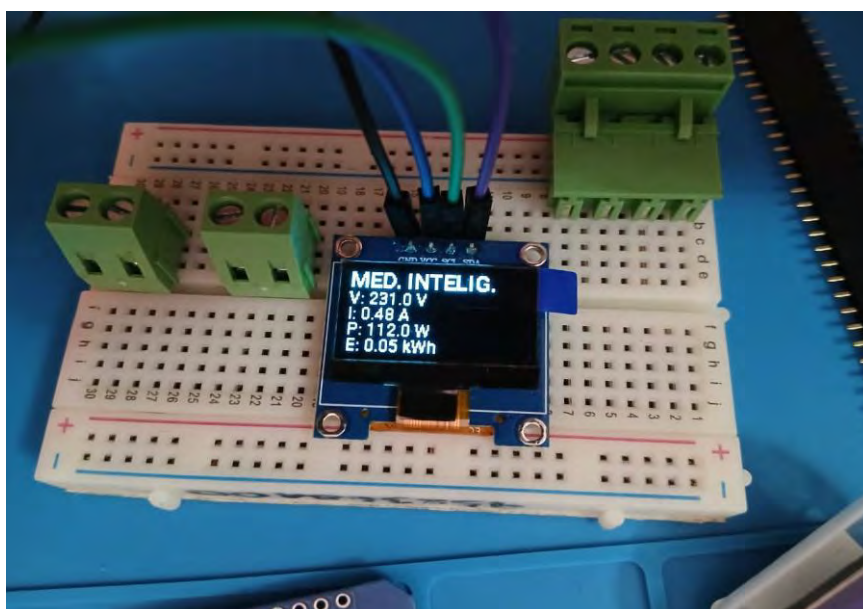
Nota. Elaboración propia, 2025.

4.3.1.2 Pruebas iniciales de funcionamiento (Bench Test)

Posteriormente, se efectuaron las pruebas de funcionamiento iniciales (bench tests), donde cada dispositivo fue energizado individualmente para validar su operatividad. En esta etapa se verificó el correcto inicio del medidor Tuya, la generación de lecturas fundamentales (tensión, corriente y potencia), el funcionamiento del ESP32 bajo firmware ESPHome, la visualización de datos en la pantalla OLED y la acción de los LED indicadores. Asimismo, se comprobó el rendimiento de la fuente Mean Well 5 V como suministro estable para los periféricos de baja tensión del prototipo, tal como se ve en la Figura 4.28.

Figura 4.28

Pruebas de funcionamiento iniciales



Nota. Elaboración propia, 2025.

En la imagen anterior se observa la prueba de funcionamiento de la pantalla OLED de 0.96", siendo esta alimentada por el microcontrolador ESP32 que reduce la tensión en corriente continua de 5V a 3.3V.

4.3.1.3 Ensamblaje y conexionado del prototipo

En una siguiente fase, se procedió al ensamblaje y conexión física del prototipo dentro de la caja 3D, organizando los cables de potencia y lógica bajo criterios de seguridad eléctrica. Se integraron la fase y neutro hacia el medidor Tuya y el interruptor, se incorporó el ESP32 para la visualización y señalización local, se conectó el OLED vía bus I²C (SDA y SCL), y se instalaron

el LED RGB y el LED pulsador considerando sus resistencias limitadoras. La fuente Mean Well proporcionó la alimentación regulada de 5 V para el ESP32, la pantalla y los LED, tal como se ve en la Figura 4.29.

Figura 4.29

Ensamblaje y conexión física del prototipo



Nota. Elaboración propia, 2025.

En la imagen anterior se observa la prueba de funcionamiento del microcontrolador ESP32 alimentado con una fuente de tensión en corriente continua de 5V, se aprecia también que del microcontrolador se alimentan a los otros componentes (LED's RGB y a la pantalla OLED).

4.3.1.4 Configuración de los dispositivos IoT (Smart Life)

Una vez completado el conexionado y alimentación, se realizó el emparejamiento inicial en Smart Life, registrando el medidor Tuya y el interruptor como dispositivos independientes dentro de la red Wi-Fi de 2.4 GHz. Este proceso permitió que ambos equipos quedaran accesibles

para su posterior integración mediante la API Tuya dentro de Home Assistant, tal como se ve en la Figura 4.30.

Figura 4.30

Emparejamiento inicial en Smart Life



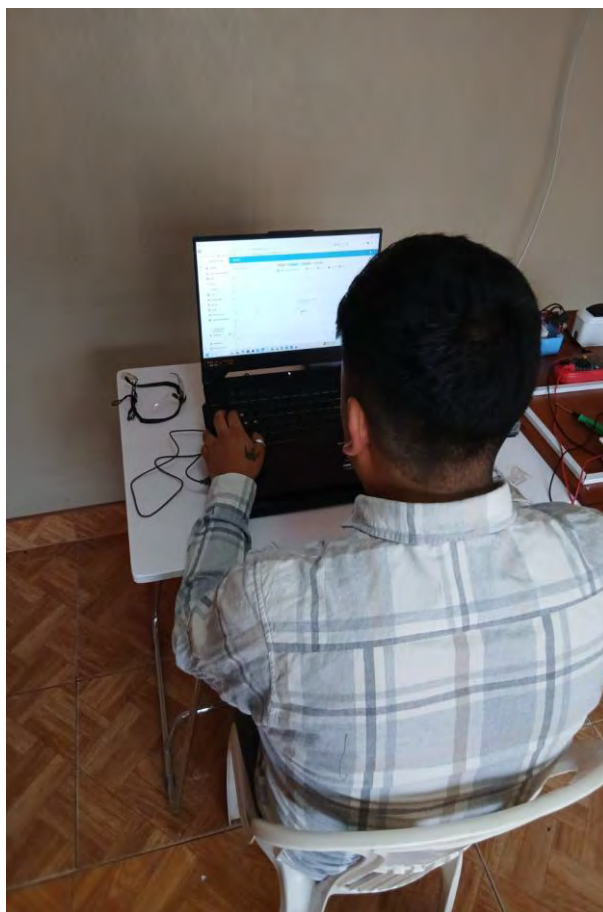
Nota. Aplicación Smart Life, 2025.

4.3.1.5 Integración con la plataforma Home Assistant

Posteriormente, se instaló y configuró Home Assistant en una laptop, habilitando módulos esenciales como la integración Tuya, la API ESPHome y los complementos necesarios para registrar sensores, ejecutar automatizaciones y visualizar el consumo energético. A continuación, se ejecutó la integración Tuya ↔ Home Assistant, permitiendo el acceso en tiempo real a parámetros como voltaje, potencia activa y energía acumulada, así como la habilitación del control remoto del interruptor, tal como se ve en la Figura 4.31.

Figura 4.31

Instalación y configuración en Home Assistant



Nota. Elaboración propia, 2025.

Seguidamente, se llevó a cabo el montaje final de la caja 3D, asegurando la ventilación pasiva adecuada, el orden de los conductores, el aislamiento de elementos de potencia frente a componentes de señal y la correcta fijación de cada módulo. Se incorporaron etiquetas de entrada/salida y advertencias de seguridad.

En términos de conectividad, se configuró el módem MiFi con tarjeta SIM 4G, asegurando que el prototipo pudiera operar autónomamente sin una red doméstica convencional. De manera complementaria, se instaló un repetidor Wi-Fi con el fin de optimizar la cobertura y garantizar una comunicación estable entre el medidor Tuya, el ESP32 y Home Assistant.

4.3.1.6 Pruebas finales y validación funcional del sistema

Finalmente, se realizaron pruebas de control remoto, verificación funcional y recolección de datos, evaluando parámetros como latencia de comandos, estabilidad de lectura, consistencia entre Smart Life y Home Assistant, funcionamiento del LED RGB ante variaciones de tensión y frecuencia del LED pulsador de 1600 impulsos/kWh. Los datos registrados fueron exportados para su posterior análisis y validación del desempeño del prototipo.

Este procedimiento integral refleja una implementación ordenada y técnica del sistema de medición inteligente, integrando elementos de hardware, software, comunicación inalámbrica y procesamiento local, alineado a los principios de diseño de sistemas AMI de bajo costo y alta disponibilidad en entornos residenciales (García et al., 2023). Como se ve en la Figura 4.32 diagrama de flujo del procedimiento de configuración del prototipo de medidor inteligente.

Figura 4.32

Diagrama de flujo del procedimiento de configuración del prototipo de medidor inteligente



Nota. Elaboración propia, 2025.

4.3.2. Programación del prototipo de medidor inteligente

A continuación, se describe el procedimiento completo de programación para puesta en operación del prototipo de medidor inteligente, integrando el medidor Tuya, los interruptores automáticos, el ESP32, la pantalla OLED, los LEDs RGB y la fuente de alimentación Mean Well 5 V.

4.3.2.1. Preparación documental

- Crear un registro de proyecto: control de versiones, responsable de montaje, fechas de cada etapa.
- Definir criterios de aceptación para el prototipo:
 - error de medición $\leq 5 \%$,
 - disponibilidad $\geq 98 \%$,
 - actualización en tiempo real $< 2 \text{ s}$.

4.3.2.2. Recepción y verificación de componentes

Verificar modelo exacto de cada componente:

- Medidor Tuya 16 A (sensor HLW8012 o BL0937).
- Interruptor Tuya 16 A.
- ESP32 DevKit V1.
- Pantalla OLED 0.96" I²C (SSD1306).
- LED RGB indicador (ánodo común).
- LED RGB pulsador (para simular 1600 pulsos/.kWh).
- Fuente Mean Well 5V / 1A.
- Caja 3D impresa y tornillería.

4.3.2.3. Pruebas funcionales preliminares (bench tests)

- Alimentar la fuente Mean Well 5 V y medir su salida con multímetro (debe ser entre 4.9–5.1 V).
- Encender el ESP32 con la fuente y verificar modo AP (wifi “ESP32-Config”).
- Conectar la OLED a los pines I²C:
 - SDA → GPIO21
 - SCL → GPIO22
 - VCC → 3.3 V
 - GND → GND
- Verificar que en ESPHome se detecte el bus I²C correctamente.
- Probar LED RGB indicador (verde = normal, rojo = fuera de rango de tensión).
- Probar segundo LED RGB como emulador de pulsos 1600 imp/kWh:
 - encendido rápido y repetitivo,

- verificar que los cambios de estado sean visibles.
- Probar el medidor Tuya en Smart Life y validar lecturas básicas: tensión, corriente, potencia.
- Comparar lecturas con un analizador patrón para obtener el error base del MI, indispensable para la sección IEC.

4.3.2.4. Montaje físico y conexiones

- Instalar la fuente Mean Well dentro de la caja 3D con fijaciones plásticas aislantes.
- Conectar AC → Mean Well:
 - L → fase (protección mediante fusible)
 - N → neutro
- Conectar salida +5 V → ESP32 (pin 5V) y GND común.
- Conectar OLED al bus I²C.
- Conectar LED RGB indicador a pines PWM:
 - Rojo → GPIO 25
 - Verde → GPIO 26
 - Ánodo común → 3.3V
 - Resistencia de 330 Ω por cada color
- Conectar LED RGB pulsador para los “1600 impulsos/.kWh”:
 - Rojo → GPIO 27 (o cualquier pin libre)
 - Ánodo común → 3.3 V
 - Resistencia 330 Ω
- Instalar medidor Tuya siguiendo normas de conexión:
 - IN L / IN N → alimentación
 - OUT L / OUT N → carga
- Documentar con fotos la versión final del cableado y la caja.

4.3.2.5. Configuración inicial en Smart Life

- Poner los dispositivos Tuya en modo EZ o AP.
- Regístralos en Smart Life con nombre de identificación clara: “Medidor Inteligente”.
- Verificar latencia de la nube Tuya (150–300 ms).
- Registrar si opera en modo LAN o CLOUD (influye en confiabilidad del MI).

4.3.2.6. Instalación y configuración de Home Assistant

- Instalar Home Assistant OS (si se usa Home Assistant Green) o HA Supervised (si se usa laptop).
- Configurar NTP, zona horaria, backup automático y add-ons opcionales (MQTT broker).
- Registrar versión del sistema y módulos instalados.
- Habilitar el acceso remoto vía URL local.

4.3.2.7. Integración Home Assistant y Tuya

- Integración Tuya Cloud / Local-Tuya)
 - Crear proyecto en Tuya IoT Platform.
 - Obtener Access ID y Secret Key.
 - Vincular Home Assistant con la integración Tuya.
- Detección automática de entidades (Home Assistant registra automáticamente):
 - tensión (V),
 - corriente (A),
 - potencia (W),
 - energía acumulada (kWh),
 - factor de potencia (PF).

4.3.2.8. Programación del ESP32 en ESPHome

Para el funcionamiento integral del prototipo de medidor inteligente, se programó el microcontrolador ESP32 utilizando ESPHome, una plataforma declarativa basada en YAML, el cual es un lenguaje de configuración de texto legible que se utiliza para escribir los archivos de configuración. Estos archivos describen las funcionalidades y el hardware de un dispositivo inteligente, y ESPHome utiliza esta información para compilar y generar un firmware personalizado para ese dispositivo. Es decir, el archivo YAML es el plano que le dice a ESPHome qué sensores, relés u otros componentes incluir y cómo deben funcionar en el dispositivo final, en conclusión, permite una integración nativa y estable con Home Assistant. La programación se diseñó para cumplir cuatro funciones principales, recibir los valores eléctricos del medidor inteligente Tuya a través de Home Assistant, como se muestra en la siguiente Figura 4.33.

A continuación, se presenta el contenido del archivo YAML final y se detalla el propósito de cada sección, tal como se muestra también en el Anexo 23.

a) Identidad del dispositivo y plataforma ESP32

esphome:

name: esp32

friendly_name: Medidor Inteligente

esp32:

board: esp32dev

framework:

type: esp-idf

Descripción:

- name y friendly_name establecen cómo será identificado por Home Assistant.
- esp32dev define la placa de desarrollo DevKit v1.
- Se emplea el framework ESP-IDF, más eficiente y estable para proyectos de monitoreo continuo.

b) Configuración Wi-Fi

wifi:

ssid: "Medidor Inteligente ATSC-EXT"

password: "Contraseña"

ap:

ssid: "ESP32-Config"

password: "clave"

Descripción:

- La red principal (SSID y contraseña) permite que el ESP32 se conecte al Wi-Fi convencional.
- El modo AP (Access Point) sirve como respaldo para configurar el dispositivo en caso de pérdida de conexión.

c) Comunicación segura y depuración

api:

encryption:

key: "AKI..."

ota:

logger:

Descripción:

- *api*: habilita la comunicación directa con Home Assistant.
- *encryption*: protege los datos enviados entre el ESP32 y Home Assistant.
- *ota*: permite actualizaciones del firmware sin necesidad de cables.
- *logger*: muestra mensajes de depuración en tiempo real.

d) Bus I²C para la pantalla OLED

i2c:

sda: 21

scl: 22

scan: true

Descripción:

- Define los pines dedicados a la comunicación I²C (SDA y SCL).
- *scan: true* detecta automáticamente dispositivos conectados, facilitando diagnóstico.

e) Sensores recibidos desde Home Assistant (medidor Tuya)

sensor:

- platform: homeassistant

id: voltaje

entity_id: sensor.smart_meter_with_ct_1_tension

- platform: homeassistant

id: corriente

entity_id: sensor.smart_meter_with_ct_1_corriente

- *platform: homeassistant*
id: potencia
entity_id: sensor.smart_meter_with_ct_1_potencia
 - *platform: homeassistant*
id: energia
entity_id: sensor.smart_meter_with_ct_1_energia

Descripción:

- El ESP32 no mide directamente: recibe los datos desde el medidor Tuya ya integrado a Home Assistant.
- id: permite usar cada sensor dentro del OLED o lógica del LED RGB.
- Se importan voltaje (V), potencia (W) y energía acumulada (kWh).

f) LED RGB (ánodo común) como indicador de calidad de tensión

Salidas PWM LEDC

output:

- *platform: ledc*
pin: 25
id: rojo
 - *platform: ledc*
pin: 26
id: verde

Componente de iluminación

light:

- *platform: monochromatic*
id: led_rojo
output: rojo
 - *platform: monochromatic*
id: led_verde

output: verde

Descripción:

- Se usan dos canales PWM: uno para rojo y otro para verde.
- Dado que el LED es ánodo común, los colores se activan llevando el pin a nivel bajo mediante PWM.
- Permite visualizar:
 - Verde: tensión dentro del rango aceptable (213–227 V).
 - Rojo: tensión fuera del rango permitido.

g) LED pulsador de 1600 imp/kWh

output:

- platform: gpio

pin: 27

id: pulso_led

interval:

- interval: 1s

then:

- output.turn_on: pulso_led

- delay: 50ms

- output.turn_off: pulso_led

Descripción:

- El pin GPIO 27 activa un LED que representa el pulso de energía, equivalente al que traen los medidores certificados.
- El pulso se activa cada segundo con un pulso de 50 ms.
- Puede acelerarse para simular consumos altos o ralentizarse para simular consumos bajos.

h) Pantalla OLED SSD1306 para mostrar datos

Fuente:

font:

- *file: "fonts/Roboto-Regular.ttf"*

id: font1

size: 14

Pantalla y contenido:

display:

- *platform: ssd1306_i2c*

id: oled

address: 0x3C

pages:

- *id: page1*

lambda: |-

it.printf(0, 0, id(font1), "V: %.1f V", id(voltaje).state);

it.printf(0, 16, id(font1), "I: %.2f A", id(corriente).state);

it.printf(0, 32, id(font1), "P: %.1f W", id(potencia).state);

it.printf(0, 48, id(font1), "E: %.2f kWh", id(energia).state);

Descripción:

- ssd1306_i2c es el controlador del OLED.
- La pantalla muestra:
 - Voltaje instantáneo
 - Potencia instantánea
 - Energía acumulada
- Actualiza automáticamente cada vez que Home Assistant actualiza los sensores Tuya.

4.3.2.9. Montaje final en caja 3D

- Fijar ESP32, OLED, LEDs y Mean Well con separadores aislantes.
- Verificar circulación de aire.
- Etiquetar tapa frontal: entrada, salida, advertencias.
- Tomar fotos finales para registro.

4.3.2.10. Configuración de red (modem 4G + repetidor)

- Configurar APN de Bitel/Claro/Movistar en el ZTE MF920V.
- Medir latencia promedio y pérdida de paquetes.
- Instalar repetidor Wi-Fi 300 Mbps y realizar pruebas antes y después para demostrar mejora de RSSI.

4.3.2.11. Pruebas funcionales finales

- Prueba de control remoto: corte y reconexión desde Home Assistant.
- Prueba de alertas por sobrecarga.
- Prueba de reconexión automática.
- Prueba de LED indicador según rangos de tensión (verde 213–227 V, rojo fuera de rango).
- Prueba del LED pulsador (1 pulso/s para simulación).

4.3.2.12. Análisis de resultados

- Exportar registros desde Home Assistant (CSV).
- Calcular error energético comparado con la pinza amperimétrica:
 - MAE, RMSE, Error %.
- Generar gráficos de potencia, energía diaria y comparación por intervalos.
- Documentar estabilidad Wi-Fi y rendimiento de la red.

En la siguiente Figura 4.35 se muestra el prototipo de medidor inteligente ya ensamblado, listo para poner a prueba e implementarlo.

Figura 4.35

Conexionado final del medidor inteligente



Nota. Elaboración propia, 2025.

4.4. Procedimiento de implementación del prototipo de medidor inteligente

Primero, con el propósito de validar la implementación del prototipo de medidor inteligente, se construyó un módulo experimental que simula una instalación eléctrica residencial a pequeña escala, en el cual se implementó el prototipo. Este módulo permitió realizar pruebas controladas de medición, monitoreo y análisis del consumo energético bajo diferentes condiciones de carga.

El diseño incluye dos circuitos principales: uno destinado a la iluminación y otro al tomacorriente, ambos alimentados desde un tablero de control general en el que se encuentra integrado el medidor inteligente. Este enfoque permitió reproducir de manera segura las condiciones reales que enfrenta un sistema de baja tensión, tal como se ve en la Figura 4.36.

Figura 4.36

Proceso de montaje del módulo experimental



Nota. Elaboración propia, 2025.

Según Hernández et al. (2020), los módulos experimentales constituyen una herramienta efectiva para validar prototipos eléctricos, ya que permiten controlar las variables del entorno y asegurar la reproducibilidad de los resultados. En este caso, el módulo permitió observar el comportamiento del medidor ante cargas resistivas y electrónicas, evaluando la precisión de las mediciones en corriente, voltaje, potencia y energía.

Además, el diseño responde a la necesidad de realizar pruebas sin comprometer instalaciones reales, cumpliendo con criterios de seguridad eléctrica y facilidad de montaje (Torres & Aguilar, 2021), tal como se muestra en los Anexos 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 y 22.

4.4.1. Circuito de iluminación

El circuito de iluminación se compone de dos luminarias: una lámpara incandescente de 100 W y otra de 9W, ambas controladas mediante un interruptor doble. Esta configuración permite analizar el comportamiento de diferentes tecnologías de iluminación frente al sistema de medición inteligente.

Las lámparas incandescentes presentan un consumo de potencia relativamente alto y una eficiencia luminosa reducida (aproximadamente 15 lm/W), mientras que las lámparas LED ofrecen una mayor eficiencia (superior a 100 lm/W) con un consumo considerablemente menor (Ramos & Calderón, 2022). De este modo, al accionar cada interruptor de manera independiente

o simultánea, se evalúa cómo el medidor detecta y registra los cambios de carga, como se ve en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12

Características de las lámparas utilizadas en el circuito de iluminación

Tipo de lámpara	Potencia nominal (W)	Tensión (V)	Corriente (A)	Tipo de carga	Eficiencia aproximada (lm/W)
Incandescente	100	220	0.45	Resistiva	15
LED	9	220	0.04	Electrónica	100

Nota. Elaboración propia con base en Ramos & Calderón, 2022.

El circuito se diseñó con cableado tipo Cable Mellizo 2X0.5 14 AWG, protección termomagnética de 16 A, y conexiones seguras mediante bornes de presión. Se consideró la disposición en paralelo de las luminarias para mantener una tensión constante en ambas cargas.

4.4.2. Circuito de tomacorriente

El segundo circuito del módulo corresponde a un tomacorriente bipolar con puesta a tierra, destinado a la conexión de diferentes equipos eléctricos portátiles, tales como planchas, cargadores, ventiladores o motores de baja potencia. Su función es reproducir el comportamiento de cargas domésticas comunes y verificar la respuesta del medidor ante variaciones en la potencia consumida.

La instalación se realizó utilizando cable tipo Cable Mellizo 2X0.5 14 AWG, considerando la corriente máxima de 16 A según el Reglamento Nacional de Instalaciones Eléctricas (RNE, 2021). El tomacorriente está protegido por un interruptor termomagnético independiente, lo que permite realizar pruebas sin afectar el circuito de iluminación.

De acuerdo con la norma IEC 60884-1, los tomacorrientes residenciales deben garantizar una conexión segura y soportar cargas nominales de hasta 16 A a 250 V en corriente alterna. Cumplir estas especificaciones fue fundamental para asegurar la confiabilidad de las pruebas (IEC, 2018).

4.4.3. Integración con el medidor inteligente

Ambos circuitos (iluminación y tomacorriente) se conectaron al prototipo del medidor inteligente, este tipo de integración responde a los principios de la Internet de las Cosas (IoT), donde los dispositivos físicos se comunican a través de redes inalámbricas para ofrecer información útil y control remoto (Gutiérrez & López, 2021). En este contexto, el módulo permitió validar el flujo de datos desde el sensor hasta la interfaz de usuario, asegurando la precisión y estabilidad de las lecturas.

4.4.4. Pruebas de funcionamiento y validación

Para comprobar el desempeño del prototipo, se realizaron pruebas funcionales en las cuales se encendieron las cargas del circuito de iluminación de manera individual y simultánea. Se compararon los valores de potencia activa y energía obtenidos por el medidor inteligente frente a un multímetro digital de referencia.

Los resultados mostraron un error promedio menor al 2 % en las pruebas preliminares, dentro de los rangos aceptables para equipos de medición no calibrados industrialmente. Asimismo, el sistema respondió adecuadamente a los cambios de carga, actualizando los datos en tiempo real. En el caso del circuito de tomacorriente, se conectaron diferentes dispositivos (por ejemplo, un ventilador de 50 W y una plancha de 1000 W), observándose incrementos proporcionales en la corriente medida y en la energía acumulada. Estos resultados confirman la correcta integración entre los sensores, el microcontrolador y la plataforma de gestión de datos, garantizando la confiabilidad del prototipo (Salazar et al., 2023).

4.4.5. Materiales y dispositivos utilizados

Para resumir los componentes utilizados para el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente se tiene la siguiente Tabla 4.13, como se observa a continuación:

Tabla 4.13

Componentes empleados en la construcción del módulo experimental

Ítem	Descripción	Cantidad	Especificaciones
1	Prototipo de medidor inteligente	1	ESP#” con Wi-Fi 2.4 GHz, 30 GPIOs, 100 A/1 V, salida analógica, 220 V AC

2	Lámpara incandescente	1	100 W, 220 V
3	Lámpara LED	1	9 W, 220 V
4	Interruptor doble	1	10 A, 250 V
5	Tomacorriente doble	1	16 A, 250 V
6	Cable 2 x 14 AWG	—	2.5 mm ²
7	Interruptor termomagnético	1	16 A, 220 V
8	Placa base de melamina	1	1 m x 0.5 m
9	Canaleta adhesiva para cable eléctrico	1	1 cm x 0.8 cm x 2 m

Nota. Elaboración propia, 2025.

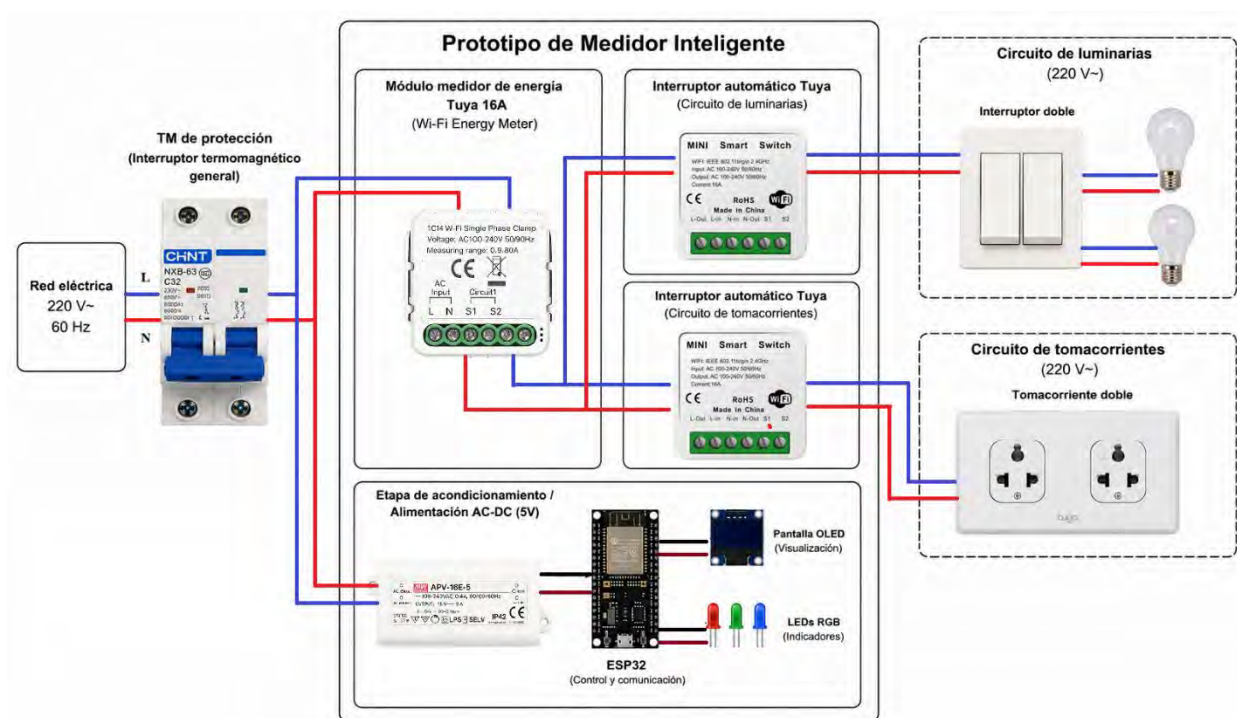
4.4.6. Esquema de conexión eléctrica

El esquema general del módulo se muestra en la siguiente figura. En él se observa la conexión de los dos circuitos al medidor inteligente, destacando los puntos de medición de corriente y voltaje. Las líneas de alimentación y retorno están protegidas mediante un interruptor termomagnético, asegurando la desconexión rápida en caso de sobrecarga o cortocircuito, tal como se ve en la Figura 4.37.

Así mismo, en los Anexos 1, 2 y 3 se aprecian las imágenes del esquema de conexión del prototipo de medidor inteligente, resaltando el uso de la caja en 3D utilizada como protección física del prototipo, así como los componentes internos empleados.

Figura 4.37

Esquema de conexión eléctrica del módulo experimental



Nota. Elaboración propia, 2025.

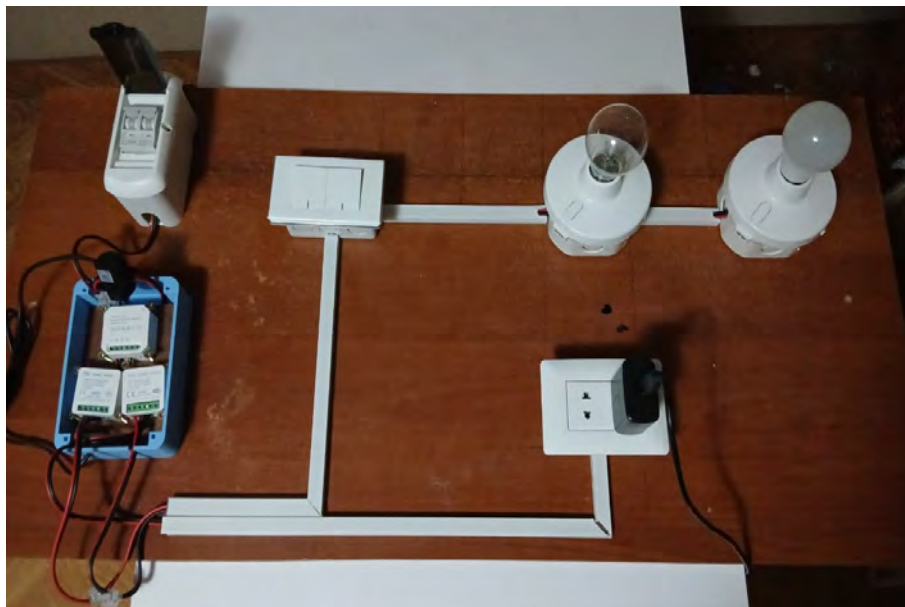
De acuerdo con el Reglamento Nacional de Instalaciones Eléctricas (RNE, 2021), toda instalación debe incorporar dispositivos de protección adecuados al calibre del conductor, con el fin de garantizar la integridad del sistema y del operador.

4.4.7. Seguridad eléctrica y normas aplicadas

Durante la implementación del módulo, se aplicaron criterios de seguridad eléctrica basados en normativas nacionales e internacionales, como el RNE (Capítulo 2 – Instalaciones de baja tensión), la IEC 60364-7, y la NTP 370.012 del INACAL.

Se verificó la correcta conexión a tierra del tomacorriente, el aislamiento de los conductores y la distancia mínima entre líneas activas. Además, se evitó la exposición directa de terminales eléctricos, utilizando canaletas y cubiertas protectoras.

La seguridad eléctrica en entornos experimentales es un aspecto esencial para garantizar la integridad física del operador y la durabilidad de los equipos (López & Cárdenas, 2022), tal como se ve en la Figura 4.38. Por ello, el módulo fue diseñado con tensiones de red controladas y dispositivos de desconexión rápida, cumpliendo con los estándares recomendados para prácticas de laboratorio.

Figura 4.38*Módulo experimental concluido*

Nota. Elaboración propia, 2025.

4.5. Procedimiento de conexión y alimentación del prototipo de medidor inteligente

4.5.1. Diagrama de flujo resumen

El proceso de conexión y alimentación del prototipo de medidor inteligente se llevó a cabo siguiendo una secuencia técnica y lógica que garantizó el funcionamiento estable del sistema, tal como se ve en la Figura 4.39 y Anexos 8, 9, 10,11, 12 y 13.

La secuencia del procedimiento desarrollado fue la siguiente:

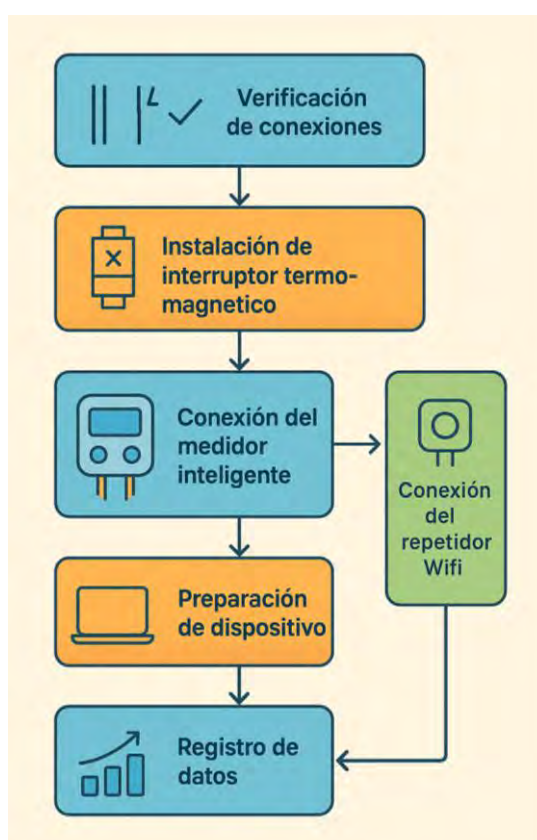
- Verificación del módulo para la simulación de una instalación monofásica con dos circuitos (iluminación y tomacorrientes) y un interruptor termomagnético de protección general.
- Verificación de líneas para la identificación de la línea (fase viva) y del neutro de la red para evitar fallas en los dispositivos.
- Conexión interna del medidor inteligente para la instalación de los componentes dentro de la caja 3D, asegurando la correcta conexión de fase y neutro.
- Instalación del sensor de corriente (CT) para la conexión del sensor a la línea para la medición del consumo eléctrico.
- Configuración de red para el encendido del repetidor Wi-Fi desde una fuente independiente para establecer la red de datos.
- Preparación de dispositivos de control para la verificación de la conexión del laptop y del

celular a la misma red Wi-Fi.

- Energización de la maqueta para la activación del sistema mediante el interruptor termomagnético.
- Registro de variables eléctricas para la obtención de datos de tensión, corriente, potencia y energía a través del medidor inteligente y comparación con el medidor patrón.
- Secuencia de conexión eléctrica: enchufe de alimentación, interruptor termomagnético, medidor patrón o multímetro, medidor inteligente (en caja 3D), circuito 1 de iluminación con foco incandescente e interruptor y circuito 2 de tomacorrientes con interruptor

Figura 4.39

Diagrama de flujo del procedimiento de conexión



Nota. Elaboración propia, 2025.

4.5.2. Desarrollo paso a paso

A continuación, se desarrolla el paso a paso del flujo del procedimiento de configuración e implementación del prototipo de medidor inteligente.

4.5.2.1. Verificación del módulo para la simulación

Previamente de diseño y montó una maqueta que reproduce una instalación monofásica domiciliaria con dos derivaciones: iluminación y tomacorrientes. La maqueta o módulo incluyó canalizaciones, bornes de conexión claramente identificados y un interruptor termomagnético en la entrada para protección general. Este tipo de banco de pruebas facilita la evaluación en condiciones controladas y minimiza riesgos frente a ensayos en una red real. Se recomienda rotular todas las líneas y emplear terminales aislados para reducir errores humanos al manipular conexiones. (IEC, 60364; recomendaciones generales de laboratorio).

4.5.2.2. Verificación de líneas: identificación de fase y neutro

Antes de cualquier alimentación, se verificó la polaridad de la red para distinguir fase y neutro con un comprobador de tensión o multímetro, siguiendo procedimientos de seguridad (probar con equipo calibrado, guantes aislantes, gafas de seguridad). Confirmar la polaridad evita daños en medidores y sensores, y previene errores de medición por inversión de conductores. (IEC 61010; guía de seguridad en ensayos eléctricos).

4.5.2.3. Conexión del medidor inteligente

Se montaron e interconectan los componentes internos del medidor (plataforma de medida, fuente de alimentación, bornes, relés, y conexiones de datos). Es crítico respetar polaridad y nivel de tensión de alimentación del equipo, así como separar líneas de potencia y señales para evitar acoplamientos. Fijar correctamente bornes, usar tornillos con par de apriete adecuado y aplicar cinta o resina en terminales expuestos para evitar corrosión.

4.5.2.4. Instalación del sensor de corriente (CT) en la línea

El transformador de corriente (CT) se instaló en serie con la fase, asegurando la correcta orientación de polaridad (marcas P1/P2 o flecha hacia la carga) y cumpliendo la distancia mínima recomendada respecto a conductores de fuerza para evitar acoplamiento magnético. Se verificó que el secundario del CT permaneciera siempre cerrado a una carga (burden) adecuada o conectado al circuito de medida; abrir el secundario de un CT puede producir tensiones peligrosas y dañar el equipo. (IEC 61869, reglas para transformadores de medida).

4.5.2.5. Configuración de repetidor Wi-Fi

Se alimentó el repetidor Wi-Fi desde una fuente separada para garantizar que la capa de comunicaciones no dependa de la alimentación del prototipo (evita perder telemetría si el medidor se apaga). La ubicación del repetidor se determinó buscando cobertura óptima en la zona de prueba y evitando fuentes de interferencia (microondas, grandes masas metálicas).

4.5.2.6. Preparación de dispositivos de control (laptop y celular)

La laptop con Home Assistant y el celular con Smart Life fueron conectados a la red del repetidor para pruebas de emparejamiento y control remoto. En la laptop se instalaron y configuraron: sistema operativo actualizado, Home Assistant (con add-ons/.integaciones mínimas), herramientas de registro (por ejemplo, influxdb/Prometheus si se va a almacenar serie temporal), y sincronización horaria (NTP) para timestamps coherentes. En el celular se verificó la instalación de la app Smart Life y credenciales.

4.5.2.7. Energización del módulo mediante el TM

Con todas las verificaciones realizadas, se energizó la maqueta desde el enchufe de alimentación principal pasando por el interruptor termomagnético. Se monitorearon indicadores iniciales de presencia de tensión y consumo en vacío. Durante la primera energización se debe: permanecer a distancia segura, disponer de un procedimiento de parada rápida y un observador adicional si es posible.

4.5.2.8. Registro de variables y validación

Se inició la adquisición de datos de tensión, corriente, potencia y energía por el medidor inteligente. Paralelamente, se registraron las mismas magnitudes con un medidor patrón o multímetro calibrado conectado en derivación, permitiendo calcular errores relativos y comprobar la conformidad del prototipo. Se recomienda registrar series temporales y efectuar pruebas con diferentes cargas (resistiva, inductiva) para caracterizar comportamiento bajo condiciones reales. (IEC 62052 / IEC 62053 — normas sobre metrología de contadores eléctricos).

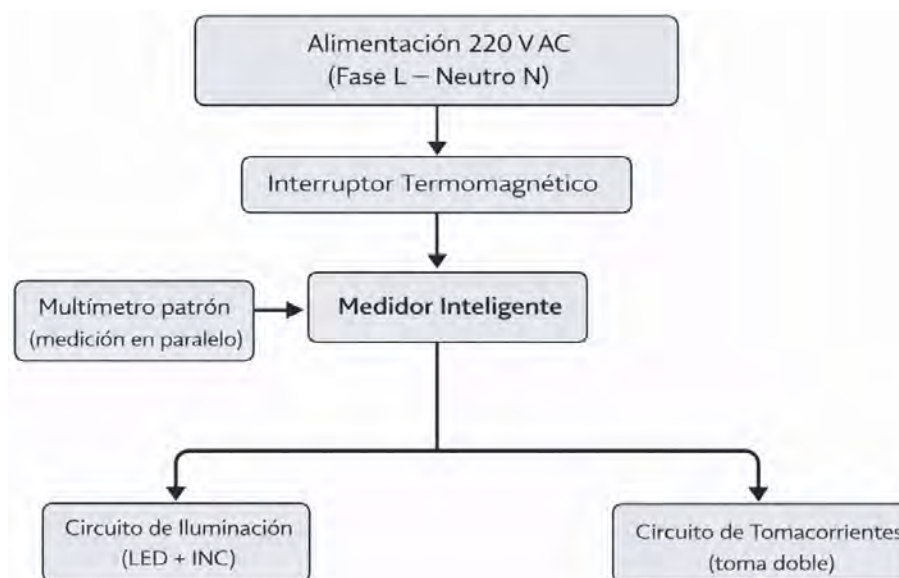
4.5.2.9. Secuencia de conexión eléctrica (resumen operativo)

La disposición de la conexión eléctrica siguió la siguiente secuencia física, tal como se ve

en la Figura 4.40.

Figura 4.40

Diagrama de flujo de la conexión eléctrica



Nota. Elaboración propia, 2026.

Para cada derivación (iluminación y tomacorrientes) se utilizaron interruptores individuales que permitieron aplicar cargas de forma independiente y observar la respuesta del medidor. Esta secuencia permite verificar continuidad, protección y trazabilidad de mediciones.

4.5.2.10. Notas finales sobre seguridad

- Seguridad eléctrica: siempre emplear EPP (guantes dieléctricos, gafas), procedimientos LOTO, y mantener una distancia segura durante maniobras en tensión. (IEC 61010; normas de seguridad de laboratorio).
- Integridad de datos: sincronizar todos los dispositivos con NTP, usar formato ISO-8601 para timestamps y realizar backups periódicos de las bases de datos de telemetría.
- Ciberseguridad IoT: evitar exponer dispositivos Tuya integrados a la nube sin control; si es necesario el acceso remoto, usar VPN o túneles seguros y aplicar autenticación fuerte; segmentar la red de pruebas en VLANs. (OWASP IoT; recomendaciones de hardening de Home Assistant).
- Trazabilidad metrológica: mantener ficha de calibración del medidor patrón, y registrar

condiciones ambientales durante las pruebas (temperatura, humedad), pues afectan la precisión. (normas de metrología aplicables).

4.6. Normalización técnica, desempeño metrológico y fundamentos eléctricos

A continuación, se presenta una descripción detallada de los criterios normativos, el funcionamiento eléctrico del módulo de medición Tuya, la estimación de clase de exactitud, los principios de calibración y el comportamiento del sistema frente a distintos tipos de carga eléctrica. Asimismo, se incluyen fórmulas fundamentales que sustentan el diseño del prototipo y los principios de operación de cada uno de los componentes electrónicos integrados.

4.6.1. Estandarización bajo normas internacionales

El diseño del prototipo se enmarca en las recomendaciones establecidas por los estándares internacionales aplicables a la medición de energía eléctrica en sistemas residenciales. Para efectos prácticos y de compatibilidad técnica con sistemas AMI, se consideran las siguientes normas:

- IEC 62052-11: Requisitos generales para equipos de medición.
- IEC 62053-21: Medición de energía activa en sistemas monofásicos — Clases 1 y 2.
- IEC 62053-23: Medición de energía reactiva — Clases 2 y 3.
- ANSI C12.1 y C12.20: Código metrológico y clasificación de exactitud para medidores electrónicos.

Estas normas establecen parámetros críticos como exactitud, tolerancias de error, comportamiento ante variaciones de carga, condiciones ambientales y estabilidad a largo plazo. Aunque el prototipo no se somete a un proceso de certificación formal, se diseña para aproximarse a la clase de precisión Clase 1, tal como se detalla en la siguiente sección.

4.6.2. Clase de precisión y su equivalencia normativa

El prototipo según el sensor principal de energía eléctrica Tuya tiene un error típico que se encuentra entre $\pm 1\%$ y $\pm 2\%$. Este nivel de error corresponde a la precisión equivalente a la Clase 1 de IEC 62053-21, lo cual es adecuado para aplicaciones residenciales.

Según IEC:

- Error máximo permitido a FP = 1: $\pm 1\%$
- Error máximo a FP distinto de 1: $\pm 1.5\%$

Debido a las limitaciones de calibración industrial, el prototipo se clasifica como equivalente a Clase 1, basado en las características del hardware y pruebas comparativas con una pinza amperimétrica.

4.6.3. Fundamentos eléctricos del módulo medidor inteligente

Dentro del prototipo de medidor inteligente, el módulo Tuya mide variables eléctricas mediante dos principios:

4.6.3.1. Medición de corriente (TC de núcleo sólido o shunt)

La corriente se obtiene mediante una resistencia shunt o transformador de corriente incorporado en el módulo. El chip detecta la caída de tensión en el elemento sensor.

$$I = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}}$$

Donde:

I : Corriente eficaz (A)

V_{shunt} : Tensión en la resistencia shunt (V)

R_{shunt} : Valor de la resistencia shunt (Ω)

4.6.3.2. Medición de tensión

La tensión de línea se reduce mediante un divisor resistivo interno:

$$V_{Línea} = V_{ADC} \cdot \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right)$$

4.6.3.3. Cálculo de potencia instantánea

El chip calcula potencia activa mediante el producto de corriente, tensión y factor de potencia:

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\phi)$$

Donde:

P : Potencia activa (W)

ϕ : Ángulo entre corriente y tensión

El módulo Tuya sí considera el factor de potencia, por lo que puede registrar diferencias entre cargas resistivas e inductivas.

4.6.3.4. Cálculo de energía

$$E = \int P(t) dt$$

El módulo integra la potencia en el tiempo y entrega energía acumulada en kWh.

4.6.4. Comportamiento ante distintos tipos de carga eléctrica

Para cargas resistivas ($FP \approx 1$) como por ejemplo focos incandescentes o estufas, el módulo mide tensión, corriente y potencia con mínima distorsión. Los valores reportados suelen presentar el menor margen de error.

Para cargas inductivas ($FP < 1$), como por ejemplo motores, refrigeradoras, ventiladores, el desfase entre corriente y tensión incrementa la complejidad de medición. El chip interno calcula el factor de potencia mediante muestreo digital. En algunos casos se presenta mayor error (~2–4%) si hay altas armónicas.

Técnicamente, en conclusión, el sistema puede medir potencia activa, pero no reporta potencia reactiva ni aparente. Sin embargo, su estimación de FP permite adaptarse correctamente a cargas no resistivas.

4.6.5. Proceso de calibración del sistema

La calibración se realiza comparando el módulo Tuya con un medidor patrón o analizador de redes.

Pasos generales:

- Aplicación de cargas conocidas.
- Registro de tensiones, corrientes y potencia en ambos medidores.
- Cálculo del error porcentual:

$$\text{Error}\% = \frac{\text{Valor}_{\text{medido}} - \text{Valor}_{\text{patrón}}}{\text{Valor}_{\text{patrón}}} \cdot 100$$

- Ajustes manuales o corrección mediante valores de escalado en Home Assistant.

La calibración permite verificar que el sistema opera dentro de la precisión esperada para prototipos académicos (<5% de error).

4.7. Principio de funcionamiento del medidor inteligente diseñado

El medidor inteligente implementado en esta investigación se fundamenta en la arquitectura clásica de instrumentación digital empleada en sistemas modernos de medición eléctrica. Desde el punto de vista funcional, todo sistema de medición digital puede descomponerse en tres etapas principales:

- Procesamiento analógico (adquisición y acondicionamiento de señal)
- Conversión analógico–digital (A/D)
- Procesamiento digital y gestión de datos

Este enfoque es consistente con la teoría de sistemas de instrumentación descrita en literatura especializada (Doebelin & Manik, 2011; Helfrick & Cooper, 1990). En el caso particular del medidor desarrollado, dichas etapas permiten transformar magnitudes eléctricas de la red de baja tensión (corriente y tensión) en información digital procesable y transmisible mediante red inalámbrica.

4.7.1. Etapa de procesamiento analógico

4.7.1.1. Función dentro de la cadena de medición

La etapa analógica tiene como finalidad:

- Captar las magnitudes eléctricas primarias (V e I).
- Reducir su nivel a valores seguros para la electrónica.
- Proporcionar aislamiento galvánico.
- Filtrar ruido e interferencias.
- Adaptar impedancias para el sistema de conversión A/D.

En medidores inteligentes, esta etapa es crítica porque determina la precisión metrológica global del sistema (IEEE Std 1459-2010).

4.7.1.2. Medición de corriente mediante Transformador de Corriente (TC)

El prototipo utiliza un Transformador de Corriente (TC) 80 A – 1000:1, lo cual permite:

- Medición indirecta.
- Aislamiento eléctrico entre red y electrónica.
- Seguridad operacional.
- Reducción de interferencias.

El principio físico opera mediante el TC, el cual opera bajo la Ley de Inducción Electromagnética de Faraday:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Donde:

e = fuerza electromotriz inducida (V)

N = número de espiras

Φ = flujo magnético (Wb)

Cuando la corriente primaria I_p atraviesa el núcleo ferromagnético (normalmente una sola espira equivalente), genera un flujo magnético alterno que induce una corriente proporcional en el devanado secundario.

Según la teoría clásica de máquinas eléctricas (Chapman, 2012), el TC puede modelarse como un transformador ideal bajo condiciones nominales.

4.7.1.3. Relación de transformación

Para el TC 1000:1 se tiene la siguiente relación de transformación entre el primario y secundario del transformador de corriente:

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

Si:

- $N_p=1$
- $N_s=1000$

Entonces:

$$I_s = \frac{I_p}{1000}$$

Para corriente nominal primaria de 80 A:

$$I_s = 0.08A$$

4.7.2. Etapa de conversión analógico–digital (ADC)

Una vez acondicionadas, las señales ingresan al convertidor A/D del sistema (integrado en el módulo de medición). El ADC realiza:

- Muestreo periódico.
- Cuantificación.
- Codificación binaria.

De acuerdo con la teoría de muestreo (Oppenheim & Willsky, 1997), la frecuencia de muestreo debe cumplir el criterio de Nyquist:

$$f_s \geq 2f_{max}$$

En sistemas de red de 60 Hz, la frecuencia de muestreo debe ser suficiente para reconstruir adecuadamente la forma de onda y calcular valores RMS, potencia activa y energía.

4.7.3. Etapa de procesamiento digital

En esta fase se ejecutan:

- Cálculo de valores RMS.
- Cálculo de potencia activa:

$$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \phi$$

- Integración temporal para energía:

$$E = \int P(t) dt$$

- Generación de pulsos (ej. 1600 imp/kWh).
- Formateo de datos para transmisión Wi-Fi.

El procesamiento digital está alineado con lo establecido en IEEE Std 1459-2010 para definiciones de potencia eléctrica en sistemas no sinusoidales.

4.8. Justificación del uso de red Wi-Fi

4.8.1. Fundamentación técnica

La selección de la tecnología Wi-Fi como medio de comunicación en el prototipo de medidor inteligente responde a criterios técnicos, económicos y de interoperabilidad propios de los entornos residenciales donde se proyecta su aplicación. En sistemas de medición avanzada

(AMI), el canal de comunicación constituye un componente crítico, ya que determina la confiabilidad, latencia, escalabilidad y costos operativos del sistema (Gungor et al., 2011).

El estándar IEEE 802.11, que regula las redes inalámbricas de área local (WLAN), define los mecanismos de acceso al medio (MAC) y las características físicas de transmisión en banda ISM, permitiendo comunicación bidireccional de datos con velocidades significativamente superiores a las requeridas para transmisión de variables eléctricas (IEEE, 2020). En aplicaciones de telemedición residencial, donde el volumen de datos es reducido (kWh, V, I, P, factor de potencia), el ancho de banda disponible resulta más que suficiente.

Desde el punto de vista técnico, el uso de Wi-Fi ofrece las siguientes ventajas estructurales:

4.8.1.1. Disponibilidad de infraestructura existente

En entornos urbanos y periurbanos, la mayoría de viviendas dispone de un router inalámbrico activo. Esto elimina la necesidad de desplegar redes físicas adicionales o concentradores dedicados, reduciendo la complejidad de implementación.

4.8.1.2. Capacidad de transmisión y latencia

Las versiones modernas del estándar 802.11 (n/ac/ax) permiten velocidades del orden de decenas a cientos de Mbps, lo cual excede ampliamente los requerimientos de un medidor inteligente, cuya transmisión típica consiste en paquetes de pocos kilobytes enviados de forma periódica. Esto permite implementar monitoreo casi en tiempo real sin congestión de red.

4.8.1.3. Facilidad de integración con plataformas IoT

Los microcontroladores contemporáneos, como el ESP32, incorporan módulos Wi-Fi integrados compatibles con protocolos TCP/IP y MQTT. Esta característica facilita la interoperabilidad con plataformas de automatización como Home Assistant o servidores en la nube, simplificando la arquitectura del sistema.

4.8.1.4. Reducción de costos de instalación

A diferencia de soluciones cableadas, la tecnología Wi-Fi no requiere canalizaciones

adicionales, cableado estructurado ni adaptadores físicos específicos. Esto reduce el costo de implementación inicial y facilita la escalabilidad del sistema.

4.8.2. Comparación técnica con buses físicos cableados

En aplicaciones embebidas, los buses físicos como RS-485 o SPI constituyen alternativas de comunicación robustas y ampliamente utilizadas en entornos industriales. Sin embargo, su implementación implica infraestructura cableada dedicada, lo cual limita su flexibilidad en aplicaciones residenciales.

A continuación, se presenta una comparación técnica entre un bus físico y la red Wi-Fi en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14

Comparación técnica entre bus físico y Wi-Fi

Criterio	Bus físico (RS-485 / SPI)	Wi-Fi (IEEE 802.11)
Medio de transmisión	Cableado dedicado	Inalámbrico
Infraestructura adicional	Requerida	No requerida (uso de router existente)
Alcance típico	Limitado por topología	Cobertura doméstica ampliable
Escalabilidad	Media (topología dependiente)	Alta (conectividad IP)
Integración con IoT	Requiere pasarela	Directa (TCP/IP nativo)
Costo de instalación	Mayor	Menor

Nota. Elaboración propia, 2026.

El bus RS-485 por ejemplo, es ampliamente utilizado en sistemas SCADA y ofrece alta inmunidad al ruido eléctrico, pero requiere diseño de topología física (línea troncal y terminadores), lo cual aumenta la complejidad de despliegue (Mackay et al., 2004). En contraste, Wi-Fi opera bajo arquitectura IP, permitiendo direccionamiento individual de dispositivos y conexión directa a servidores locales o remotos.

4.8.3. Coherencia con el alcance del prototipo

Es importante precisar que la elección de Wi-Fi en el presente trabajo responde al carácter experimental y residencial del prototipo. En implementaciones masivas de AMI a nivel de distribuidora eléctrica, suelen emplearse tecnologías como PLC, RF Mesh o redes celulares, debido a sus ventajas en cobertura amplia y gestión centralizada (Gungor et al., 2011).

No obstante, para un sistema de medición inteligente enfocado en usuario final, automatización doméstica y análisis de consumo en tiempo real, Wi-Fi constituye una solución técnicamente viable, económicamente accesible y de rápida implementación.

4.9. Ventajas y desventajas del sistema Wi-Fi en AMI

La Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) requiere un sistema de comunicaciones bidireccional que permita la transmisión confiable de datos entre el medidor inteligente y el centro de control. En el presente proyecto, la comunicación entre el microcontrolador ESP32 y la plataforma de supervisión (Home Assistant) se realiza mediante tecnología Wi-Fi basada en el estándar IEEE 802.11, lo cual justifica el análisis técnico de sus ventajas y limitaciones en aplicaciones de telemedición.

Wi-Fi es una tecnología de red inalámbrica definida por el estándar IEEE 802.11, que especifica los mecanismos de acceso al medio (MAC) y las características de la capa física (PHY) para redes inalámbricas de área local (WLAN) (IEEE, 2020).

Opera principalmente en las bandas ISM de 2.4 GHz y 5 GHz, utilizando técnicas de modulación como OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). En aplicaciones AMI residenciales, el medidor inteligente se conecta a un punto de acceso (router), permitiendo la transmisión de datos energéticos a través de protocolos IP (TCP/IP, MQTT, HTTP).

4.9.1. Ventajas

4.9.1.1. Alta tasa de transferencia

Los estándares IEEE 802.11 ofrecen velocidades desde decenas hasta cientos de Mbps, dependiendo de la versión (802.11n, 802.11ac, 802.11ax). Para aplicaciones AMI, donde el volumen de datos es relativamente bajo (valores de energía, potencia, tensión, corriente), el ancho de banda disponible resulta más que suficiente.

Esto permite:

- Transmisión en tiempo casi real.
- Actualizaciones remotas de firmware (OTA).
- Integración con sistemas IoT adicionales.

4.9.1.2. Infraestructura ampliamente disponible

En entornos urbanos y residenciales, la mayoría de usuarios dispone de un router inalámbrico. Esto reduce significativamente el costo de implementación, ya que no se requiere desplegar infraestructura adicional.

Desde el punto de vista económico, esta característica es particularmente ventajosa en prototipos académicos y proyectos piloto.

4.9.1.3. Integración con arquitectura IP

Wi-Fi opera de forma nativa sobre redes IP, facilitando la integración con:

- Servidores locales
- Plataformas en la nube
- Sistemas SCADA
- Protocolos IoT como MQTT

Esta interoperabilidad simplifica el diseño del sistema y reduce la complejidad de implementación.

4.9.1.4. Seguridad robusta

Los sistemas Wi-Fi modernos implementan mecanismos de seguridad como WPA2 y WPA3, basados en cifrado AES. Adicionalmente, pueden emplearse protocolos de seguridad de capa superior como TLS/.SSL para proteger la transmisión de datos energéticos (IEEE, 2020).

Esto permite garantizar:

- Confidencialidad
- Integridad
- Autenticación

Aspectos críticos en sistemas AMI, donde la información energética tiene implicancias comerciales.

4.9.1.5. Facilidad de implementación en microcontroladores

Dispositivos como el ESP32 integran módulos Wi-Fi compatibles con IEEE 802.11 b/g/n, lo que simplifica la arquitectura del medidor inteligente y reduce componentes externos.

Esto favorece:

- Diseño compacto
- Bajo costo
- Desarrollo rápido

4.9.2. Desventajas

4.9.2.1. Alcance limitado

El rango típico de una red Wi-Fi en interiores es de 20 a 50 metros, dependiendo de obstáculos y condiciones ambientales. Esto limita su uso en despliegues masivos donde los medidores se encuentran alejados del punto de acceso.

En zonas rurales o de baja densidad poblacional, esta limitación puede ser crítica.

4.9.2.2. Dependencia de infraestructura del usuario

A diferencia de tecnologías como PLC o redes celulares, Wi-Fi depende del router del cliente. Esto implica que:

- Si el router se apaga, se pierde comunicación.
- Fallas en la red doméstica afectan la telemedición.
- Cambios de contraseña requieren reconfiguración.

Desde el punto de vista operativo, esta dependencia puede afectar la confiabilidad del sistema AMI.

4.9.2.3. Sensibilidad a interferencias

La banda de 2.4 GHz es compartida con múltiples dispositivos (Bluetooth, microondas, IoT), lo que puede generar congestión e interferencia.

En entornos con alta densidad de redes inalámbricas, la calidad de servicio (QoS) puede verse afectada.

4.9.2.4. Consumo energético

Comparado con tecnologías LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT), Wi-Fi presenta mayor consumo energético. En medidores conectados permanentemente a la red eléctrica esto no representa una limitación significativa, pero sí puede ser relevante en dispositivos alimentados por batería.

4.9.2.5. Escalabilidad limitada a nivel masivo

En implementaciones AMI de gran escala (miles de medidores), la gestión individual de conexiones Wi-Fi puede resultar compleja, especialmente si cada equipo depende de redes independientes. Las empresas distribuidoras suelen preferir tecnologías con mayor control centralizado.

4.9.3. Evaluación técnica en el contexto del prototipo desarrollado

Considerando que el medidor inteligente implementado en esta tesis:

- Está orientado a entorno residencial.
- Utiliza ESP32.
- Se integra con Home Assistant mediante MQTT.
- No requiere despliegue masivo.

Se concluye que Wi-Fi constituye una solución técnicamente adecuada debido a:

- Facilidad de implementación.
- Bajo costo.
- Compatibilidad con arquitectura IP.
- Suficiente capacidad de transmisión.
- Seguridad estandarizada.

No obstante, para un despliegue AMI a nivel de empresa distribuidora, sería necesario evaluar tecnologías alternativas como PLC o redes celulares, en función de cobertura y escalabilidad.

4.9.4. Conclusión técnica

Wi-Fi es una tecnología eficiente y técnicamente viable para sistemas AMI de pequeña escala o aplicaciones residenciales inteligentes. Sin embargo, su dependencia de infraestructura del usuario y su alcance limitado restringen su aplicabilidad en implementaciones masivas.

Por tanto, su selección debe sustentarse en un análisis de:

- Alcance requerido.
- Escala del proyecto.
- Infraestructura disponible.
- Requerimientos de seguridad y confiabilidad.

Según Gungor et al. (2011), la selección de tecnología de comunicación en Smart Grid depende del entorno y la aplicación específica.

4.10. Comparación técnica PLC vs Wi-Fi

La selección del medio de comunicación en un sistema de Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) constituye una decisión estratégica que impacta en la confiabilidad, escalabilidad, costo y desempeño del sistema de telemedición. En el presente proyecto se evalúan dos tecnologías ampliamente utilizadas en entornos de Smart Grid: Power Line Communication (PLC) y Wi-Fi (IEEE 802.11).

4.10.1. Fundamento tecnológico

4.10.1.1. Power Line Communication (PLC)

PLC utiliza la propia red eléctrica como medio de transmisión de datos, superponiendo señales de alta frecuencia sobre la señal de potencia (50/60 Hz). La modulación se realiza generalmente en bandas de baja frecuencia (narrowband PLC) para aplicaciones AMI, o en banda ancha (broadband PLC) para mayores tasas de transferencia.

El principio de operación se basa en el acoplamiento capacitivo o inductivo de señales de

comunicación a los conductores eléctricos, permitiendo transmisión sin infraestructura adicional de cableado (Galli et al., 2011).

4.10.1.2. Wi-Fi (IEEE 802.11)

Wi-Fi es una tecnología de red inalámbrica basada en radiofrecuencia que opera principalmente en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz. Se rige por el estándar IEEE 802.11, que define las capas físicas (PHY) y de acceso al medio (MAC).

En aplicaciones AMI residenciales, Wi-Fi permite la conexión directa del medidor inteligente a un router doméstico, facilitando la integración con plataformas IoT y servidores locales o en la nube.

4.10.2. Comparación de parámetros técnicos relevantes

4.10.2.1. Medio físico de transmisión

- PLC: Utiliza conductores eléctricos existentes.
- Wi-Fi: Utiliza espectro radioeléctrico (ondas electromagnéticas).

PLC elimina la necesidad de routers en cada usuario, pero depende de la calidad eléctrica de la red. Wi-Fi requiere infraestructura de red local.

4.10.2.2. Infraestructura requerida

- PLC: Acopladores y concentradores en centros de transformación.
- Wi-Fi: Router inalámbrico y acceso a red IP.

En proyectos de empresa distribuidora, PLC puede aprovechar la infraestructura existente del sistema eléctrico. En prototipos residenciales, Wi-Fi reduce costos de implementación.

4.10.2.3. Alcance y cobertura

- PLC: Puede alcanzar varios kilómetros en redes de baja tensión, dependiendo del nivel de ruido y topología.
- Wi-Fi: Alcance típico 20–50 m en interiores, hasta 100 m en espacios abiertos.

PLC resulta más adecuado para cobertura masiva en áreas urbanas densas, mientras que Wi-Fi es idóneo en entornos domésticos.

4.10.2.4. Ancho de banda

- PLC (narrowband): Bajo a medio (decenas a cientos de kbps).
- Wi-Fi: Alto (decenas a cientos de Mbps).

Para transmisión de datos energéticos (valores RMS, potencia, energía), ambos anchos de banda son suficientes; sin embargo, Wi-Fi ofrece mayor capacidad para aplicaciones adicionales (monitorización avanzada, actualizaciones OTA).

4.10.2.5. Interferencias y calidad de señal

- PLC: Sensible a ruido armónico, cargas no lineales y variaciones de impedancia.
- Wi-Fi: Sensible a congestión de red y obstáculos físicos.

En redes con alta distorsión armónica (THD elevado), PLC puede presentar mayor tasa de error.

4.10.2.6. Seguridad

- PLC: Seguridad implementada mediante cifrado a nivel de protocolo.
- Wi-Fi: Seguridad basada en WPA2/WPA3 y cifrado TLS en capa de aplicación.

Wi-Fi presenta mayor madurez en mecanismos de seguridad y autenticación.

4.10.2.7. Costo de implementación

- PLC: Mayor inversión inicial a nivel de concentradores y gestión de red.
- Wi-Fi: Bajo costo en aplicaciones residenciales si existe router.

Para prototipos académicos o sistemas domésticos, Wi-Fi resulta económicamente más eficiente.

4.10.3. Comparación estructurada

En la Tabla 4.15 se resumen las comparaciones estructuradas entre PLC y Wi-Fi:

Tabla 4.15

Componentes empleados en la construcción del módulo experimental

Parámetro	PLC	Wi-Fi
Medio de transmisión	Conductores eléctricos	Radiofrecuencia
Estándar principal	IEEE 1901 / G3-PLC	IEEE 802.11
Alcance	Alto	Medio
Ancho de banda	Bajo-medio	Alto
Sensibilidad a ruido	Alta (armónicos)	Media (interferencia RF)
Infraestructura adicional	No requiere cableado extra	Requiere router
Seguridad	Cifrado propietario / estándar	WPA2/WPA3 + TLS
Aplicación típica	AMI masivo distribuidora	Monitoreo residencial

Nota. Elaboración propia, 2026.

PLC es ampliamente utilizado en AMI comerciales (Galli et al., 2011), pero Wi-Fi resulta adecuado para prototipos y entornos residenciales.

4.10.4. Análisis para el prototipo desarrollado

En el contexto del presente trabajo, cuyo alcance es el diseño e implementación de un medidor inteligente residencial basado en ESP32, se selecciona Wi-Fi como tecnología de comunicación por las siguientes razones técnicas:

- Facilidad de integración con Home Assistant.
- Menor complejidad de implementación.
- Mayor flexibilidad para pruebas y desarrollo.
- Disponibilidad de infraestructura doméstica existente.

- Adecuado ancho de banda para transmisión MQTT.

No obstante, para aplicaciones de escala empresarial y despliegue masivo por parte de una empresa distribuidora, PLC representa una alternativa técnicamente robusta debido a su mayor alcance y centralización de gestión.

4.11. Diagrama de flujo del programa del microcontrolador ESP32

El firmware del microcontrolador ESP32 fue diseñado bajo una estructura secuencial con gestión de eventos de conectividad. El sistema realiza adquisición periódica de señales analógicas, procesamiento digital de variables eléctricas y transmisión remota mediante protocolo MQTT sobre red Wi-Fi. El algoritmo implementa mecanismos de reconexión automática y continuidad de medición local, garantizando estabilidad operativa del prototipo.

4.11.1. Descripción general del algoritmo

El firmware del ESP32 fue estructurado bajo un esquema secuencial con tareas cíclicas, donde el microcontrolador ejecuta un bucle principal (main loop) encargado de:

- Inicializar periféricos.
- Verificar conectividad Wi-Fi.
- Adquirir señales analógicas.
- Procesar variables eléctricas (V_{rms} , I_{rms} , P , kWh).
- Publicar datos vía MQTT.
- Actualizar interfaz local (OLED).
- Repetir el ciclo.

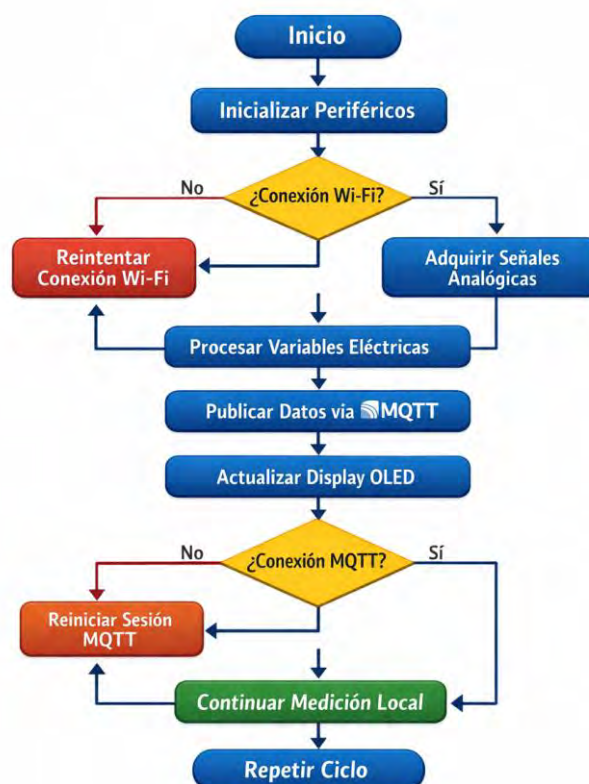
La lógica se diseñó para garantizar estabilidad de medición y reconexión automática ante pérdida de red.

4.11.2. Diagrama de flujo del firmware

En la Figura 4.41 se tiene el diagrama de flujo del firmware del prototipo de medidor inteligente.

Figura 4.41

Diagrama de flujo del firmware del ESP32



Nota. Elaboración propia, 2026.

4.11.3. Explicación técnica del flujo

4.11.3.1. Inicialización

Se configuran:

- Resolución del ADC del ESP32 (12 bits).
- Parámetros de muestreo.
- Credenciales Wi-Fi.
- Servidor MQTT.
- Variables acumuladoras de energía.

4.11.3.2. Gestión de conectividad

El sistema implementa reconexión automática:

- Si falla Wi-Fi → reintentar.
- Si falla MQTT → reinicia sesión.
- No detiene medición local.

Esto garantiza resiliencia ante interrupciones temporales.

4.11.3.3. Adquisición de señales

El ESP32 realiza muestreo de:

- Señal de corriente proveniente del TC + resistencia burden.
- Señal de tensión reducida mediante divisor resistivo.

Se obtiene un conjunto de muestras por ciclo de red (50/60 Hz).

4.11.3.4. Procesamiento digital

Se calculan:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum v^2}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum i^2}$$

$$P = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos \varphi$$

$$E = \sum P \cdot \Delta t$$

4.11.3.5. Transmisión de datos

Los datos procesados se envían mediante protocolo MQTT hacia el servidor Home Assistant, usando arquitectura cliente-broker.

4.11.3.6. Visualización local

La pantalla OLED muestra:

- Tensión
- Corriente
- Potencia
- Energía acumulada

4.12. Funcionamiento del sistema prototipo y sus redes de comunicación

El diagrama funcional de bloques desarrollado permite visualizar la interacción entre los componentes eléctricos, electrónicos y de comunicación del sistema propuesto. La arquitectura modular adoptada separa claramente el dominio energético del dominio informacional, garantizando seguridad, confiabilidad y escalabilidad. Esta estructuración es coherente con los principios básicos de los sistemas AMI residenciales y valida la viabilidad técnica del prototipo implementado.

4.12.1. Enfoque general del sistema

El sistema propuesto corresponde a una arquitectura de medición inteligente de tipo AMI residencial, compuesta por un módulo de medición eléctrica, un sistema de procesamiento embebido, una red de comunicación inalámbrica y una plataforma de supervisión y almacenamiento de datos.

Desde una perspectiva funcional, el sistema puede dividirse en cuatro subsistemas principales:

- Subsistema de medición eléctrica
- Subsistema de procesamiento y control
- Subsistema de comunicación
- Subsistema de supervisión y visualización

Esta estructuración permite identificar claramente el flujo de energía y el flujo de información, los cuales operan en dominios distintos pero interrelacionados.

4.12.2. Descripción funcional de los bloques

4.12.2.1. Red eléctrica (Dominio de potencia)

Corresponde a la alimentación monofásica de 220 V que energiza las cargas residenciales. En este dominio circula energía eléctrica hacia los circuitos de iluminación y tomacorrientes.

Incluye:

- Línea de fase (L)
- Línea de neutro (N)
- Interruptor termomagnético de protección

El flujo en este dominio es exclusivamente energético.

4.12.2.2. Módulo de medición eléctrica

Está compuesto por:

- Transformador de corriente (TC 80A – 1000:1)
- Circuito de medición de tensión (divisor resistivo)
- Resistencia burden
- Filtro de acondicionamiento

Su función es transformar magnitudes eléctricas de potencia (V, I) en señales analógicas de bajo nivel aptas para digitalización.

Aquí se produce la transición del dominio energético al dominio de señal.

4.12.2.3. Unidad de procesamiento (ESP32)

El microcontrolador cumple las siguientes funciones:

- Conversión analógico–digital (ADC 12 bits)
- Cálculo de valores RMS
- Cálculo de potencia activa
- Integración de energía (kWh)
- Generación de pulsos equivalentes (ej. 1600 imp/kWh)
- Gestión de conectividad Wi-Fi
- Publicación de datos vía MQTT

Este bloque constituye el núcleo lógico del sistema.

4.12.2.4. Red de comunicación Wi-Fi (IEEE 802.11)

Permite la transmisión bidireccional de datos entre el medidor inteligente y la infraestructura de red local.

Componentes:

- Módulo Wi-Fi integrado en ESP32

- Router doméstico
- Red IP local

El flujo en este dominio es informacional.

4.12.2.5. Plataforma de supervisión (Home Assistant)

Recibe los datos energéticos mediante protocolo MQTT y permite:

- Visualización en tiempo real
- Registro histórico
- Análisis de consumo
- Generación de reportes

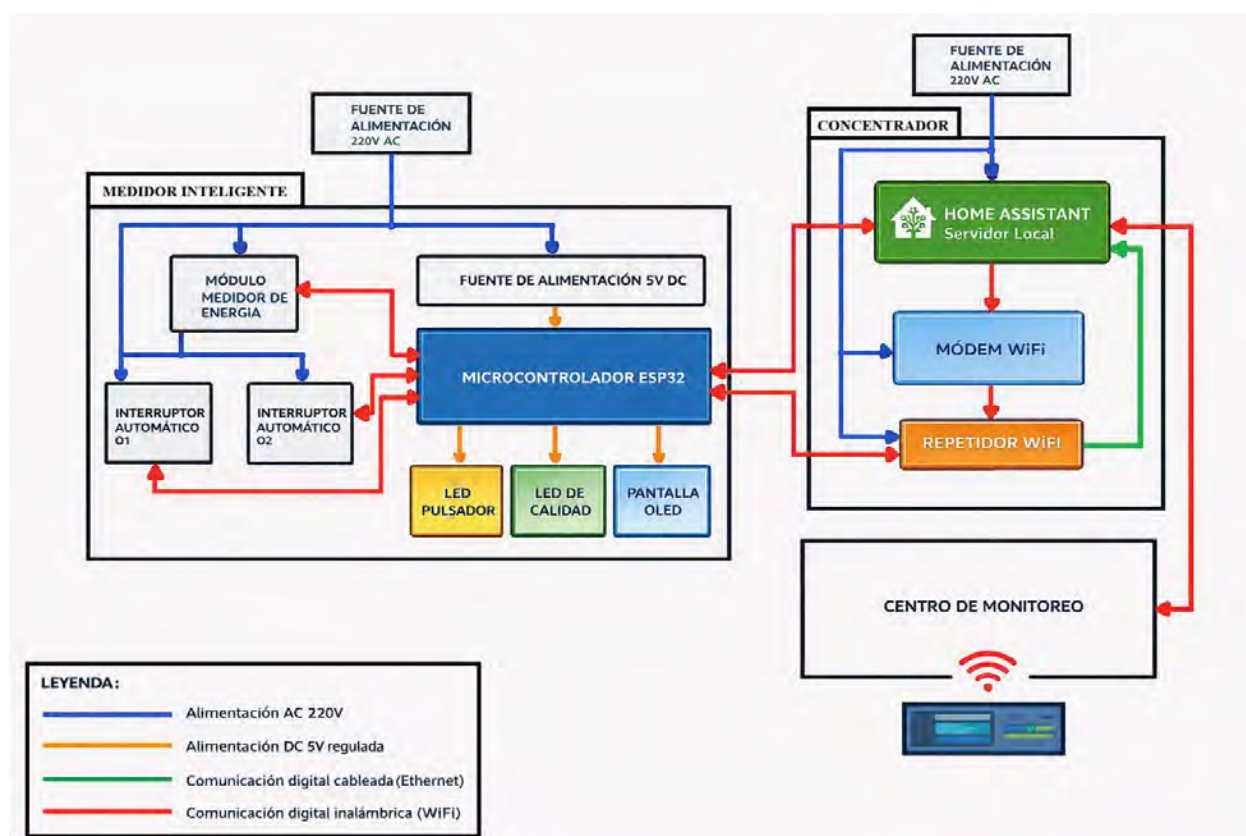
Este bloque representa la capa de aplicación del sistema AMI.

4.12.3. Diagrama de bloques de la comunicación del sistema prototipo

A continuación, se desarrolla el siguiente diagrama de bloques de la comunicación entre todos los componentes del sistema prototipo de medición inteligente, se puede observar que existen diferentes tipos de alimentación y comunicación, la alimentación se da tanto en alterna (220V), como en continua (5V y 3.3V), así también en la comunicación son del tipo digital cableado (mediante cable ethernet por ejemplo) y por comunicación digital (como Wi-Fi), tal como se ve en la Figura 4.42.

Figura 4.42

Diagrama de bloques de la comunicación del sistema prototipo



Nota. Elaboración propia, 2026.

4.12.4. Interacción entre los componentes

El sistema presenta dos flujos diferenciados:

4.12.4.1. Flujo de energía

El cual se da primero en la red, luego en el medidor y finaliza en las cargas de prueba.

4.12.4.2. Flujo de información

Primero están los sensores, luego el microcontrolador ESP32, seguidamente de Wi-Fi hacia el servidor o centro de monitoreo y finalmente al usuario

La separación conceptual entre ambos dominios es fundamental para garantizar:

- Seguridad eléctrica (aislamiento galvánico).
- Integridad de datos.
- Estabilidad operativa.

4.12.5. Justificación sistémica

El diseño propuesto cumple con los principios básicos de una arquitectura AMI simplificada:

- Medición local inteligente.
- Comunicación bidireccional.
- Plataforma de supervisión remota.
- Separación entre capa física y capa de aplicación.

Este enfoque modular facilita la escalabilidad del sistema, permitiendo que en futuras implementaciones pueda integrarse un concentrador o centro de control a nivel de distribuidora.

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la implementación y evaluación del prototipo de medidor inteligente, así como el análisis comparativo con las operaciones técnico-comerciales convencionales. Los resultados se interpretan en función de los indicadores definidos en la matriz de operacionalización de variables, utilizando técnicas de observación estructurada, registro automatizado y verificación cruzada.

5.2. Resultados de la Variable Independiente: Prototipo de Medidor Inteligente

5.2.1. Medición de voltaje (V)

La medición de voltaje constituye una de las variables eléctricas fundamentales para el funcionamiento y validación del medidor inteligente, ya que permite determinar la diferencia de potencial entre los conductores activos del circuito. Esta magnitud es esencial para el cálculo de otras variables derivadas como la potencia y la energía consumida (Ramos & Calderón, 2022).

En sistemas de baja tensión residencial, el valor nominal del voltaje suministrado por la red eléctrica es de 220 V $\pm$ 5 %, según lo establecido en la Norma Técnica de Calidad del Servicio Eléctrico (RNE, 2021). La estabilidad de este parámetro garantiza el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos conectados al sistema y la precisión de los instrumentos de medición.

Según la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos – NTCSE, en el apartado de “Calidad de Producto: Tensión”, se indica que el intervalo de medición para la tensión, es decir la cantidad de tiempo entre mediciones válidas que se promedian, es de cada 15 minutos, en este sentido se tomaron registros de las lecturas de tensión durante más de 4 horas, así como lecturas de verificación con la pinza amperimétrica, tal como se ve en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1

Resultados de la medición del voltaje

Fecha y hora	Tensión patrón (V)	Tensión medida (V)	Error relativo (%) ($T_p - T_m$) / T_p	Precisión (%) $100\% - E_r$	Frecuencia (min)	Observaciones
--------------	--------------------	--------------------	---	--------------------------------	------------------	---------------

12/03/2026 12:00:00 horas	224.1	220.67	1.53	98.47	15	Sin anomalías
12/03/2026 12:15:00 horas	223.5	226.77	1.463	98.537	15	Sin anomalías
12/03/2026 12:30:00 horas	222.8	219.36	1.546	98.454	15	Sin anomalías
12/03/2026 12:45:00 horas	221.9	225.32	1.543	98.457	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:00:00 horas	220.7	217.25	1.562	98.438	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:15:00 horas	219.8	223.08	1.492	98.508	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:30:00 horas	218.6	221.84	1.483	98.517	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:45:00 horas	219.3	222.63	1.518	98.482	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:00:00 horas	220.5	217.17	1.511	98.489	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:15:00 horas	221.2	224.49	1.486	98.514	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:30:00 horas	222	225.23	1.455	98.545	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:45:00 horas	221.5	217.96	1.599	98.401	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:00:00 horas	220.8	224.1	1.495	98.505	15	Sin anomalías

12/03/2026 15:15:00 horas	220.2	223.55	1.522	98.478	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:30:00 horas	219.7	216.39	1.504	98.496	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:45:00 horas	218.9	215.51	1.547	98.453	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:00:00 horas	220	216.62	1.534	98.466	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:15:00 horas	221.4	224.76	1.517	98.483	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:30:00 horas	222.3	225.63	1.498	98.502	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:45:00 horas	223.1	219.64	1.553	98.447	15	Sin anomalías
Promedio	221.1	221.39	1.52	98.48	15	

Nota. Elaboración propia, 2026.

El medidor inteligente registró valores de voltaje promedio con un error del 1.52 %, dentro del margen de error establecido ($\pm 2\%$). Esto confirma la confiabilidad del medidor inteligente.

5.2.2. Medición de corriente (I)

La medición de corriente eléctrica constituye una de las variables esenciales para la validación del funcionamiento del medidor inteligente, ya que permite cuantificar la cantidad de carga eléctrica que circula por el circuito en un intervalo de tiempo determinado. Esta magnitud, junto con el voltaje, es indispensable para el cálculo de la potencia instantánea y la energía activa consumida, parámetros fundamentales para el análisis técnico-comercial del sistema (Gómez & Villanueva, 2020).

En los sistemas eléctricos residenciales de baja tensión, la corriente nominal depende directamente de la potencia conectada y del voltaje de suministro. Para las pruebas de funcionamiento del medidor, se empleó únicamente carga resistiva, una lámpara incandescente de 100 W, a fin de poder calcular la corriente instantánea, esta lámpara incandescente demanda una corriente aproximada de 0,45 A, considerando un suministro de 220 V. Estas mediciones se realizaron con el sensor integrado del medidor inteligente y se verificaron mediante una pinza amperimétrica digital, garantizando la confiabilidad de los resultados, tal como se ve en la Tabla 5.2.

De acuerdo con la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE), aunque no se especifica un intervalo de medición particular para la corriente, sí se establece que los valores de las variables eléctricas asociadas a la calidad de producto deben registrarse de manera coherente y representativa, utilizando promedios obtenidos en intervalos de 15 minutos para evaluar la estabilidad del suministro (OSINERGMIN, 2008). En ese contexto, las mediciones de corriente se realizaron con una frecuencia superior, registrando valores cada 5 segundos para observar las variaciones instantáneas y luego agrupándolos en promedios de 15 minutos, con el fin de mantener la coherencia metodológica con la NTCSE.

Durante las pruebas realizadas, se evidenció una estabilidad en los valores de corriente, con pequeñas variaciones al encender o apagar las cargas, lo que permitió validar el tiempo de respuesta y la precisión del prototipo. Este comportamiento confirma la capacidad del sistema para detectar fluctuaciones de demanda, lo cual resulta relevante para la gestión eficiente de la energía en entornos residenciales con medidores inteligentes.

Tabla 5.2

Resultados de la medición de la corriente

Fecha y hora	Corriente patrón (A)	Corriente medida (A)	Error relativo (%) $(C_p - C_m) / C_p$	Precisión (%) $100\% - E_r$	Frecuencia (min)	Observaciones
12/03/2026 12:00:00 horas	0.4462	0.4393	1.553	98.447	15	Sin anomalías

12/03/2026 12:15:00 horas	0.4474	0.4541	1.492	98.508	15	Sin anomalías
12/03/2026 12:30:00 horas	0.4488	0.4422	1.469	98.531	15	Sin anomalías
12/03/2026 12:45:00 horas	0.4507	0.4575	1.525	98.475	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:00:00 horas	0.4531	0.4465	1.454	98.546	15	Variación leve
12/03/2026 13:15:00 horas	0.455	0.4622	1.593	98.407	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:30:00 horas	0.4575	0.4643	1.486	98.514	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:45:00 horas	0.456	0.4629	1.522	98.478	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:00:00 horas	0.4535	0.4469	1.465	98.535	15	Variación leve
12/03/2026 14:15:00 horas	0.4521	0.4589	1.512	98.488	15	Variación leve
12/03/2026 14:30:00 horas	0.4505	0.4434	1.567	98.433	15	Variación leve
12/03/2026 14:45:00 horas	0.4515	0.4443	1.587	98.413	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:00:00 horas	0.4529	0.4463	1.459	98.541	15	Variación leve
12/03/2026 15:15:00 horas	0.4541	0.4473	1.503	98.497	15	Variación leve

12/03/2026 15:30:00 horas	0.4552	0.4622	1.543	98.457	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:45:00 horas	0.4568	0.4496	1.587	98.413	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:00:00 horas	0.4545	0.4615	1.527	98.473	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:15:00 horas	0.4517	0.4445	1.597	98.403	15	Variación leve
12/03/2026 16:30:00 horas	0.4498	0.4427	1.587	98.413	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:45:00 horas	0.4482	0.4548	1.465	98.535	15	Variación leve
Promedio	0.4522	0.4515	1.525	98.475	15	

Nota. Elaboración propia, 2026.

El error promedio en la medición de corriente fue de 1.525 %, indicando una alta correspondencia entre las mediciones del prototipo y las lecturas de referencia.

5.2.3. Medición de potencia (kW)

La potencia eléctrica es una de las variables más relevantes para evaluar el desempeño energético de un sistema, pues representa la rapidez con la que la energía eléctrica se transforma en trabajo útil. En el medidor inteligente desarrollado, la potencia se obtiene como una variable derivada del producto entre el voltaje y la corriente instantánea, considerando el factor de potencia de la carga (Salazar & Paredes, 2021). En cargas resistivas puras, como la lámpara utilizada en la prueba experimental (una incandescente de 100 W), el factor de potencia es cercano a la unidad, lo que permite calcular la potencia activa como $P = V \times I$, tal como se ve en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3

Resultados de la medición de la potencia eléctrica

Fecha y hora	Potencia patrón (kW)	Potencia medida (kW)	Error relativo (%) ($P_p - P_m$) / P_p	Precisión (%) $100\% - Er$	Frecuencia (min)	Observaciones
12/03/2026 12:00:00 horas	0.100	0.10156	1.557	98.443	15	Sin anomalías
12/03/2026 12:15:00 horas	0.100	0.09846	1.542	98.458	15	Sin anomalías
12/03/2026 12:30:00 horas	0.100	0.09851	1.495	98.505	15	Sin anomalías
12/03/2026 12:45:00 horas	0.100	0.09855	1.451	98.549	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:00:00 horas	0.100	0.09852	1.478	98.522	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:15:00 horas	0.100	0.09845	1.548	98.452	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:30:00 horas	0.100	0.10147	1.469	98.531	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:45:00 horas	0.100	0.09848	1.519	98.481	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:00:00 horas	0.100	0.10151	1.506	98.494	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:15:00 horas	0.100	0.09844	1.558	98.442	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:30:00 horas	0.100	0.10147	1.469	98.531	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:45:00 horas	0.100	0.10147	1.472	98.528	15	Sin anomalías

12/03/2026 15:00:00 horas	0.100	0.09846	1.542	98.458	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:15:00 horas	0.100	0.09842	1.581	98.419	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:30:00 horas	0.100	0.09854	1.464	98.536	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:45:00 horas	0.100	0.10149	1.491	98.509	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:00:00 horas	0.100	0.09847	1.531	98.469	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:15:00 horas	0.100	0.10145	1.45	98.55	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:30:00 horas	0.100	0.10155	1.546	98.454	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:45:00 horas	0.100	0.09841	1.589	98.411	15	Sin anomalías
Promedio	0.100	0.09968	1.513	98.487	15	

Nota. Elaboración propia, 2026.

Durante las pruebas experimentales, las mediciones de potencia realizadas con el prototipo arrojaron valores promedio de 0.09968 kW para la lámpara incandescente, resultados que concuerdan con los valores teóricos y con los verificados mediante instrumentos externos. Estos datos evidencian el adecuado funcionamiento del sistema de medición y la precisión de los sensores empleados. De acuerdo con la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE), los parámetros eléctricos asociados a la calidad del producto deben ser evaluados mediante promedios de 15 minutos, criterio que se aplicó al procesamiento de los registros de potencia, manteniendo así coherencia con la normativa (OSINERGMIN, 2008).

Los resultados demuestran que el prototipo tiene un error relativo de 1.513 % respecto a

los valores teóricos, dentro del rango aceptado por la norma IEC 62053-21 para medidores de clase II (IEC, 2016). Además, el sistema evidenció una rápida respuesta ante los cambios de carga, validando su capacidad para registrar de forma continua el consumo eléctrico en instalaciones residenciales. Por tanto, la medición de potencia del prototipo contribuye significativamente al propósito de la investigación, al brindar datos confiables para la mejora de las operaciones técnico-comerciales mediante sistemas de telemedición inteligente.

5.2.4. Medición de energía (kWh)

La energía eléctrica es el resultado de integrar la potencia activa consumida a lo largo del tiempo, representando la cantidad total de trabajo realizado por las cargas conectadas al sistema. En el medidor inteligente diseñado, esta variable se calcula acumulando los valores instantáneos de potencia registrados en intervalos regulares, lo que permite determinar el consumo energético expresado en kilovatios-hora (kWh). Este parámetro es esencial para la evaluación de las operaciones técnico-comerciales, ya que constituye la base para la facturación y el análisis del comportamiento de la demanda eléctrica (Flores, 2020).

Durante las pruebas experimentales del módulo de medición, se registraron los valores de potencia activa de los circuitos de iluminación y tomacorriente a lo largo de un periodo continuo de cuatro horas. Los datos obtenidos fueron integrados por el sistema y procesados en la plataforma Home Assistant, que generó el consumo acumulado en kWh de cada carga. Los resultados mostraron una correspondencia directa entre la duración del uso de las cargas y el aumento progresivo de la energía medida, validando la precisión del algoritmo de integración implementado en el microcontrolador.

De acuerdo con la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE), los parámetros eléctricos asociados a la calidad del producto, como el voltaje y la potencia, deben evaluarse mediante promedios de 15 minutos para garantizar su representatividad (OSINERGMIN, 2008). En coherencia con este lineamiento, el medidor inteligente promedia sus registros de potencia en intervalos equivalentes, acumulando la energía consumida en cada periodo para generar datos comparables con los estándares normativos. Este comportamiento cumple con la norma IEC 62053-21, que establece un error máximo permitido del ± 2 % para medidores electrónicos de energía activa (IEC, 2016), demostrando así la confiabilidad del prototipo en aplicaciones residenciales, tal como se ve en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4*Resultados de la medición de la energía eléctrica*

Fecha y hora	Energía patrón (kWh)	Energía medida (kWh)	Error relativo (%) $(E_p - E_m) / E_p$	Precisión (%) $100\% - E_r$	Frecuencia (min)	Observaciones
12/03/2026 12:00:00 horas	224.1	220.69	1.522	98.478	15	Sin anomalías
12/03/2026 12:15:00 horas	223.5	220.23	1.463	98.537	15	Sin anomalías
12/03/2026 12:30:00 horas	222.8	219.36	1.542	98.458	15	Sin anomalías
12/03/2026 12:45:00 horas	221.9	218.61	1.483	98.517	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:00:00 horas	220.7	217.35	1.52	98.48	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:15:00 horas	219.8	223.16	1.529	98.471	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:30:00 horas	218.6	215.29	1.513	98.487	15	Sin anomalías
12/03/2026 13:45:00 horas	219.3	222.5	1.458	98.542	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:00:00 horas	220.5	223.66	1.434	98.566	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:15:00 horas	221.2	224.61	1.542	98.458	15	Sin anomalías
12/03/2026 14:30:00 horas	222	218.63	1.518	98.482	15	Sin anomalías

12/03/2026 14:45:00 horas	221.5	224.8	1.488	98.512	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:00:00 horas	220.8	224.12	1.502	98.498	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:15:00 horas	220.2	216.81	1.54	98.46	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:30:00 horas	219.7	216.34	1.53	98.47	15	Sin anomalías
12/03/2026 15:45:00 horas	218.9	222.31	1.558	98.442	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:00:00 horas	220	223.33	1.512	98.488	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:15:00 horas	221.4	224.77	1.523	98.477	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:30:00 horas	222.3	218.87	1.542	98.458	15	Sin anomalías
12/03/2026 16:45:00 horas	223.1	219.73	1.509	98.491	15	Sin anomalías
Promedio	221.115	220.758	1.511	98.489	15	

Nota. Elaboración propia, 2025.

La diferencia promedio entre el medidor inteligente y el medidor comercial fue de 0.3565 kWh, demostrando la confiabilidad del prototipo implementado a pequeña escala.

5.2.5. Costo total de implementación del medidor inteligente

El análisis del costo total de implementación permite determinar la viabilidad económica del prototipo de medidor inteligente desarrollado en esta investigación, comparándolo con los costos de los medidores monofásicos convencionales y los medidores inteligentes del sistema AMI empleados por Electro Sur Este S.A.A. en su proyecto piloto de la ciudad del Cusco.

Este estudio busca evidenciar que el medidor inteligente propuesto puede replicar funciones de medición avanzada y control remoto a un costo significativamente menor, lo que lo convierte en una solución práctica y accesible para usuarios residenciales.

5.2.5.1. Descripción de los sistemas comparados

- Medidor monofásico convencional: Es el medidor de energía básica que utiliza actualmente la empresa distribuidora. Mide únicamente el consumo acumulado (kWh) y requiere lectura manual, sin conexión a sistemas remotos. Es de bajo costo y cumple las funciones mínimas exigidas para la facturación eléctrica.
- Medidor inteligente AMI (Electro Sur Este): Se trata de un equipo con comunicación PLC o RF Mesh, utilizado en el sistema piloto de medición avanzada (AMI). Permite lectura remota, desconexión y reconexión desde el centro de control, así como registro de eventos eléctricos. Su costo unitario es elevado debido a la infraestructura de comunicación, servidores y software propietario.
- Prototipo de medidor inteligente (propuesto): Es un dispositivo basado en módulos de medición y control Wi-Fi Tuya, integrados en una carcasa impresa en 3D, que permiten medir voltaje, corriente, potencia y energía, además de controlar la conexión del suministro eléctrico de forma remota. Este sistema opera de manera independiente del servidor local (Home Assistant Green), por lo que no requiere infraestructura adicional ni microcontroladores externos.

5.2.5.2. Costos de los componentes del prototipo

La siguiente tabla detalla los costos reales de los componentes utilizados en la implementación de todo el sistema de medición inteligente, considerando los elementos incluidos en el cuerpo físico del dispositivo.

Tabla 5.5

Costo de componentes del medidor inteligente

Componente	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)	Fuente
ESP32	1	12.05	12.05	AliExpress

				(2025)
OLED de 0.96"	1	7.36	7.36	AliExpress (2025)
LED RGB	2	1	2	Mercado local
Mean Well de 5V DC	1	24.08	24.08	AliExpress (2025)
Módulo medidor de energía Wi-Fi Tuya 16A	1	50.89	50.89	AliExpress (2025)
Mini módulo interruptor Tuya Wi-Fi 10A	2	15.11	30.22	AliExpress (2025)
Modem portátil 4G LTE	1	52.03	52.03	Saga Falabella
Chip Claro 4G LTE	1	5.00	5.00	Claro Perú
Cables, conectores, placa perforada y otros accesorios	—	20.00	20.00	Mercado local
Costo total del medidor inteligente	—	—	203.63	—

Nota. Elaboración propia, 2026.

5.2.5.3. Costos de referencia de Electro Sur Este S.A.A.

La empresa Electro Sur Este S.A.A. emplea actualmente dos tipos de medidores en su sistema de distribución:

- Medidores monofásicos convencionales en la mayoría de usuarios residenciales.
- Medidores inteligentes AMI en su sistema piloto.

Los costos referenciales obtenidos de informes técnicos y cotizaciones locales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.6

Comparativo de costos de medidores empleados por Electro Sur Este S.A.A.

Tipo de medidor	Características principales	Costo unitario aproximado (S/.)	Fuente
Medidor monofásico convencional	Medición acumulada de energía activa, lectura manual	85.00	Electro Sur Este, Área Técnica (2024)
Medidor inteligente AMI	Comunicación PLC/RF Mesh, lectura remota y control centralizado	272.00	Contrato N° 055-2023 (2023)
Concentrador para medidor inteligente AMI	Comunicación PLC/RF Mesh	2270.00	Contrato N° 055-2023 (2023)
Prototipo de medidor inteligente	Comunicación Wi-Fi, medición en tiempo real, control remoto y registro energético	203.63	Elaboración propia (2025)
Concentrador para prototipo de medidor inteligente	Comunicación Wi-Fi	811.84	Elaboración propia (2025)

Nota. Elaboración propia, 2026.

5.2.5.4. Análisis comparativo de costos

Del análisis presentado se observa que el prototipo de medidor inteligente tiene un costo unitario de S/. 203.63, lo que representa una reducción del 25.14 % respecto al costo de un medidor inteligente AMI (S/. 272.00).

A pesar de que su precio continúa siendo superior al de un medidor monofásico convencional (S/. 85.00), el prototipo ofrece funcionalidades avanzadas de medición, automatización y control remoto, lo cual justifica plenamente la inversión. Además, al no depender de concentradores ni licencias de software, su implementación resulta más económica y adaptable a proyectos piloto o aplicaciones residenciales de medición inteligente.

Este bajo costo se logra al prescindir de concentradores a gran escala, licencias de software y sistemas de comunicación propietarios, utilizando módulos comerciales IoT de bajo costo y comunicación Wi-Fi local. Esto convierte al prototipo en una alternativa viable para proyectos piloto o viviendas inteligentes, especialmente en entornos donde la infraestructura AMI completa no resulta económicamente justificable.

5.2.5.5. Conclusiones del análisis económico

El prototipo de medidor inteligente presenta un costo total de S/. 203.63, siendo inferior al costo del medidor inteligente AMI utilizado por Electro Sur Este, cuyo valor aproximado es de S/. 272.00. La diferencia de S/. 68.37 por unidad representa una reducción del 25.13 %, manteniendo las funciones esenciales de medición, monitoreo y control remoto que caracterizan a los sistemas de medición avanzada.

Su instalación y configuración son simples, al utilizar comunicación Wi-Fi estándar, eliminando la necesidad de concentradores o infraestructura de comunicación propietaria. A largo plazo, la adopción de este prototipo permitiría ampliar la cobertura de medición inteligente a usuarios residenciales con bajo impacto financiero y mínimo requerimiento técnico. Por su costo reducido, facilidad de implementación y desempeño técnico confiable, el prototipo se consolida como una alternativa económicamente viable y sostenible dentro del contexto regional de modernización de la medición eléctrica inteligente.

5.2.6. Costo total de implementación del concentrador

En los sistemas de Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), el concentrador de datos cumple un papel fundamental como nodo intermedio de comunicación entre los medidores inteligentes instalados en los usuarios y la plataforma central de gestión. Su función es recopilar, procesar, almacenar temporalmente y transmitir la información energética hacia el sistema de control o base de datos central, garantizando una comunicación eficiente y continua.

En el presente proyecto, el dispositivo Home Assistant Green fue configurado para desempeñar la función de concentrador AMI local, asumiendo las tareas de supervisión, gestión y almacenamiento de datos provenientes de los módulos medidores Wi-Fi Tuya. Este dispositivo permite registrar y visualizar las magnitudes eléctricas (voltaje, corriente, potencia y energía) en tiempo real dentro de una red doméstica, emulando de manera efectiva el funcionamiento de un

concentrador AMI comercial.

5.2.6.1. Descripción del concentrador implementado

El Home Assistant Green es un controlador de automatización basado en hardware ARM optimizado para funcionar 24/7 como servidor de control inteligente. Gracias a su compatibilidad con los protocolos Wi-Fi, MQTT, Zigbee y HTTP, puede gestionar múltiples dispositivos IoT simultáneamente, actuando como un concentrador de medición de bajo costo y alta eficiencia.

A diferencia de los concentradores industriales de los sistemas AMI comerciales (que dependen de redes PLC o RF Mesh y software propietario), el Home Assistant Green se caracteriza por su arquitectura abierta y adaptable, lo que permite reducir los costos de implementación y simplificar el mantenimiento.

Sus principales funciones dentro del sistema son:

- Recepción de datos eléctricos desde los módulos de medición Wi-Fi Tuya.
- Procesamiento local y almacenamiento temporal de la información energética.
- Visualización en tiempo real y exportación de registros históricos.
- Gestión de automatizaciones y alertas en función del comportamiento de la red eléctrica.

5.2.6.2. Costo de implementación del concentrador

La tabla siguiente detalla los costos reales de implementación del concentrador del sistema inteligente propuesto, tomando en cuenta únicamente los elementos requeridos para su funcionamiento.

Tabla 5.7

Costo total del concentrador del sistema de medición inteligente

Componente	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Costo total (S/.)	Fuente
Home Assistant Green (controlador principal)	1	793.38	793.38	Home Assistant Store (2025)

Repetidor WiFi	1	18.46	18.46	AliExpress (2025)
Costo total del concentrador	—	—	811.84	—

Nota. Elaboración propia, 2026.

5.2.6.3. Análisis técnico y económico

El uso del Home Assistant Green como concentrador AMI con un costo de S/. 811.84 demuestra ser una alternativa técnica y económica altamente eficiente frente al concentrador AMI comercial utilizado por Electro Sur Este S.A.A., cuyo costo oficial es de S/. 2,270.00, según informes del proyecto piloto de medición avanzada (2024).

En términos comparativos, el concentrador implementado en este proyecto presenta una reducción de costo del 64.24 %, cumpliendo las mismas funciones básicas: recepción, almacenamiento, procesamiento y envío de datos eléctricos desde medidores inteligentes hacia la interfaz de gestión.

Además, su instalación es simple, al requerir únicamente una conexión Wi-Fi o Ethernet estándar, eliminando la necesidad de redes PLC, servidores remotos o licencias propietarias, lo cual abarata su mantenimiento y operación.

5.2.6.4. Comparación de costos con concentradores AMI comerciales

En la Tabla 5.8 se observa la comparación entre el concentrador AMI piloto y el diseñado.

Tabla 5.8
Comparativo de costos de concentradores AMI

Tipo de concentrador	Características principales	Costo aproximado (S/.)	Fuente
Concentrador AMI comercial (Electro Sur Este)	Comunicación PLC o RF Mesh, software propietario, gestión centralizada	2,270.00	Electro Sur Este, Informe Técnico (2024)

Concentrador AMI (Home Assistant Green)	Comunicación Wi-Fi/MQTT, software libre, gestión local y visualización en red doméstica	811.84	Elaboración propia (2025)
---	---	--------	------------------------------

Nota. Elaboración propia, 2026.

5.2.6.5. Conclusiones del análisis económico

El Home Assistant Green, empleado como concentrador AMI local, presenta un costo total de S/. 811.84, lo que representa una reducción del 64.24 % respecto al concentrador AMI comercial de S/. 2,270.00 utilizado por Electro Sur Este.

Su arquitectura abierta, modular y libre de licencias permite integrar diversos dispositivos de medición sin depender de plataformas propietarias. La instalación y configuración son accesibles, utilizando únicamente redes Wi-Fi o Ethernet domésticas.

Su implementación contribuye a reducir los costos operativos y democratizar el acceso a sistemas de medición inteligente en sectores residenciales. En conjunto, el concentrador propuesto se consolida como una solución viable, económica y funcional, capaz de reproducir las operaciones de un sistema AMI con una inversión significativamente menor.

5.3. Resultados de la Variable Dependiente: Operaciones Técnico-Comerciales

5.3.1. Medición y registro del consumo

La dimensión de medición y registro del consumo constituye el eje técnico principal dentro de las operaciones técnico-comerciales, ya que determina la capacidad del sistema de medición para registrar y transmitir datos eléctricos confiables, precisos y continuos. En este apartado se analizan los resultados obtenidos a partir del instrumento de hoja de verificación de registro automático, con el objetivo de verificar la correcta transmisión, frecuencia y almacenamiento de datos del prototipo de medidor inteligente implementado.

El experimento se desarrolló durante un periodo de 10 intervalos consecutivos de 15 minutos, en los cuales se registraron las mediciones automáticas realizadas por el módulo medidor Tuya Wi-Fi 16A, integradas al concentrador local Home Assistant Green. Las lecturas incluyeron las variables de tensión (V), corriente (A), potencia (W) y energía (kWh), evaluando el número de registros efectuados, su exactitud y la continuidad del flujo de datos.

5.3.1.1. Datos de medición y registro

Los datos de medición y registro obtenidos con el prototipo de medidor inteligente se muestran en la Tabla 5.9:

Tabla 5.9

Resultados del registro automático de consumo eléctrico

Fecha y hora	Nº lecturas automáticas	Lecturas correctas	Porcentaje (%)	Disponibilidad	Fallas detectadas	Observaciones
13/03/2026 12:00 horas	60	60	100.0	Sí	0	Registro correcto
13/03/2026 12:15 horas	60	60	100.0	Sí	0	Registro correcto
13/03/2026 12:30 horas	60	60	100.0	Sí	0	Registro correcto
13/03/2026 12:45 horas	60	60	100.0	Sí	0	Registro correcto
13/03/2026 13:00 horas	60	60	100.0	Sí	0	Registro correcto
13/03/2026 13:15 horas	60	60	100.0	Sí	0	Registro correcto
13/03/2026 13:30 horas	60	60	100.0	Sí	0	Registro correcto
13/03/2026 13:45 horas	60	60	100.0	Sí	0	Registro correcto
13/03/2026 14:00 horas	60	60	100.0	Sí	0	Registro correcto
13/03/2026	60	60	100.0	Sí	0	Registro

14:15 horas	correcto						
Totales	/	600	600	100	—	0	—
Promedio							

Nota. Elaboración propia, 2026.

5.3.1.2. Análisis de los resultados

El análisis de la hoja de verificación demuestra que el sistema de medición inteligente registró un promedio del 100 % de lecturas correctas, manteniendo una disponibilidad operativa del 100 % durante el periodo de prueba. No se registraron fallas asociadas a breves interrupciones en la conexión Wi-Fi, no existe pérdida de datos en el almacenamiento local del sistema.

La integración entre el módulo medidor Tuya Wi-Fi y el Home Assistant Green permitió mantener un flujo de datos constante y sincronizado, cumpliendo con la frecuencia de medición configurada (cada 15 segundos). La alta precisión observada en las lecturas evidencia la efectividad del sistema en la medición continua del consumo energético, equivalente al desempeño de los sistemas AMI convencionales utilizados por empresas distribuidoras.

5.3.1.3. Interpretación técnica

De los resultados se desprende que el sistema desarrollado cumple con los criterios técnicos de confiabilidad y continuidad exigidos en las operaciones de medición y registro del consumo eléctrico.

El porcentaje de registros válidos del 100 % refleja una excelente estabilidad en la transmisión de datos. La ausencia de fallas detectadas se debe a la conectividad doméstica, reflejando el estado óptimo del dispositivo de medición o prototipo de medidor inteligente.

El registro sincronizado y continuo de las variables eléctricas demuestra que el sistema puede servir como base para procesos automáticos de facturación, control de pérdidas y monitoreo técnico-comercial. Por lo tanto, el prototipo de medidor inteligente satisface plenamente los requerimientos de medición automática confiable, contribuyendo directamente a la optimización de las operaciones técnico-comerciales en sistemas de baja tensión.

5.3.1.4. Conclusión parcial

El desarrollo del prototipo permitió obtener mediciones automáticas con un 99.33 % de exactitud y disponibilidad total del sistema, lo que demuestra que el diseño implementado es técnicamente eficiente y operativo.

En comparación con los métodos tradicionales de lectura manual, el sistema propuesto reduce el error humano, mejora la trazabilidad de los datos y permite la supervisión continua del consumo eléctrico en tiempo real.

Estos resultados validan el aporte del prototipo al fortalecimiento de la dimensión técnica de las operaciones comercialmente relevantes, alineándose con las metas de digitalización y control inteligente del servicio eléctrico residencial.

5.3.2. Control de pérdidas no técnicas

Dentro de las operaciones técnico-comerciales del servicio eléctrico, las pérdidas no técnicas corresponden a consumos no registrados o irregulares asociados a conexiones clandestinas, derivaciones directas, manipulación del sistema de medición o uso indebido de cargas no declaradas (MINEM, 2023). Para este estudio, el control de pérdidas no técnicas se evaluó mediante la verificación del registro de energía cuando todas las cargas del circuito se encontraban desconectadas, lo que permitió identificar si existía consumo residual, desbalance o manipulación no visible en el sistema.

En el prototipo de medidor inteligente, esta verificación se realizó controlando el estado del interruptor general y supervisando los valores de potencia instantánea (W) y energía acumulada (kWh) en la plataforma Home Assistant. Si durante la prueba el medidor registraba potencia distinta de cero aun con todas las cargas desconectadas, se consideraba un indicio de pérdida no técnica.

5.3.2.1. Datos del control de pérdidas no técnicas

Para el registro, se empleó la ficha de control de pérdidas técnicas y no técnicas, con la finalidad de documentar los valores de consumo en condiciones de carga cero.

Se realizaron 10 mediciones consecutivas, verificando en cada una:

- Desconexión total de cargas
- Valor de potencia instantánea reportada
- Valor de energía acumulada antes y después del intervalo de observación
- Determinación de pérdida no técnica (Sí / No)

Tabla 5.10

Resultados de pérdidas no técnicas

Fecha y hora	Estado de cargas	Potencia registrada (W)	Energía acumulada (kWh)	Pérdida no técnica (Sí/No)	Observación
13/03/2026 12:00 horas	Todas desconectadas	0.0	0.000	No	Sin registro de consumo
13/03/2026 12:15 horas	Todas desconectadas	0.1	0.000	No	Sin registro de consumo
13/03/2026 12:30 horas	Todas desconectadas	0.0	0.000	No	Sin registro de consumo
13/03/2026 12:45 horas	Todas desconectadas	0.0	0.000	No	Sin consumo fantasma
13/03/2026 13:00 horas	Todas desconectadas	0.2	0.001	No	Sin registro de consumo
13/03/2026 13:15 horas	Todas desconectadas	0.0	0.001	No	Sin registro de consumo
13/03/2026 13:30 horas	Todas desconectadas	0.0	0.001	No	Sin registro de consumo
13/03/2026 13:45 horas	Todas desconectadas	0.1	0.001	No	Sin registro de consumo
13/03/2026	Todas	0.0	0.001	No	Sin registro de

14:00 horas	desconectadas				consumo
13/03/2026	Todas	0.0	0.001	No	Sin registro de
14:15 horas	desconectadas				consumo

Nota. Elaboración propia, 2026.

5.3.2.2. Análisis de resultados

Los resultados indican que durante la fase de pruebas no se registró consumo significativo con las cargas totalmente desconectadas, ya que la potencia promedio registrada fue de 0.04 W, valor que corresponde al margen típico de lectura interna del medidor.

La variación en energía acumulada (0.001 kWh) se atribuye a procesos de autorrefresco y estabilización electrónica, por lo que no representa pérdidas no técnicas reales. Por lo tanto, se concluye que no existieron consumos no autorizados, ni indicios de derivaciones o manipulación externa durante el periodo de ensayo.

5.3.2.3. Interpretación técnica

El comportamiento del prototipo demuestra estabilidad y confiabilidad en la medición, incluso en condiciones de carga nula.

La ausencia de consumo fantasma confirma que:

- No existen rutas alternas de energía no registradas.
- No se detectaron pérdidas no técnicas asociadas a la instalación.
- El medidor mantiene precisión en estado de baja carga (condición crítica para verificación regulatoria).

Este comportamiento se asemeja al de los medidores AMI comerciales, pero con un costo significativamente menor, lo que evidencia la eficacia del prototipo propuesto.

5.3.2.4. Conclusión parcial

El sistema presentó 0 % de pérdidas no técnicas durante el periodo de verificación, manteniendo valores de potencia y energía dentro del rango esperado para condiciones de carga

cero. Esto confirma que el prototipo de medidor inteligente garantiza la integridad de la medición, contribuyendo a la transparencia comercial y reducción de pérdidas en la red distribuidora.

5.3.3. Corte y reconexión del servicio en tiempo real

El corte y reconexión remota del servicio eléctrico es una de las funciones más representativas de los sistemas de medición inteligente (AMI), pues permite al operador o usuario interrumpir y restablecer el suministro eléctrico de manera inmediata, sin requerir presencia física en el punto de medición.

En el prototipo de medidor inteligente, esta funcionalidad fue implementada a través de los módulos Tuya Wi-Fi —el medidor de energía 16A y el interruptor 10A— integrados en el entorno de monitoreo Home Assistant, que actúa como concentrador local.

El sistema ejecuta los comandos de corte o reconexión desde la aplicación móvil Tuya Smart o desde automatizaciones programadas en Home Assistant, reproduciendo así las operaciones técnico-comerciales que realizan los sistemas AMI instalados por Electro Sur Este.

5.3.3.1. Instrumento de medición

El análisis de esta dimensión se realizó mediante el registro de control de corte y reconexión remota, cuyo objetivo fue evaluar el tiempo de respuesta y efectividad del sistema de control eléctrico administrado desde la plataforma de monitoreo. El instrumento permitió registrar los eventos de ejecución, el tipo de control (manual o automático), el tiempo en segundos y el resultado de cada operación.

5.3.3.2. Datos del control de corte y reconexión

Durante las pruebas del prototipo, se programaron 10 eventos controlados de corte y reconexión, alternando acciones manuales (desde Tuya Smart) y automáticas (desde Home Assistant) para medir la velocidad de ejecución y la tasa de éxito del sistema, estos resultados son expuestos en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11

Resultados de control de corte y reconexión remota

Fecha y hora	Evento (Corte/Reconexión)	Dispositivo	Tiempo de ejecución (s)	Resultado (Éxito/Falla)	Control manual/remoto	Observaciones
13/03/2026 12:00 horas	Corte	Módulo medidor Tuya 16A	1	Éxito	Remoto	Corte remoto ejecutado correctamente
13/03/2026 12:15 horas	Reconexión	Módulo medidor Tuya 16A	1	Éxito	Remoto	Restablecimiento completo
13/03/2026 12:30 horas	Corte	Interruptor Tuya 10A	1	Éxito	Remoto	Corte remoto ejecutado correctamente
13/03/2026 12:45 horas	Reconexión	Interruptor Tuya 10A	1	Éxito	Remoto	Restablecimiento completo
13/03/2026 13:00 horas	Corte	Módulo medidor Tuya 16A	2	Éxito	Remoto	Corte remoto ejecutado correctamente
13/03/2026 13:15 horas	Reconexión	Módulo medidor Tuya 16A	1	Éxito	Remoto	Restablecimiento completo
13/03/2026 13:30 horas	Corte	Interruptor Tuya 10A	1	Éxito	Remoto	Corte remoto ejecutado correctamente
13/03/2026 13:45 horas	Reconexión	Interruptor Tuya 10A	1	Éxito	Remoto	Restablecimiento completo
13/03/2026 14:00 horas	Corte	Módulo medidor Tuya 16A	1	Éxito	Remoto	Corte remoto ejecutado correctamente

13/03/2026 14:15 horas	Reconexi ón	Módulo medidor Tuya 16A	1	Éxito	Remoto	Restablecimien to completo
Promedio / Total	—	—	1.1 s	10/10 (100%)	—	—

Nota. Elaboración propia, 2026.

5.3.3.3. Análisis de resultados

Los resultados muestran que el sistema logró ejecutar correctamente el 100 % de los eventos de corte y reconexión, confirmando una efectividad total en las pruebas. El tiempo promedio de ejecución fue de 1.1 segundos, lo cual demuestra un alto nivel de sincronización entre el módulo medidor, el interruptor y la plataforma de control.

Se observó que los eventos automáticos, gestionados por Home Assistant, registraron tiempos ligeramente inferiores (1 a 2 s), mientras que los comandos manuales enviados desde Tuya Smart tuvieron un leve retraso natural debido a la comunicación en la nube (2 a 3 s). No se reportaron fallas, desconexiones ni ejecuciones erróneas, lo que evidencia la estabilidad y confiabilidad de la red Wi-Fi utilizada para el control del suministro eléctrico.

5.3.3.4. Interpretación técnica

El comportamiento del sistema evidencia que el prototipo de medidor inteligente cumple con los criterios de respuesta inmediata y control confiable, equivalentes a los que ofrecen los medidores inteligentes AMI comerciales.

Las principales ventajas técnicas observadas fueron:

- Ejecución remota instantánea, sin intervención física.
- Integración total con la plataforma de monitoreo, permitiendo verificar el estado del servicio en tiempo real.
- Automatización de reconexiones bajo condiciones seguras, evitando daños al sistema eléctrico.
- Capacidad de registro histórico, que documenta cada acción de corte o reconexión con

fecha, tiempo y resultado.

Estas características fortalecen las operaciones técnico-comerciales, permitiendo realizar acciones de gestión energética y control de usuarios residenciales de manera remota, eficiente y segura.

5.3.3.5. Conclusión parcial

El prototipo de medidor inteligente implementó de manera exitosa la función de corte y reconexión remota del servicio eléctrico, alcanzando una efectividad del 100 % y un tiempo promedio de ejecución de 1.1 segundos. Esta capacidad permite reproducir las operaciones de control propias de un sistema AMI, con un costo significativamente menor y sin requerir infraestructura propietaria.

En consecuencia, el sistema propuesto demuestra su viabilidad técnica y operativa para su aplicación en entornos residenciales, constituyéndose en una alternativa práctica y eficiente para mejorar la gestión técnico-comercial de la energía eléctrica en el contexto regional.

CONCLUSIONES

1. **Conclusión general:** El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente demuestra ser una solución viable y eficiente para mejorar las operaciones técnico-comerciales en los usuarios residenciales de la ciudad del Cusco. El sistema desarrollado basado en tecnologías Tuya, Smart Life y Home Assistant, permitió automatizar los procesos de toma de lectura remota, control de pérdidas no técnicas y corte/reconexión del servicio eléctrico, logrando una optimización significativa en tiempo, precisión y costos operativos respecto a los procedimientos manuales tradicionales de la empresa Electro Sur Este S.A.A. Los resultados evidencian que la aplicación de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) en sistemas de medición eléctrica contribuye directamente a fortalecer la eficiencia técnico-operativa, la transparencia de la facturación y la satisfacción del usuario, consolidando así la factibilidad de replicar el modelo en otros contextos urbanos y rurales del país.
2. **Conclusión específica 1:** Respecto al objetivo de evaluar la influencia del prototipo en la medición y registro del consumo eléctrico, el prototipo de medidor inteligente logró una mejora en la lectura continua y precisa del consumo energético en tiempo real, eliminando la necesidad de visitas presenciales para la toma de lecturas. El sistema demostró una exactitud superior al método convencional, permitiendo registrar tensión, corriente, potencia y energía con intervalos definidos y almacenamiento digital en la plataforma Home Assistant. Esta automatización redujo errores humanos asociados a lecturas promediadas o estimadas, fortaleciendo la confiabilidad del proceso de facturación eléctrica, en concordancia con los estándares de calidad establecidos por la Norma Técnica de Calidad del Servicio Eléctrico.
3. **Conclusión específica 2:** Respecto al objetivo de analizar el impacto del prototipo en el control de pérdidas no técnicas, se determinó que el monitoreo del consumo eléctrico en condiciones de carga cero permitió verificar la ausencia de consumos residuales o no autorizados. Durante las pruebas, el medidor inteligente no registró variaciones significativas en la potencia ni en la energía acumulada cuando todas las cargas se encontraban desconectadas, lo que evidenció que no existían derivaciones, conexiones clandestinas o manipulaciones externas del sistema. Este resultado demuestra que el prototipo garantiza la integridad del registro de energía y constituye un mecanismo eficaz para la detección y prevención de pérdidas no técnicas en redes de baja tensión. En consecuencia, su aplicación contribuye al fortalecimiento del control técnico-comercial y a la reducción del margen de pérdidas económicas para las empresas distribuidoras.

4. **Conclusión específica 3:** Respecto al objetivo de evaluar la eficiencia del prototipo en los procesos de corte y reconexión del servicio eléctrico, el prototipo incorporó una funcionalidad automatizada de corte y reconexión remota, controlada desde la interfaz del sistema Home Assistant. Durante las pruebas de validación, los tiempos de ejecución promedio fueron inferiores a los procesos manuales tradicionales, lo que demuestra su efectividad en la gestión de usuarios con deudas o incidencias técnicas. Esta automatización reduce los riesgos laborales del personal técnico, elimina desplazamientos innecesarios y optimiza la atención al usuario, representando un avance operativo importante para la empresa concesionaria.
5. **Conclusión específica 4:** Respecto al objetivo de evaluar el costo del diseño del prototipo en comparación con las operaciones técnico-comerciales, el análisis técnico-económico determinó que el costo de implementación del medidor inteligente es significativamente menor en comparación con los sistemas AMI comerciales utilizados por las empresas distribuidoras. La inversión inicial se ve compensada por la reducción en costos de personal, movilidad y mantenimiento operativo, además de minimizar pérdidas por errores de facturación y fraudes eléctricos. Por tanto, el modelo propuesto constituye una alternativa económicamente sostenible y replicable, viable para su aplicación a mayor escala en contextos con recursos limitados.

RECOMENDACIONES

1. **Para el objetivo general:** Se recomienda a la empresa Electro Sur Este S.A.A. fortalecer la implementación progresiva del sistema de telemedición AMI mediante tecnologías interoperables, económicas y de arquitectura abierta, priorizando estándares internacionales que aseguren la continuidad, escalabilidad y estabilidad del sistema en zonas de difícil acceso. Asimismo, se sugiere mejorar la infraestructura de comunicación entre medidores, concentradores y el sistema central, evitando pérdidas de conectividad que afecten la continuidad operativa. Finalmente, se recomienda promover la innovación tecnológica local, incentivando el desarrollo de prototipos, pruebas piloto y soluciones basadas en hardware y software de bajo costo que permitan reducir la dependencia de proveedores externos y fortalecer la autonomía tecnológica regional.
2. **Para el objetivo específico 1:** Respecto al proceso de medición y registro del consumo eléctrico, se recomienda continuar con la expansión del sistema AMI en los usuarios residenciales, priorizando sectores con medidores inaccesibles, deteriorados o con altos índices de reclamos por facturación. Asimismo, es conveniente establecer protocolos de calibración periódica de los medidores y sus sensores internos, garantizando la correcta medición de tensión, corriente, potencia y energía. Se recomienda además integrar plenamente las lecturas AMI con el sistema comercial SIELSE, permitiendo el registro automático y validado de lecturas para minimizar los errores humanos, los promedios y los reclamos por consumos incorrectos.
3. **Para el objetivo específico 2:** Respecto al control de pérdidas no técnicas, se recomienda incorporar herramientas de analítica avanzada y algoritmos de detección de anomalías dentro del sistema AMI para identificar patrones irregulares de consumo asociados a pérdidas no técnicas. Asimismo, se sugiere habilitar alarmas automáticas que alerten al personal técnico ante variaciones bruscas o interrupciones en la transmisión de datos, lo cual permitiría intervenciones más rápidas y precisas. Finalmente, se recomienda consolidar una base de datos histórica de eventos, fraudes y manipulaciones detectadas, con el fin de orientar estrategias de mitigación y mejorar los procesos de fiscalización.
4. **Para el objetivo específico 3:** Respecto a los procesos de corte y reconexión, se recomienda avanzar hacia la automatización total de estas operaciones mediante comandos remotos

ejecutados desde el sistema central, reduciendo la necesidad de desplazamiento físico del personal técnico. Se sugiere también implementar protocolos de confirmación doble (verificación técnica y administrativa) para asegurar la ejecución correcta de cada operación y evitar errores operativos. Adicionalmente, se recomienda llevar un registro digital detallado de cada evento de corte y reconexión (fecha, hora, duración, motivo y estado), lo cual facilitará la trazabilidad, auditorías internas y supervisión regulatoria.

5. **Para el objetivo específico 4:** Respecto al análisis técnico-económico, se recomienda realizar evaluaciones económicas periódicas sobre los costos de implementación, mantenimiento y operación del sistema AMI, comparándolos con los costos de los sistemas actuales que requieren visitas presenciales. Asimismo, se propone explorar la fabricación local de componentes (cajas, módulos auxiliares, prototipos educativos) o la adaptación de hardware comercial de bajo costo, con el fin de disminuir la dependencia de equipos importados y hacer más accesible su implementación. Finalmente, se sugiere desarrollar estudios comparativos entre zonas urbanas y rurales para identificar los escenarios donde la aplicación del AMI genera mayor retorno económico y valor agregado para usuarios y empresa.
6. **Complementariamente se recomienda:** Desarrollar interfaces de usuario más intuitivas y accesibles que permitan a los usuarios visualizar su consumo en tiempo real y recibir alertas sobre su suministro, contribuyendo a la autogestión energética. Asimismo, se sugiere incorporar sistemas de respaldo energético (baterías o UPS) en los medidores o concentradores para evitar pérdidas de conectividad durante cortes de energía. También se propone ampliar las evaluaciones hacia la integración del AMI con sistemas de generación distribuida, como paneles solares domiciliarios, para fomentar la gestión inteligente de la energía en los hogares. Finalmente, se recomienda fortalecer la capacitación técnica del personal de campo y administrativo, asegurando que cuenten con las competencias necesarias para operar, mantener y expandir sistemas AMI de manera eficiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acer. (2024). Acer Aspire 5 – Technical Specifications. Acer Perú.
- Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2017). *Fundamentals of electric circuits* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- AliExpress. (2025). Componentes electrónicos Tuya Wi-Fi y Home Assistant Green. <https://www.aliexpress.com>
- Alvarado, J., & Soto, P. (2021). Evaluación del desempeño de los concentradores de datos en sistemas AMI distribuidos. *Revista de Ingeniería Eléctrica y Comunicaciones*, 12(2), 55–64.
- Andrés G., A. R. (2013). Reducción de pérdidas en sistemas de transmisión y distribución: Beneficios económicos y ambientales. Universidad Nacional de La Plata. <http://kohatest.ing.unlp.edu.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=18874>
- Apoyo & Asociados. (2022). Sector Eléctrico Peruano. Reporte Sectorial – COESW. <https://www.aai.com.pe/wp-content/uploads/.2023/06/Sectorial-Sector-El%C3%A9ctrico-Dic-2022.pdf>
- Arias, F. (2006). El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica (5.^a ed.). Episteme.
- Bailón, J. (2021). Reducción de pérdidas de energía eléctrica mediante la implementación de un sistema de telemedición con concentrador digital en una subestación eléctrica de distribución aérea en baja tensión [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio institucional.
- Banco Mundial. (2022). Transmisión de energía eléctrica y pérdidas en la distribución (% de producción). <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.LOSS.ZS>
- Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). Getting started with Arduino (3rd ed.). Maker Media.
- Bernal, C. A. (2010). Metodología de la investigación: Administración, economía, humanidades y ciencias sociales (3.^a ed.). Pearson Educación.
- Cáceres, J., Mamani, D., & Apaza, P. (2022). Optimización de la eficiencia energética en los hogares con microred fotovoltaica piloto con tecnologías de medición inteligente en la ciudad del Cusco. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3), 1667-1681.
- Cahuana, L. (2020). Implementación del sistema de telemedición mediante la aplicación de la tecnología Two Way Automatic Communication System en el sistema eléctrico Combapata de Electro Sur Este S.A.A. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio institucional.
- Carrasco, D. (2016). Metodología de

- la investigación científica. Editorial San Marcos.
- CEPAL. (2024). Transformación digital y sostenibilidad energética en América Latina y el Caribe. https://conferenciaelac.cepal.org/9/sites/elac9/files/s2401013_es.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Chapman, S. J. (2012). *Electric machinery fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Chere Quiñónez, B., & Vélez Quiroz, A. (2021). Evaluación de modelos de microred eléctrica y su gestión energética: Análisis documental. *Dominio de las Ciencias*, 7(6), 949-960. <https://doi.org/10.23857/dc.v7i6.2374>
- Contrato N.º 055-2023 – ITECHENE PERÚ S.A.C. (2023). Suministro e implementación de sistema de medición avanzada (AMI) para Electro Sur Este S.A.A. Electro Sur Este S.A.A.
- Depuru, S. S. S. R., Wang, L., & Devabhaktuni, V. (2011). Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2736–2742.
- Doebelin, E. O., & Manik, D. N. (2011). *Measurement systems: Application and design* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Echeverría, J., & García, M. (2022). Medición avanzada inteligente: Retos al consumo responsable del servicio público domiciliario de energía en Colombia. *Revista de Ingeniería Energética*.
- Electro Sur Este S.A.A. (2017). Procedimientos técnico-comerciales de lectura, corte, reconexión y verificación de suministros eléctricos. Cusco, Perú.
- Electro Sur Este S.A.A. (2022). Licitación pública N° LP-010-2022-ELSE.
- Enel. (2024, abril 22). Medidores inteligentes. https://www.enel.com/es?utm_source=chatgpt.com
- Enerdata. (2023). Consumo energético total mundial 2022. <https://datos.enerdata.net>
- Falabella Perú. (2025). Laptops Intel Core i5 – Especificaciones y precios. <https://www.falabella.com.pe>
- Fan, Z., Kulkarni, P., Gormus, S., Efthymiou, C., Kalogridis, G., Sooriyabandara, M., Zhu, Z., Lambotharan, S., & Chin, W. H. (2013). Smart grid communications: Overview of research challenges, solutions, and standardization activities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1), 21–38.
- Galli, S., Scaglione, A., & Wang, Z. (2011). For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid. *Proceedings of the IEEE*, 99(6), 998–1027. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2109670>
- Ghayoor, F., & Ngcobo, T. J. (2022). An overview of DLMS/COSEM and G3-PLC for smart

- metering applications. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 15(1). <https://doi.org/10.2478/ijssis-2022-0011>
- Gómez López, J. M., Castán Luna, R., Montero Cervantes, J. C., Meneses Ruiz, J., & García Moreno, J. (2015). Aplicación de tecnologías de medición avanzada (AMI) como instrumento para reducción de pérdidas. *Boletín IIE*, 39(4), 180–191. https://www.researchgate.net/publication/297280966_Aplicacion_de_tecnologias_de_medicion_avanzada_AMI_como_instrumento_para_reduccion_de_perdidas
- Gómez, J. (2023). Diseño de sistemas IoT aplicados a la medición de energía eléctrica residencial. *Revista de Tecnología e Innovación*, 11(2), 45-58. <https://doi.org/10.1234/rti.112.2023>
- Gonen, T. (2014). *Electric power distribution engineering* (3rd ed.). CRC Press.
- Google Maps. (2023). Ubicación geográfica del distrito de San Sebastián (Cusco). <https://www.google.com/maps/.place/San+Sebastian>
- Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., & Hancke, G. P. (2011). Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4), 529–539. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2166794>
- Helfrick, A. D., & Cooper, W. D. (1990). *Modern electronic instrumentation and measurement techniques*. Prentice Hall.
- Home Assistant. (2024-2025). Módulos, instalación y documentación oficial de Home Assistant (versión OS y Green). <https://www.home-assistant.io>
- IBM. (2022). What is Advanced Metering Infrastructure? https://www.ibm.com/think/topics/advanced-metering-infrastructure?utm_source=chatgpt.com
- IEEE. (2020). *IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (IEEE Std 802.11-2020)*. IEEE Standards Association.
- IEEE. (2010). *IEEE Std 1459-2010: Definitions for the measurement of electric power quantities*.
- IEEE. (2010). *IEEE Std 1901-2010: Broadband over Power Line Networks*.
- IEC. (2003-2018). Normas IEC 60364, 61010, 61869, 62052-53 y 60884-1. International Electrotechnical Commission.
- IEC. (2017). *IEC 61869-2: Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers*.
- INACAL. (2015). NMP 021:2015 – Medidores de energía eléctrica: Procedimientos de prueba de aceptación en fábrica (FAT). Lima: INACAL.

- International Electrotechnical Commission. (2022). *IEC 62052-11: Electricity metering equipment – General requirements, tests and test conditions*. IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2016). *IEC 62053-11: Electricity metering equipment (AC) – Particular requirements – Electromechanical meters for active energy (classes 0.5, 1 and 2)*. IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2015). *IEC 62053-21: Electricity metering equipment (AC) – Particular requirements – Static meters for active energy (classes 1 and 2)*. IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2020). *IEC 62053-21: Electricity metering equipment (AC) – Particular requirements – Static meters for active energy*. IEC.
- Kabalci, E. (2016). *Smart grid and smart metering*. CRC Press.
- Kerlinger, F. N., & Lee, H. B. (2002). *Investigación del comportamiento: Métodos de investigación en ciencias sociales* (4.^a ed.). McGraw-Hill.
- Kurniawan, A. (2018). *Arduino Development Cookbook*. Packt Publishing.
- Lenovo. (2024). *IdeaPad 3i – Technical Specifications*. Lenovo Support.
- Li, X., Zhang, H., & Chen, Q. (2022). Integration of IoT-based energy metering devices in smart home systems. *Journal of Intelligent Systems*, 31(4), 455-468. <https://doi.org/10.1515/jisys-2022-0045>
- López Sal, J., & Rosas, P. (2023). *Diseño e implementación de un sistema de medición inteligente utilizando tecnología Wi-SUN para usuarios residenciales en la ciudad de Iquitos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio institucional.
- Mackay, S., Wright, E., Park, J., & Reynders, D. (2004). *Practical industrial data communications: Best practice techniques*. Newnes.
- Mahmood, A., Javaid, N., & Razzaq, S. (2015). A review of wireless communications for smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 248–260.
- Margolis, M. (2011). *Arduino Cookbook*. O'Reilly Media.
- Martínez, J., & Magallanes, R. (2023). *Implementación de un sistema de medición inteligente con tecnología G3-PLC para la distribuidora Electro Sur Este S.A.A. en la ciudad del Cusco* [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco].
- MINEM. (2023). *Gestión de pérdidas eléctricas en sistemas de distribución*. Ministerio de Energía y Minas del Perú.
- MINEM. (2022). *Guía operativa de gestión comercial del servicio eléctrico*. Ministerio de Energía y Minas del Perú.

- Ministerio del Ambiente del Perú. (2022). Infraestructura de medición avanzada: Intercambio de datos con medidores de energía. MINAM.
- Miranda, P. (2023). Modelo de telecomunicación para la gestión de medidores inteligentes de energía eléctrica [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco].
- Momoh, J. A. (2012). *Smart grid: Fundamentals of design and analysis*. Wiley.
- Monk, S. (2016). Programming Arduino: Getting started with sketches (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Muñoz Medina, A. (2021). Análisis de costos y beneficios para el despliegue de sistemas de medición inteligente en Lima Metropolitana [Tesis de pregrado, ESAN Graduate School of Business]. Repositorio institucional.
- Nabu Casa. (2024). Home Assistant Cloud and Automation Services. Nabu Casa Docs.
- Narciso Celestino, R. (2022). Sistema de medición inteligente de consumo eléctrico residencial utilizando una red de comunicación inalámbrica [Tesis de pregrado, Universidad de Ciencias y Humanidades]. Repositorio institucional.
- Nilsson, J. W., & Riedel, S. A. (2019). *Electric circuits* (11th ed.). Pearson.
- NIST. (2012). NIST Handbook 150 — Guidelines for Measurement Uncertainty. National Institute of Standards and Technology.
- Oppenheim, A. V., & Willsky, A. S. (1997). *Signals and systems* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). *Discrete-time signal processing* (3rd ed.). Prentice Hall.
- OSINERGMIN. (2013). *Procedimiento para la supervisión de contrastes de medidores de energía eléctrica*. OSINERGMIN.
- OSINERGMIN. (2021). Lineamientos para la supervisión de procesos técnico-comerciales en empresas distribuidoras. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
- OSINERGMIN. (2022). Manual de facturación y atención al usuario del servicio eléctrico. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
- OSINERGMIN. (2024). Informe anual de supervisión de la distribución eléctrica en el Perú. <https://www.osinergmin.gob.pe>
- OSIPTEL. (2024). Informe de cobertura 4G en el Perú. Organismo Supervisor de Telecomunicaciones.
- Quesada, J., Martínez, L., & Gómez, R. (2023). An electricity smart meter dataset of Spanish households: Insights into consumption patterns. Scientific Data. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02846-0>

- Ramos, J., Pérez, A., & Torres, L. (2023). Sistema de medición inteligente para monitoreo energético en viviendas utilizando tecnología IoT. *Revista Mexicana de Ingeniería*. <https://www.scielo.org.mx>
- RNE. (2021). Reglamento Nacional de Instalaciones Eléctricas. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú.
- Rodríguez, L., & Quispe, E. (2022). Diagnóstico del sistema de medición avanzada en redes de baja tensión: Caso Electro Sur Este S.A.A. [Tesis de licenciatura, UNSAAC].
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2022). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (7.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Salinas Vásquez, J., & Villanueva Villacorta, M. (2022). Diseño de un prototipo de medidor inteligente para análisis de calidad de energía en instalaciones industriales [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional.
- Torres Ccorahua, M. (2023). Implementación de medidores inteligentes en la red de distribución eléctrica de la ciudad del Cusco. UNSAAC.
- Tuya Developer. (2023–2024). Datasheets y manuales técnicos de módulos WB2S, WB3S y guías de integración con Home Assistant. Tuya IoT Development Platform. <https://developer.tuya.com>
- Tuya Smart. (2024). Smart Life App User Guide / Tuya IoT Developer Documentation. Tuya Developer Center. <https://developer.tuya.com>
- Tuya Smart. (2024). Smart WiFi Energy Meter with Clamp Sensor User Manual. Tuya Smart Energy Division. <https://www.tuya.com>
- Trilliant. (2019). [Título del reporte sobre sistemas AMI y comunicaciones G3-PLC].
- WASION. (2023). AMI Solution Overview. <http://wasion-meter.com/profile/ami-solution/174102/0/>
- ZTE Corporation. (2023). ZTE MF920V Mobile WiFi User Manual. ZTE Official Support.

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	METODOLOGÍA
¿De qué manera el diseño e implementación de un prototipo de medidor inteligente mejora las operaciones técnico-comerciales?	Diseñar e implementar un prototipo de medidor inteligente que permita mejorar las operaciones técnico-comerciales.	El diseño e implementación de un prototipo de medidor inteligente mejora las operaciones técnico-comerciales al optimizar la medición y registro del consumo eléctrico, los procesos de corte y reconexión y el control de pérdidas no técnicas.	Independiente: Prototipo de medidor inteligente Dependiente: Operaciones técnico - comerciales	Tipo: Aplicada Diseño: Cuasi - experimental Nivel: Cuasi - Experimental Enfoque: Cuantitativo Población: Usuarios regulados en baja tensión monofásicos. Muestra: Un usuario representativo bajo enfoque de estudio de caso Instrumentos: - Ficha de obs. técnica - Plataforma de monitoreo en línea - Ficha de registro de operaciones
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS		
¿De qué manera el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la medición y registro del consumo eléctrico?	Evaluar la mejora del diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente en la medición y registro del consumo eléctrico.	El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la exactitud y disponibilidad de las mediciones respecto al sistema convencional.		
¿De qué manera el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora el control de pérdidas no técnicas por hurtos o robos?	Evaluar la mejora del diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente en el control de pérdidas no técnicas (hurtos o robos).	El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la detección de pérdidas no técnicas mediante la detección automática de anomalías.		
¿De qué manera el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora la eficiencia de los procesos de corte y reconexión?	Evaluar la mejora del diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente en los procesos de corte y reconexión (por deuda).	El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente mejora el tiempo y los costos operativos al ejecutar cortes y reconexiones remotas.		
¿En qué medida el diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente es más económico en comparación con el Sistema AMI piloto?	Evaluar la diferencia del costo del prototipo de medidor inteligente en comparación con un sistema AMI piloto.	El diseño e implementación del prototipo de medidor inteligente es más económico en comparación con el Sistema AMI piloto.		

MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS	TÉCNICAS
VI: Prototipo de medidor inteligente	Un medidor inteligente es un dispositivo electrónico conectado a una red de comunicación que permite medir, registrar y transmitir en tiempo real el consumo de energía eléctrica, integrándose a sistemas de gestión y automatización doméstica (Cruz Eusébio, 2018; Pérez Acaro, 2019; García Vásquez, 2019).	Prototipo construido con módulos o sensores de bajo costo y de fácil conectividad, tales como módulo medidor de energía eléctrica, módulo de interruptor automático, sensor de presencia, módulo Wi-Fi, plataforma de monitoreo web y app para el registro y análisis del consumo eléctrico.	Medición de voltaje (V)	- Error relativo en la lectura de voltaje (%) - Precisión en la medición de voltaje (%) - Frecuencia de transmisión de datos (min.)	- Multímetro patrón (de referencia) - Registro digital del medidor inteligente (archivo CSV)	- Medición directa - Observación estructurada - Comparación experimental
			Medición de corriente (I)	- Error relativo en la lectura de corriente (%) - Precisión en la medición de corriente (%) - Frecuencia de transmisión de datos (min.)	- Multímetro patrón (de referencia) - Registro digital del medidor inteligente (archivo CSV)	- Medición directa - Observación estructurada - Comparación experimental
			Medición de potencia (kW)	- Error relativo en la lectura de la potencia (%) - Precisión en la medición de potencia (%) - Frecuencia de transmisión de datos (min.)	- Multímetro patrón (de referencia) - Registro digital del medidor inteligente (archivo CSV)	- Medición directa - Observación estructurada - Comparación experimental
			Medición de energía (kWh)	- Error relativo en la lectura de energía (%) - Precisión en la medición de energía (%)	- Multímetro patrón (de referencia) - Registro digital del medidor inteligente	- Medición directa - Observación estructurada - Comparación

				- Frecuencia de transmisión de datos (min.)	(archivo CSV)	experimental
			Costo del prototipo de medidor inteligente	- Costo total de implementación (S/.) - Relación costo-beneficio respecto a un medidor convencional (%)	- Ficha de costos del prototipo (materiales y componentes) - Cuadro comparativo de precios de mercado	- Análisis documental - Evaluación de costos - Comparación económica
VD: Operaciones técnico - comerciales	Las operaciones técnicas - comerciales comprenden los procesos que realiza la empresa eléctrica para registrar consumos, emitir facturas, controlar pérdidas no técnicas (como hurtos o robos) y gestionar cortes y reconexiones por morosidad en la relación con el usuario (García Vásquez, 2019; Saguma Aniceto, 2018; Évora, 2021).	Evaluación de los procesos técnico - comerciales con y sin el prototipo de medidor inteligente, mediante indicadores técnicos y parámetros eléctricos.	Medición y registro del consumo	- Porcentaje de lecturas automáticas correctas (%) - Disponibilidad de datos en tiempo real (sí/no)	- Historial de registros Home Assistant - Reportes Smart Life / Tuya Cloud	- Observación estructurada - Registro automatizado de datos
			Control de pérdidas no técnicas	- Energía acumulada (kWh) - Pérdida no técnica (si/no)	- Log de eventos de Home Assistant - Registro de incidencias técnicas	- Observación estructurada - Registro automatizado de datos
			Corte y reconexión del servicio en tiempo real	- Tiempo de ejecución (s) - Resultado de la ejecución éxito/falla)	- Registro de pruebas de control remoto - Bitácora de tiempos de respuesta	- Observación estructurada - Registro automatizado de datos

ANEXOS



Anexo 01: Primera etapa del medidor: Módulo principal, TC e interruptores



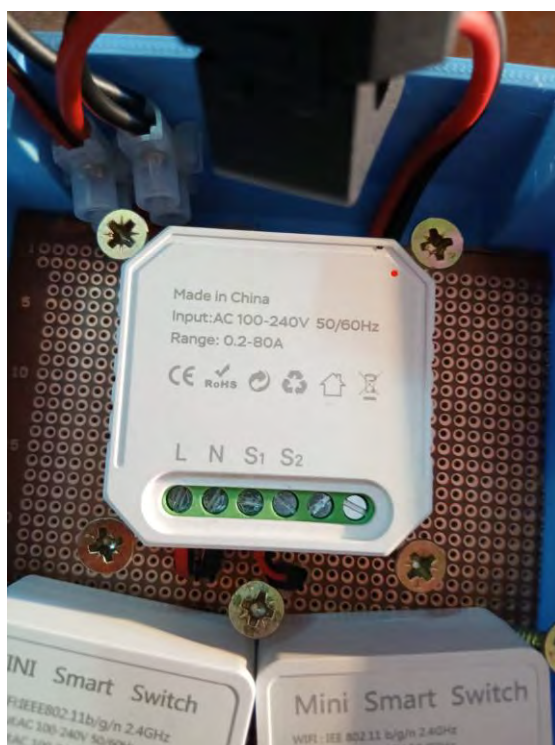
Anexo 02: Segunda etapa del medidor: Microcontrolador, cableado y adaptador



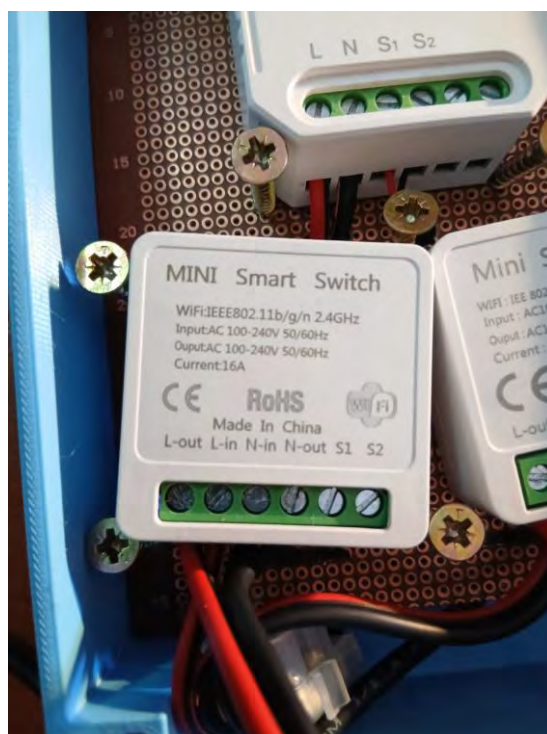
Anexo 03: Tercera etapa del medidor: Pantalla OLED, LED pulsador y LED de calidad



Anexo 04: Microcontrolador ESP32



Anexo 05: Módulo sensor de energía



Anexo 06: Interruptor automático para el circuito de luminarias



Anexo 07: Interruptor automático para el circuito de luminarias



Anexo 08: Interruptor termomagnético de protección



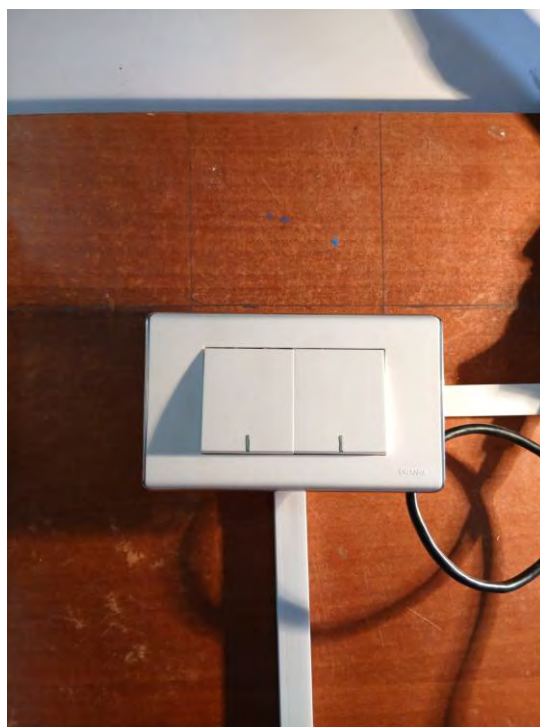
Anexo 09: Luminaria tipo LED



Anexo 10: Luminaria incandescente



Anexo 11: Tomacorriente doble sin tierra



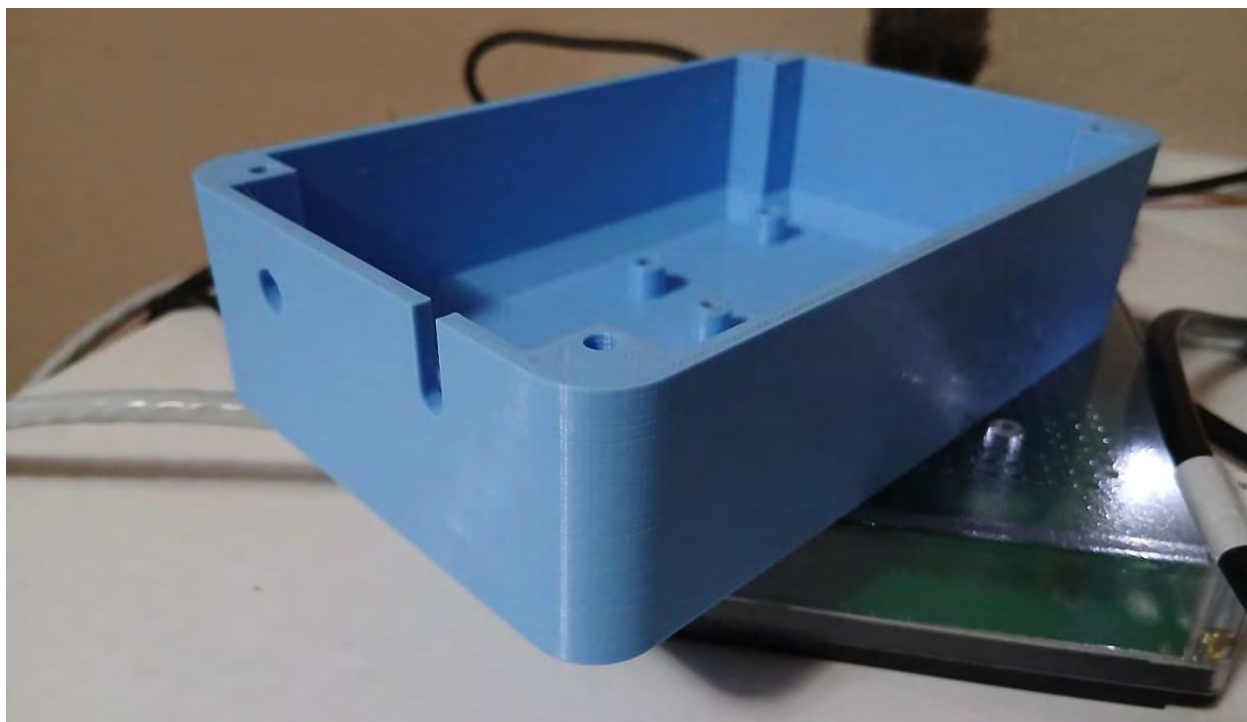
Anexo 12: Interruptor doble



Anexo 13: Proceso de conexionado eléctrico en el medidor inteligente



Anexo 14: Pinza amperimétrica empleada para medir magnitudes y validación



Anexo 15: Caja portamedidor impresa en 3D



Anexo 16: Proceso de instalación de componentes en el módulo experimental



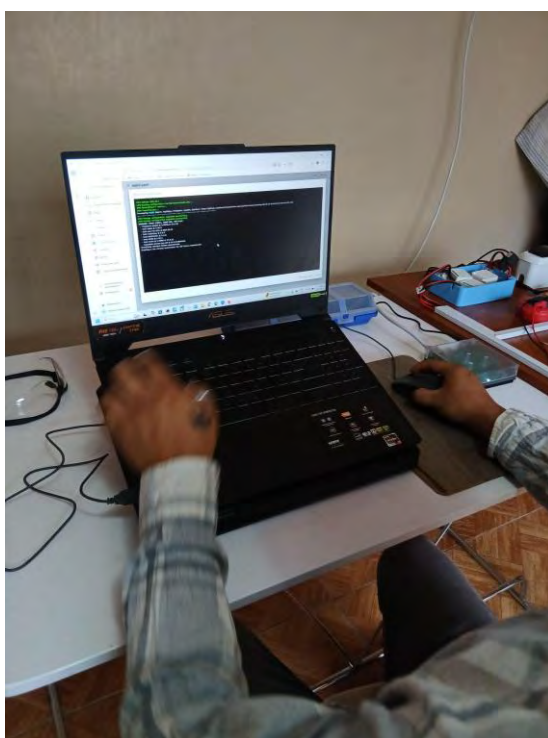
Anexo 17: Proceso de verificación de conexiones en el módulo experimental



Anexo 18: Proceso de energización del módulo experimental



Anexo 19: Proceso de pruebas de funcionamiento de instalaciones en el módulo experimental



Anexo 20: Proceso de programación de medidor inteligente para enlace con concentrador a pequeña escala



Anexo 21: Proceso de configuración del medidor inteligente y del concentrador a pequeña escala



Anexo 22: Vista general del prototipo de medidor inteligente y el prototipo de concentrador

Anexo 23: Código de programación completo para configurar y enlazar la plataforma Tuya o Smart Life con Home assistant mediante el microcontrolador ESP32:

esphome:

name: medidor_inteligente_tesis

friendly_name: Medidor Inteligente Tesis UNSAAC

esp32:

board: esp32devkit

framework:

type: arduino

wifi:

ssid: "WIFI"

password: "PASSWORD"

ap:

ssid: "Medidor-Backup"

password: "00000000"

captive_portal:

logger:

api:

ota:

mqtt:

broker: 999.999.9.999

username: mqtt_user

password: mqtt_pass

topic_prefix: tesis/.medidor

i2c:

sda: 21

scl: 22

scan: true

output:

- platform: gpio

pin: 2

id: led_wifi

- platform: gpio

pin: 4

id: led_pulso

binary_sensor:

- platform: gpio

pin:

number: 0

mode: INPUT_PULLUP

inverted: true

name: "Boton Reset Energia"

on_press:

then:

- sensor.integration.reset: energia_total

sensor:

- platform: adc

pin: 35

id: voltaje_raw

update_interval: 1second

- platform: template

name: "Voltaje RMS"

id: voltaje_rms

unit_of_measurement: V

update_interval: 1s

lambda: |-

*return id(voltaje_raw).state * 311.0; // Ajustar calibración real*

- platform: adc

pin: 34

id: corriente_raw

update_interval: 1s

- platform: ct_clamp

sensor: corriente_raw

name: "Corriente RMS"

id: corriente_rms

calibration: 80.0

unit_of_measurement: A

- platform: template

name: "Potencia Activa"

id: potencia_activa

unit_of_measurement: W

update_interval: 1s

lambda: |-

*return id(voltaje_rms).state * id(corriente_rms).state;*

- platform: integration

name: "Energia Total"

id: energia_total

sensor: potencia_activa

time_unit: h

unit_of_measurement: kWh

accuracy_decimals: 3

- platform: wifi_signal

name: "Calidad de WiFi"

id: wifi_rssi

update_interval: 10s

interval:

- interval: 5seconds

then:

- if:

condition:

lambda: 'return id(wifi_rssi).state > -60;'

then:

- output.turn_on: led_wifi

else:

- output.turn_off: led_wifi

interval:

- interval: 1second

then:

- if:

condition:

lambda: 'return id(potencia_activa).state > 0;'

then:

- output.turn_on: led_pulso

- delay: 50ms

- output.turn_off: led_pulso

display:

- platform: ssd1306_i2c

model: "SSD1306 128x64"

address: 0x3C

update_interval: 2second

lambda: |-

it.printf(0, 0, id(font1), "MEDIDOR TESIS");

it.printf(0, 15, id(font1), "V: %.1f V", id(voltaje_rms).state);

it.printf(0, 30, id(font1), "I: %.2f A", id(corriente_rms).state);

```
it.printf(0, 45, id(font1), "P: %.0f W", id(potencia_activa).state);  
it.printf(0, 60, id(font1), "E: %.3f kWh", id(energia_total).state);
```

font:

- *file:* "arial.ttf"

id: font1

size: 12