



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y DISEÑO DIGITAL
CARRERA DE TELEMÁTICA

Trabajo de Integración
Curricular previa la obtención
del Grado Académico de
Ingeniero en Telemática.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

**MONITOREO REMOTO PARA MAGNITUDES ELÉCTRICAS BASADOS EN
PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN DE INTERNET DE LAS COSAS**

AUTOR:

HERBAS MONTOYA LUIGGY ALEJANDRO

DIRECTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

ING. ÁNGEL IVÁN TORRES QUIJIJE, MSc.

QUEVEDO – LOS RÍOS – ECUADOR

2025



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **LUIGGY ALEJANDRO HERBAS MONTOYA**, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

LUIGGY ALEJANDRO HERBAS MONTOYA

C.I: 1207998277



CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. Ángel Iván Torres Quijije, MSc**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **Luiggy Alejandro Herbas Montoya**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado “**Monitoreo Remoto para Magnitudes Eléctricas Basados en Protocolos de Comunicación de Internet de las Cosas**”, previo a la obtención del título de Ingeniero en Telemática, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

Ing. Ángel Iván Torres Quijije, MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

El suscrito, **Ing. Ángel Iván Torres Quijije, MSc**, mediante el presente cumpla en presentar a usted, el informe de proyecto de Investigación titulado “**Monitoreo Remoto para Magnitudes Eléctricas Basados en Protocolos de Comunicación de Internet de las Cosas**” Presentado por el estudiante **Luiggy Alejandro Herbas Montoya**, egresado de la Carrera de **Telemática**, que fue revisado bajo mi dirección según resolución del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Computación y Diseño Digital, que se ha desarrollado de acuerdo al Reglamento de la Unidad de Integración Curricular de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y cumple con el requerimiento de análisis del sistema COMPILATIO el cual avala los niveles de originalidad en un 98% y similitud 2%, del trabajo investigativo. Valido este documento para que el estudiante siga con los trámites pertinentes, de acuerdo como lo establece el Reglamento.

**CERTIFICADO DE ANÁLISIS**
magister

PI_Luiggy Alejandro Herbas Montoya

2%
Textos
sospechosos



2% Similitudes
< 1 % similitudes entre comillas
< 1 % entre las fuentes
mencionadas
0% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: PI_Luiggy Alejandro Herbas Montoya.pdf
ID del documento: ef72d35fcb9b874dcfc24cebe35aa9d38e2f121f
Tamaño del documento original: 2,03 MB

Depositante: ANGEL IVAN TORRES QUIJJE
Fecha de depósito: 27/11/2025
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 27/11/2025

Número de palabras: 22.604
Número de caracteres: 176.660

Ing. Ángel Iván Torres Quijije, MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UTEQ

UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y DISEÑO DIGITAL

CARRERA DE TELEMÁTICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TÍTULO:

Monitoreo Remoto para Magnitudes Eléctricas Basados en Protocolos de Comunicación de Internet de las Cosas

Presentado al Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Computación y Diseño Digital, como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero en Telemática.

Aprobado por:

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Anthony Limber Moran Cabezas, MSc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, MSc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Diana Isabel Villacis Montoya, MSc.

QUEVEDO – LOS RÍOS – ECUADOR

2025

AGRADECIMIENTO

Con profunda gratitud, reconozco a quienes acompañaron y marcaron mi camino durante este proyecto. Cada uno aportó algo esencial para hacerlo realidad.

En primer lugar, agradezco a Dios por ser mi guía, darme serenidad en las dificultades y permitirme llegar a esta meta con firmeza y esperanza.

A mis padres, Marisol Montoya y Miguel Herbas, quienes han sido mi mayor soporte y mi motivo más grande. Gracias por su confianza y por enseñarme que el esfuerzo siempre lleva lejos. Este logro es fruto de los valores que me inculcaron desde niño.

A mi familia, por su apoyo constante, y en especial a mis hermanos Jhonnathan Herbas y Miguel Herbas cuyo deseo de verme lograr lo que ellos no pudieron se convirtió en una de mis mayores motivaciones. Este logro es también de ustedes.

A mi enamorada, Nayla Vargas por ser un apoyo incondicional en cada etapa de este proceso. Tus palabras, tu cariño y tu confianza en mí llegaron siempre en el momento justo, dándome la fuerza que a veces me faltaba.

A mis amigos, que hicieron de este proceso algo más llevadero. Gracias por escucharme, por su apoyo incondicional, por hacer que el camino fuera más ligero.

A mi director de tesis, Ing. Ángel Iván Torres Quijije por compartir su conocimiento, orientación y criterio profesional. Sus observaciones precisas y su dedicación contribuyeron decisivamente al desarrollo de este trabajo y a mi crecimiento académico.

Finalmente, A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, a sus docentes y al personal que forma parte de esta institución, por brindarme un ambiente de aprendizaje que me permitió fortalecer mis habilidades y descubrir nuevas perspectivas dentro de mi formación profesional.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con todo mi corazón a Dios, por ser mi guía y fortaleza constante.

A mis padres, por su amor incondicional, por su apoyo constante y por ser el pilar fundamental de mi vida. Este logro es un reflejo de su dedicación.

A mi familia, por su apoyo constante y por siempre estar allí en los momentos más difíciles, impulsándome a seguir adelante.

A mi enamorada, por su apoyo incondicional, por su confianza y por darme la fuerza necesaria en cada etapa de este proceso.

A mis amigos, por su amistad, por el apoyo sincero y por hacer más llevadero este proceso.

A mis profesores, por su dedicación, enseñanzas y por contribuir con su sabiduría en el desarrollo de este trabajo.

A todos los que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este proyecto, por su apoyo y enseñanzas, y por ayudarme a alcanzar este logro.

¡Gracias!

RESUMEN Y PALABRAS CLAVES

Este proyecto de investigación se enfoca en el desarrollo de un sistema de monitoreo remoto de magnitudes eléctricas mediante tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), con el propósito de visualizar en tiempo real el comportamiento operativo del sistema fotovoltaico instalado en el invernadero ecológico del campus “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. La zona presenta un uso limitado de herramientas tecnológicas para el seguimiento de instalaciones solares, lo que dificulta conocer cómo varían las magnitudes eléctricas durante la operación diaria, especialmente en aplicaciones agrícolas. Ante esta necesidad, se plantea una solución basada en IoT que permita acceder de forma remota a las mediciones generadas por el dispositivo industrial MT61GP, facilitando la visualización continua de variables como voltaje, corriente, potencia y energía consumida. La metodología desarrollada incluyó el levantamiento técnico del sistema fotovoltaico, la integración del medidor con sistemas embebidos encargados de la transmisión de datos hacia la nube y la construcción de una interfaz web para su consulta en tiempo real. Los resultados obtenidos muestran que el sistema implementado permite observar de manera clara y continua el comportamiento eléctrico del invernadero, evidenciando variaciones típicas durante el funcionamiento de las bombas de riego y fertirriego. La visualización remota de estas magnitudes eléctricas constituye un aporte relevante para la supervisión operativa del sistema, al permitir un seguimiento más preciso de su comportamiento bajo condiciones reales. Se recomienda aplicar este tipo de soluciones en otras instalaciones fotovoltaicas de la región, fomentando el uso de tecnologías IoT para mejorar la supervisión de sistemas energéticos y apoyar iniciativas orientadas a la adopción de energías renovables en Ecuador.

Palabras clave: Monitoreo remoto, Arquitectura IoT, Comunicación industrial, Sistemas fotovoltaicos, Sistemas embebidos.

ABSTRACT AND KEYWORDS

This research project focuses on the development of a remote monitoring system for electrical magnitudes through Internet of Things (IoT) technologies, with the purpose of visualizing in real time the operational behavior of the photovoltaic system installed in the ecological greenhouse at the “La María” campus of the Technical State University of Quevedo. The area presents limited technological tools for monitoring solar installations, which makes it difficult to understand how electrical magnitudes vary during daily operation, especially in agricultural applications. To address this need, an IoT-based solution is proposed to remotely access the measurements generated by the industrial MT61GP device, enabling continuous visualization of variables such as voltage, current, power, and energy consumption. The methodology included the technical assessment of the photovoltaic system, the integration of the meter with Embedded systems responsible for data transmission to the cloud, and the development of a web interface for real-time consultation. The results show that the implemented system allows clear and continuous observation of the electrical behavior of the greenhouse, revealing typical variations during the operation of the irrigation and fertigation pumps. Remote visualization of these electrical magnitudes provides a valuable contribution to the operational supervision of the system, allowing for a more accurate understanding of its performance under real conditions. It is recommended to apply this type of solution in other photovoltaic installations in the region, promoting the use of IoT technologies to improve the supervision of energy systems and support initiatives aimed at the adoption of renewable energy in Ecuador.

Keywords: Remote monitoring, IoT architecture, Industrial communication, Photovoltaic systems, Embedded systems.

ÍNDICE

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	ii
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	iii
CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO	iv
CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA	vii
RESUMEN Y PALABRAS CLAVES	viii
ABSTRACT AND KEYWORDS	ix
CÓDIGO DUBLIN	xix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	3
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	4
1.2. Diagnóstico	5
1.3. Pronóstico	5
1.4. Formulación del problema	6
1.5. Sistematización del problema	6
1.6. Objetivos.....	6
1.6.1. Objetivo general	6
1.6.2. Objetivos específicos.....	6
1.7. Justificación	7
CAPÍTULO II	8
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	8
2.1. Marco Conceptual.....	9

2.1.1. Energía solar.....	9
2.1.1.1 Paneles solares.....	9
2.1.1.2 Funcionamiento de un panel solar.....	9
2.1.1.3 Tipos de paneles solares.....	9
2.1.2. Magnitudes eléctricas.....	10
2.1.2.1 Tensión.....	10
2.1.2.1.1 Tensión de fase.....	11
2.1.2.2 Intensidad de corriente eléctrica.....	11
2.1.2.3 Resistencia eléctrica.....	11
2.1.2.4. Potencia eléctrica.....	12
2.1.2.4.1. Potencia activa.....	12
2.1.2.4.2 Potencia reactiva.....	13
2.1.2.4.3 Potencia aparente.....	13
2.1.2.5 Energía activa.....	14
2.1.2.6 Frecuencia eléctrica.....	14
2.1.2.7 Factor de potencia.....	14
2.1.3 Topologías de los sistemas eléctricos.....	15
2.1.3.1 Sistema monofásico.....	15
2.1.3.2 Sistema de fase dividida.....	16
2.1.3.3 Sistema trifásico.....	16
2.1.4. Internet de las Cosas.....	17
2.1.4.1 Funcionamiento del Internet de las Cosas.....	17
2.1.4.2 Arquitectura del Internet de las Cosas.....	17
2.1.4.2.1. Capa de percepción (Capa física).....	18
2.1.4.2.2. Capa de red.....	18
2.1.4.2.3. Capa de aplicación.....	18
2.1.4.3 Aplicaciones del IoT en sistemas fotovoltaicos.....	18

2.1.5. Monitoreo remoto.....	18
2.1.6. Protocolos de comunicación.....	19
2.1.6.1. SPI (Interfaz Periférica Serial)	19
2.1.6.2. UART (Receptor/Transmisor Asíncrono Universal).....	20
2.1.6.3. HTTP (Protocolo de Transferencia de Hipertexto)	20
2.1.6.4. Modbus RTU (Unidad Terminal Remota).....	20
2.1.6.4.1 Estructura de una trama Modbus RTU	20
2.1.7. Interfaz de comunicación	21
2.1.7.1. Interfaz física de comunicación (RS-232)	21
2.1.7.2. Interfaz física de Comunicación (RS-485)	21
2.1.8. Transmisión de datos en tiempo real.....	22
2.1.9. Eficiencia energética	22
2.2. Marco referencial	22
2.3. Marco Legal	25
CAPÍTULO III	27
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	27
3.1. Localización.....	28
3.2. Tipo de Investigación.....	28
3.2.1. Investigación cuantitativa.....	28
3.2.2. Investigación descriptiva.....	28
3.2.3. Investigación aplicada	29
3.3. Métodos de Investigación	29
3.3.1. Método de observación	29
3.3.2. Método analítico.....	29
3.3.3. Método inductivo	29
3.4. Fuentes de recolección de información.....	30
3.5. Diseño de la investigación	30

3.5.1. Diseño no experimental.....	30
3.5.2. Fases de investigación.....	31
3.6. Recursos y materiales	32
3.6.1 Herramientas y tecnologías utilizadas.....	33
3.6.2. Recursos de hardware.....	33
CAPÍTULO IV	35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1. Levantamiento y Análisis de la situación actual del sistema fotovoltaico	36
4.1.1. Descripción del entorno y aplicación del sistema	36
4.1.2 Componentes y esquema del sistema fotovoltaico actual	36
4.1.2.1 Generación.....	36
4.1.2.1.1. Paneles solares	37
4.1.2.1.2. Arreglo fotovoltaico.....	37
4.1.2.2. Control y almacenamiento.....	39
4.1.2.2.1. Banco de baterías.....	39
4.1.2.2.2. Inversor.....	40
4.1.2.3. Cargas	41
4.1.2.3.1. Tablero de control	41
4.1.2.3.2. Bombas	41
4.1.3. Datos eléctricos y energéticos del sistema	42
4.1.4. Verificación de Dispositivo MT61GP.....	43
4.1.5. Análisis de las magnitudes eléctricas del sistema	45
4.1.5.1. Suministro Eléctrico	45
4.1.5.2. Rendimiento energético	45
4.1.5.3. Identificación de la configuración eléctrica del sistema.....	46
4.1.6. Patrones de comportamiento del sistema	47
4.1.6.1. Patrón de consumo	47

4.1.6.2. Patrón de generación	48
4.1.6.3. Balance de carga entre generación y consumo	49
4.1.7. Discusión	49
4.2. Diseño del sistema de monitoreo	50
4.2.1. Arquitectura de comunicación IoT	50
4.2.1.1. Capa de Percepción	51
4.2.1.2. Capa de Red	51
4.2.1.3. Capa de Aplicación	52
4.2.2. Diseño de hardware	52
4.2.2.1. Selección de tecnologías	52
4.2.2.2. Esquema de conexión del sistema electrónico	54
4.2.2.3. Interfaz física de comunicación	55
4.2.3. Diseño de la PCB	55
4.2.3.1. Esquemático del circuito	56
4.2.3.2. Enrutamiento y consideraciones de diseño	57
4.2.3.3. Validación del diseño (DRC y ERC)	57
4.2.4. Ensamblaje del sistema de monitoreo	58
4.2.4.1. Proceso de ensamblaje de componentes	58
4.2.4.2. Pruebas de funcionalidad del hardware	59
4.2.5. Implementación en el invernadero ecológico	59
4.2.6. Discusión	60
4.3. Visualización de datos en la interfaz web	61
4.3.1. Infraestructura de datos	61
4.3.1.1. Selección de base de datos en la nube	62
4.3.1.2. Estructura de datos en Firebase	63
4.3.2. Tecnologías de desarrollo de la aplicación web	64
4.3.2.1. Selección de tecnología para la interfaz de usuario	64

4.3.2.2. Selección de Tecnología para el servidor (Backend)	65
4.3.3. Implementación del sistema de autenticación	67
4.3.3.1. Desarrollo del módulo de login	67
4.3.3.2. Gestión de sesiones y seguridad	68
4.3.4. Desarrollo del dashboard principal	69
4.3.4.1. Visualización de datos en tiempo real	69
4.3.4.2. Historial de datos y generación de reportes	70
4.3.4.3. Interfaz de visualización de parámetros eléctricos	71
4.3.5. Discusión	72
CAPÍTULO V	73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
5.1. Conclusiones	74
5.2 Recomendaciones	75
CAPÍTULO VI	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
6.1 Bibliografía	77
CAPÍTULO VII	85
ANEXOS	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recursos a nivel de software utilizados en el proyecto	33
Tabla 2. Recursos de hardware utilizados en el proyecto.....	34
Tabla 3. Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico ORION PV008	37
Tabla 4. Especificaciones técnicas del arreglo fotovoltaico total.....	38
Tabla 5. Características técnicas del inversor híbrido para sistema fotovoltaico	40
Tabla 6. Especificaciones técnicas de las bombas centrífugas	42
Tabla 7. Resumen de datos energéticos y tensión de fase del sistema fotovoltaico.....	43
Tabla 8. Especificaciones técnicas del dispositivo MT61GP	44
Tabla 9. Resumen de parámetros eléctricos y operativos observados.....	45
Tabla 10. Evidencia de configuración monofásica de tres hilos (Fase dividida)	47
Tabla 11. Caracterización del transitorio de corriente de carga	48
Tabla 12. Análisis del evento de carga	49
Tabla 13. Comparación de sistemas embebidos para el sistema de monitoreo.	53
Tabla 14. Comparación de bases de datos en la nube.	62
Tabla 15. Comparación de tecnologías para la interfaz de usuario	64
Tabla 16. Comparación de Tecnologías para el Backend	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema monofásico	15
Figura 2. Sistema de fase dividida.....	16
Figura 3. Sistema trifásico	16
Figura 4. Arquitectura de tres capas basada en Internet de las Cosas	17
Figura 5. Ubicación del invernadero ecológico del campus "La María"	28
Figura 6. Diagrama del sistema fotovoltaico existente.....	36
Figura 7. Vista del arreglo fotovoltaico instalado	37
Figura 8. Esquema de la configuración eléctrica del arreglo fotovoltaico.	38
Figura 9. Diagrama del banco de baterías	39
Figura 10. Banco de baterías del sistema fotovoltaico utilizado para almacenamiento de energía	39
Figura 11. Inversor híbrido instalado en el sistema fotovoltaico	40
Figura 12. Tablero de control	41
Figura 13. Dispositivo MT61GP.	44
Figura 14. Mediciones de voltaje eficaz del sistema de fase dividida.....	46
Figura 15. Corriente por fase durante el arranque de carga.....	48
Figura 16. Arquitectura de comunicación IoT.....	51
Figura 17. Diagrama del circuito del dispositivo	54
Figura 18. Cableado de conexión al dispositivo MT61GP.....	55
Figura 19. Diagrama lógico del dispositivo	56
Figura 20. Enrutamiento de la PCB del sistema de monitoreo.....	57
Figura 21. Proceso de ensamblaje del dispositivo	58
Figura 22. Implementación del prototipo en el invernadero	60
Figura 23. Estructura del almacenamiento en Firebase	63
Figura 24. Interfaz de inicio de sesión de la plataforma.....	68
Figura 25. Interfaz del panel de control con menú de navegación	69
Figura 26. Historial de datos con funcionalidad de generación de reportes.....	70
Figura 27. Interfaz de visualización con gráfico interactivo	71

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Tensión eléctrica.....	10
Ecuación 2: Sistema trifásico equilibrado	11
Ecuación 3: Intensidad de corriente.....	11
Ecuación 4: Resistencia eléctrica	12
Ecuación 5: Potencia eléctrica.....	12
Ecuación 6: Potencia activa.....	12
Ecuación 7: Potencia reactiva.....	13
Ecuación 8: Potencia aparente.....	13
Ecuación 9: Energía activa	14
Ecuación 11: Factor de potencia.....	15

CÓDIGO DUBLIN

Título:	Monitoreo Remoto para Magnitudes Eléctricas Basados en Protocolos de Comunicación de Internet de las Cosas.		
Autor:	Luiggy Alejandro Herbas Montoya		
Palabras claves:	Monitoreo remoto	Arquitectura IoT	Comunicación industrial
	Sistemas fotovoltaicos		Sistemas embebidos
Fecha de publicación:			
Editorial:	Quevedo- UTEQ, 2025		
Resumen:	La presente investigación desarrolla un sistema de monitoreo remoto para visualizar magnitudes eléctricas en un sistema fotovoltaico mediante tecnologías IoT. El estudio tuvo lugar en el invernadero ecológico del campus “La María”, utilizando dispositivo industrial para registrar las magnitudes eléctricas. Los datos llegan a una plataforma digital a través de una arquitectura de comunicación basada en sistemas embebidos y protocolos IoT, lo que permite su consulta en tiempo real. La ausencia de un mecanismo de visualización remota dificultaba el seguimiento del comportamiento eléctrico; con la solución implementada, la información está disponible de forma continua bajo condiciones reales del invernadero. Esta propuesta demuestra que la adopción de tecnologías IoT mejora la supervisión operativa del sistema fotovoltaico y facilita el acceso a información energética en entornos con baja tecnificación.		
Abstract:	This research develops a remote monitoring system to visualize electrical magnitudes in a photovoltaic system using IoT technologies. The study was carried out in the ecological greenhouse of the “La María” campus, employing an industrial device to record the electrical parameters. The data are delivered to a digital platform through a communication architecture based on embedded systems and IoT protocols, enabling real-time access. The absence of a remote visualization mechanism previously hindered continuous monitoring of the electrical behavior; with the implemented solution, the information is now available continuously under the greenhouse’s real operating conditions. This proposal demonstrates that the adoption of IoT technologies improves the operational supervision of the photovoltaic system and facilitates access to energy information in low-technification environments.		
Descripción:	106 hojas: dimensiones, 29 x 21 cm + CD-ROM 6162		
URI:			

INTRODUCCIÓN

El monitoreo eficiente de los sistemas de energía solar es esencial para maximizar su rendimiento y apoyar la transición hacia fuentes más limpias. Según el *World Energy Outlook 2024* de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), se proyecta que la energía solar fotovoltaica representará más del 30 % de la generación eléctrica mundial para 2050 [1]. En 2024, la capacidad instalada global alcanzó los 593 GW, con China superando los 300 GW e India creciendo por su alta irradiación solar, superior a 5 kWh/m²/día. Este crecimiento plantea nuevos desafíos, donde el monitoreo remoto resulta crucial para supervisar el funcionamiento y mejorar la gestión de las instalaciones solares [2].

En América Latina, Brasil y México lideran el crecimiento del sector solar. Según el Panorama Energético de América Latina y el Caribe de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), Brasil lidera la región con 24.079 MW de capacidad instalada en 2022, mientras que México llegó a 9.026 MW. Ambos países, con altos niveles de irradiación solar y son claves en la adopción de energía solar fotovoltaica en la región. Este crecimiento resalta la necesidad de sistemas de monitoreo remoto para optimizar la eficiencia y operación de las instalaciones solares [3].

Ecuador posee un gran potencial solar, con una irradiación promedio de 4.5 kWh/m²/día en varias regiones, según el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) [4]. En zonas de altura como Quito, Ibarra, Riobamba y Ambato, la radiación puede alcanzar hasta 5.8 kWh/m²/día, mientras que Guayaquil y Cuenca registran entre 4.65 y 4.8 kWh/m²/día, ofreciendo más de cinco horas de sol útil diario [5]. Estas condiciones favorecen la instalación de sistemas fotovoltaicos con tecnologías de monitoreo remoto, permitiendo una gestión más eficiente de la energía, la reducción de costos operativos y un aprovechamiento más sostenible de los recursos disponibles.

La presente investigación se orienta al monitoreo remoto de magnitudes eléctricas asociadas al sistema fotovoltaico instalado en el invernadero ecológico del campus “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Para ello, se emplea un dispositivo de medición industrial (MT61GP) junto con una arquitectura IoT que permite transmitir y visualizar en tiempo real las magnitudes eléctricas. El proyecto se enfoca en habilitar una visualización continua del comportamiento eléctrico del sistema, facilitando un seguimiento más preciso de su operación bajo las condiciones reales de funcionamiento del invernadero.

El proyecto busca demostrar que la visualización remota de magnitudes eléctricas mediante tecnologías IoT constituye una herramienta útil para comprender el comportamiento operativo de sistemas fotovoltaicos en entornos reales. La solución desarrollada permite acceder en tiempo real a estas magnitudes, facilitando un seguimiento más preciso del funcionamiento del sistema instalado en el invernadero del campus “La María”. Con ello, se aporta una alternativa accesible para mejorar la supervisión de sistemas solares en Ecuador y fortalecer la adopción de tecnologías orientadas al uso eficiente de energías renovables.

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La energía solar es fundamental para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y facilitar la transición hacia sistemas energéticos sostenibles. Sin embargo, un desafío sigue siendo la eficiencia en la gestión y monitoreo de los sistemas solares fotovoltaicos. Según la (IEA) [1], la capacidad global de energía solar fotovoltaica creció un 20% en 2020, tendencia que se ha mantenido hasta la actualidad. A pesar de este crecimiento, la optimización del rendimiento sigue siendo un reto, especialmente debido a la falta de sistemas de monitoreo en tiempo real basados en Internet de las Cosas (IoT).

A nivel global, los sistemas solares fotovoltaicos enfrentan una adopción limitada de tecnologías avanzadas para la recolección de datos en tiempo real. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)[6], muchos países carecen de normativas estandarizadas para implementar eficazmente tecnologías de monitoreo solar. En América Latina, solo el 30% de las instalaciones solares utilizan tecnologías avanzadas de monitoreo, según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) [7]. Esta falta de sistemas adecuados para recolectar datos en tiempo real limita el aprovechamiento de la energía solar, especialmente en las zonas rurales.

En Ecuador, especialmente en comunidades rurales aisladas, el bajo nivel de tecnificación en los sistemas solares limita significativamente su eficiencia y sostenibilidad. Según un estudio publicado en *Sustainability* [8], menos del 35 % de los sistemas fotovoltaicos instalados cuenta con monitoreo remoto o tecnologías de supervisión adecuadas, lo que impide detectar fallos y mantener una producción constante. Además, se identifican obstáculos económicos, falta de capacitación técnica y escasa conectividad, factores que restringen la adopción de soluciones avanzadas y comprometen el acceso equitativo a la energía renovable entre zonas urbanas y rurales.

La falta de sistemas de monitoreo de magnitudes eléctricas en instalaciones fotovoltaicas limita la eficiencia y reduce la posibilidad de analizar el comportamiento energético. La ausencia de supervisión continua impide contar con datos confiables sobre variables fundamentales como tensión, corriente y potencia [9]. Sin herramientas de monitoreo también resulta difícil optimizar el consumo y evaluar el rendimiento global del sistema [2]. Estos antecedentes confirman que la falta de supervisión eléctrica justifica la implementación de un sistema IoT en el invernadero de la UTEQ, con el fin de asegurar un control detallado y en tiempo real de las magnitudes eléctricas.

1.2. Diagnóstico

En Ecuador, aunque existe un alto potencial de generación fotovoltaica, especialmente en zonas rurales, la mayoría de las instalaciones solares no cuenta con sistemas de monitoreo remoto. Esto limita el seguimiento en tiempo real de parámetros eléctricos clave como tensión, corriente y potencia. Las principales barreras son la falta de protocolos de comunicación estandarizados, el acceso limitado a tecnología y la escasa capacitación técnica, lo que reduce la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta ante fallos.

En el invernadero ecológico del campus “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), el sistema fotovoltaico funciona con supervisión manual, sin integración de tecnologías IoT para el registro automático de magnitudes eléctricas. Esta limitación impide una gestión energética eficiente y la identificación temprana de fluctuaciones en el rendimiento del sistema. Además, la ausencia de monitoreo remoto dificulta el análisis continuo de datos que permitiría optimizar la operación de las bombas eléctricas utilizadas para riego y fertirriego, reduciendo así el aprovechamiento total del recurso solar disponible.

1.3. Pronóstico

En Ecuador, la implementación de tecnologías de monitoreo remoto basadas en Internet de las Cosas (IoT) crecerá con el avance de la infraestructura tecnológica y el respaldo de políticas públicas orientadas a la sostenibilidad energética. La integración de estas plataformas en sistemas solares permitirá una gestión más eficiente, detección temprana de fallos y reducción de costos operativos. El acceso a datos en tiempo real mejorará la toma de decisiones técnicas y la confiabilidad de las instalaciones, facilitando la expansión de soluciones energéticas renovables en zonas rurales.

En el invernadero ecológico del campus “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), la incorporación de monitoreo remoto permitirá optimizar el uso del sistema fotovoltaico. El análisis continuo de voltaje, corriente y potencia facilitará un control más preciso sobre el funcionamiento de las bombas utilizadas en riego y fertirriego. Esta mejora impulsará un manejo energético más eficiente, orientado a prácticas agrícolas sostenibles y al aprovechamiento pleno del recurso solar disponible en el entorno académico.

1.4. Formulación del problema

¿Cómo monitorear las magnitudes eléctricas de los paneles solares utilizando protocolos de comunicación de Internet de las Cosas (IoT) para mejorar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en Ecuador, considerando las barreras técnicas, económicas e infraestructurales presentes en el país?

1.5. Sistematización del problema

- ¿Cuáles son las magnitudes eléctricas más relevantes que deben ser monitoreadas en los paneles solares para optimizar su rendimiento?
- ¿Qué se requiere para lograr la transmisión en tiempo real de las magnitudes eléctricas del sistema fotovoltaico y superar las limitaciones del monitoreo manual actual?
- ¿Cómo se puede visualizar en tiempo real los datos de las magnitudes eléctricas en los sistemas fotovoltaicos del invernadero?

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Monitorear magnitudes eléctricas en tiempo real, basados en arquitectura de Internet de las Cosas en los sistemas fotovoltaicos del invernadero ecológico del campus “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

1.6.2. Objetivos específicos

- Analizar la situación actual sobre las magnitudes eléctricas que intervienen en los paneles solares observando patrones de comportamiento para la optimización del sistema.
- Diseñar un sistema de comunicación basado en el Internet de las Cosas para la transmisión a tiempo real de las magnitudes eléctricas que intervienen en el sistema fotovoltaico.
- Visualizar los datos recopilados de las magnitudes eléctricas obtenidas del sistema de monitoreo mediante una interfaz web facilitando su interpretación y análisis en tiempo real.

1.7. Justificación

La implementación de sistemas de monitoreo remoto basados en Internet de las Cosas (IoT) en instalaciones fotovoltaicas permite disponer de información en tiempo real sobre magnitudes eléctricas como voltaje, corriente y potencia. Contar con estos datos facilita un seguimiento continuo del comportamiento del sistema, lo que contribuye a una supervisión más precisa y a una mejor comprensión de su funcionamiento bajo condiciones reales. Esta disponibilidad inmediata de información resulta especialmente útil en entornos donde no existe un mecanismo de visualización constante[10].

La selección adecuada de protocolos de comunicación es esencial para garantizar la transmisión fiable de los datos generados por el sistema fotovoltaico hacia la plataforma de visualización. El uso de protocolos industriales y mecanismos de comunicación estables permite enviar la información en tiempo real y mantener la continuidad del monitoreo, incluso en ambientes como el invernadero, donde existen cargas que generan interferencias. Contar con una comunicación consistente mejora la supervisión operativa del sistema, al asegurar que los valores eléctricos estén disponibles de manera permanente para su consulta.[11].

En este proyecto, los valores eléctricos se registran directamente desde el medidor industrial y se almacenan en una plataforma digital de acceso remoto. Esta estructura garantiza la disponibilidad continua de la información y permite visualizar el comportamiento eléctrico del sistema bajo condiciones reales. Investigaciones en Ecuador destacan que la integración de dispositivos de medición con plataformas digitales contribuye a mejorar la supervisión y el seguimiento de instalaciones solares, al proporcionar información confiable y accesible para la toma de decisiones operativas [12].

Este proyecto contribuye a mejorar la eficiencia energética en Ecuador mediante la integración de tecnologías de monitoreo remoto para sistemas solares fotovoltaicos. Mediante IoT se proporcionarán datos en tiempo real que faciliten la gestión y la evaluación del rendimiento de las instalaciones, favoreciendo un uso más informado de la energía renovable. El invernadero ecológico del campus “La María” es un entorno ideal para la implementación, pues requiere supervisión precisa de los sistemas de riego y fertirriego. La solución propuesta servirá como modelo replicable para otras instalaciones rurales, aportando evidencia práctica y herramientas para la toma de decisiones.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco Conceptual

2.1.1. Energía solar

La energía solar es la radiación electromagnética emitida por el sol que puede ser aprovechada para producir energía eléctrica, energía térmica o energía mecánica. Esta fuente de energía renovable es limpia, abundante y no genera contaminación. Se puede capturar principalmente a través de sistemas fotovoltaicos (paneles solares) o mediante colectores solares térmicos. En las últimas décadas, el uso de la energía solar ha crecido considerablemente gracias a los avances tecnológicos en eficiencia y reducción de costos, así como al impulso global hacia las energías renovables [13].

2.1.1.1 Paneles solares

Los paneles solares, también conocidos como módulos fotovoltaicos, son dispositivos diseñados para convertir directamente la energía de la radiación solar en energía eléctrica, mediante el fenómeno conocido como efecto fotovoltaico. Este proceso ocurre en materiales semiconductores, y representa una solución energética limpia, renovable y cada vez más accesible. Su implementación ha cobrado relevancia en la transición energética global, tanto para sistemas conectados a red como para soluciones autónomas en zonas rurales o de difícil acceso [14].

2.1.1.2 Funcionamiento de un panel solar

El funcionamiento de un panel solar se basa en la absorción de fotones provenientes del sol por parte de un material semiconductor, como el silicio. Cuando los fotones impactan el semiconductor, transfieren su energía a los electrones, que se liberan de los átomos y generan una corriente eléctrica continua. Esta corriente puede ser usada directamente, almacenada en baterías, o convertida en corriente alterna mediante un inversor para uso en viviendas, industrias o conexión a red eléctrica [15].

2.1.1.3 Tipos de paneles solares

Los paneles solares fotovoltaicos se clasifican principalmente en tres tipos según el material utilizado en la celda fotovoltaica y su eficiencia en la conversión de la radiación solar en electricidad. Cada tipo tiene sus características y aplicaciones particulares.

- **Monocristalinos:** Hechos de un único cristal de silicio, estos paneles tienen una alta eficiencia (18-22%) en la conversión de energía solar, lo que los hace ideales para

espacios limitados. Sin embargo, su proceso de fabricación es más costoso, lo que los convierte en la opción más cara, pero con el mejor rendimiento.

- **Policristalinos:** Compuestos por múltiples cristales de silicio, los paneles policristalinos tienen una eficiencia moderada (14-18%) y son más económicos que los monocristalinos. Son una opción adecuada para proyectos a gran escala donde el costo es más importante que el rendimiento máximo [13]
- **De película delgada:** Estos paneles son flexibles y más ligeros, fabricados con una capa fina de material fotovoltaico. Aunque tienen la menor eficiencia (10-12%), son más baratos y adecuados para aplicaciones donde el peso y la flexibilidad son factores clave.

2.1.2. Magnitudes eléctricas

Las magnitudes eléctricas son propiedades físicas fundamentales que describen el comportamiento y las características de los fenómenos eléctricos. Estas magnitudes son esenciales para el análisis y diseño de sistemas eléctricos y electrónicos, ya que permiten cuantificar y relacionar los diferentes aspectos de la electricidad. Además, son la base para la correcta aplicación de tecnologías como la energía renovable, telecomunicaciones e informática. El dominio de estas magnitudes es crucial para garantizar la eficiencia, seguridad y fiabilidad de los sistemas eléctricos [16].

2.1.2.1 Tensión

La tensión, también conocida como diferencia de potencial eléctrico, es la magnitud que cuantifica la diferencia de energía potencial eléctrica por unidad de carga entre dos puntos en un campo eléctrico. Se define como el trabajo realizado por unidad de carga para mover una carga de prueba entre esos dos puntos. Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el voltio (V) y se determina en [17].

Ecuación 1: Tensión eléctrica

$$V = \frac{W}{Q} \quad \text{Ec.1}$$

Donde: W es el trabajo realizado (julios)

Q la carga eléctrica (culombios).

2.1.2.1.1 Tensión de fase

El voltaje de fase se define como la diferencia de potencial eléctrico medida entre un conductor de fase y el neutro en un sistema polifásico. En sistemas trifásicos es una magnitud clave, ya que permite calcular la tensión que alimenta directamente a las cargas conectadas en estrella. Su control es vital para garantizar el equilibrio del sistema, prevenir sobrecargas y asegurar que los equipos operen dentro de los márgenes de seguridad establecidos. Además, su correcta medición es esencial para analizar el comportamiento eléctrico de instalaciones industriales y residenciales [18].

Ecuación 2: Sistema trifásico equilibrado

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad \text{ec.2}$$

Donde: V_f es la tensión de fase

V_L la tensión de línea

2.1.2.2 Intensidad de corriente eléctrica

La intensidad de corriente eléctrica es la cantidad de carga eléctrica que fluye a través de un conductor por unidad de tiempo. Se mide en amperios (A), representados por la letra "A". Un amperio corresponde al paso de un culombio de carga por segundo. Esta magnitud es esencial para determinar la capacidad de los conductores y la protección de los circuitos eléctricos [17].

Ecuación 3: Intensidad de corriente

$$I = \frac{Q}{t} \quad \text{ec.3}$$

Donde Q es la carga (culombios)

t el tiempo (segundos)

2.1.2.3 Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica es la oposición que presenta un cuerpo al paso de una corriente eléctrica. Depende de factores como el material, la longitud y el área de sección transversal del conductor. Su unidad en el SI es el ohmio (Ω), representado por la letra griega omega.

La ley de Ohm establece que la resistencia es igual a la tensión dividida por la intensidad [17].

Ecuación 4: Resistencia eléctrica

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{ec.4}$$

Donde: R es la resistencia eléctrica

V es la tensión

I la intensidad de la corriente eléctrica

2.1.2.4. Potencia eléctrica

La potencia eléctrica es la tasa a la cual se realiza trabajo o se consume energía en un circuito eléctrico. Representa la rapidez con la que la energía se transfiere o transforma en un sistema eléctrico. Su unidad en el SI es el vatio (W), representado por la letra "W". Esta magnitud es crucial para dimensionar equipos y sistemas eléctricos, asegurando su funcionamiento eficiente y seguro [17].

Ecuación 5: Potencia eléctrica

$$P = V * I \quad \text{ec.5}$$

Donde: V es la tensión en voltios

I la corriente en amperios

2.1.2.4.1. Potencia activa

La potencia activa es la fracción de la potencia eléctrica que se transforma en trabajo útil, como el movimiento en un motor, la luz en una lámpara o el calor en una resistencia. Representa la energía realmente consumida por los equipos para realizar tareas prácticas. Se mide en vatios (W) o sus múltiplos (kW), y en corriente alterna se calcula mediante la expresión [19].

Ecuación 6: Potencia activa

$$P = V * I * \cos(\varphi) \quad \text{ec.6}$$

Donde: V es la tensión

I la corriente

ϕ el ángulo de desfase entre ambas magnitudes

$\cos(\phi)$ cercano a 1 indica un uso más eficiente de la energía disponible.

2.1.2.4.2 Potencia reactiva

La potencia reactiva corresponde a la porción de la potencia alterna que no se transforma en trabajo útil, pero es indispensable para sostener los campos eléctricos y magnéticos en equipos como transformadores, motores o bobinas. Se mide en kilovolt-amperios reactivos (kVAr) y su exceso puede afectar la eficiencia de un sistema eléctrico. A pesar de no generar trabajo directo, es esencial para el funcionamiento de dispositivos inductivos y capacitivos, ya que asegura el correcto intercambio de energía en los circuitos de corriente alterna [19].

Ecuación 7: Potencia reactiva

$$Q = V * I * \sin(\phi) \quad \text{ec.7}$$

Donde: V es la tensión

I la corriente

ϕ el ángulo de desfase entre ambas magnitudes

2.1.2.4.3 Potencia aparente

La potencia aparente es la potencia total suministrada a un sistema de corriente alterna, que combina tanto la potencia activa como la reactiva. Constituye la potencia “bruta” que debe entregar la fuente para satisfacer las necesidades de una instalación eléctrica. Se mide en voltamperios (VA) o sus múltiplos (kVA), y se determina mediante la relación: [19].

Ecuación 8: Potencia aparente

$$S = V * I \text{ o bien } S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{ec.8}$$

Donde: P es la potencia activa

Q la potencia reactiva. Es fundamental para dimensionar transformadores, generadores y equipos de distribución, ya que refleja la capacidad total que deben soportar los sistemas eléctricos.

2.1.2.5 Energía activa

La energía activa es la parte de la energía eléctrica que se convierte en un trabajo útil dentro de un sistema, ya sea en forma de luz, calor o movimiento mecánico. Es la energía realmente consumida por los equipos y la que se factura en la mayoría de los sistemas eléctricos, medida en kilovatios-hora (kWh). Su importancia radica en que permite cuantificar la demanda real de electricidad de una instalación, siendo fundamental para la gestión del consumo y la eficiencia energética [20].

Ecuación 9: Energía activa

$$E = P * t \quad \text{ec.9}$$

Donde: P es la potencia activa

t el tiempo

2.1.2.6 Frecuencia eléctrica

La frecuencia eléctrica es el número de ciclos completos que una señal de corriente alterna (CA) realiza por unidad de tiempo. Se mide en hertzios (Hz), equivalente a un ciclo por segundo. En los sistemas eléctricos de potencia, mantener la frecuencia dentro de límites nominales (por ejemplo, 50 Hz o 60 Hz según el país) es esencial para la estabilidad de la red y para el buen funcionamiento de equipos eléctricos [20].

Ecuación 10: Frecuencia eléctrica

$$f = \frac{N}{t} \quad \text{ec.10}$$

Donde: N es el número de ciclos

t el tiempo en segundos

2.1.2.7 Factor de potencia

El factor de potencia es una magnitud adimensional que relaciona la potencia activa (la energía útil que realiza trabajo) con la potencia aparente en un circuito de corriente alterna. Su valor oscila entre 0 y 1. Un factor de potencia cercano a 1 indica que la mayor parte de la energía suministrada se está usando efectivamente. Cuando hay desfase entre tensión y

corriente (por cargas inductivas o capacitivas), el factor de potencia disminuye, generando pérdidas y demanda adicional de corriente [21].

Ecuación 11: Factor de potencia

$$fp = \frac{P}{S} = \cos(\varphi) \quad \text{ec.9}$$

Donde: P es la potencia activa

S la potencia aparente

φ el ángulo de desfase.

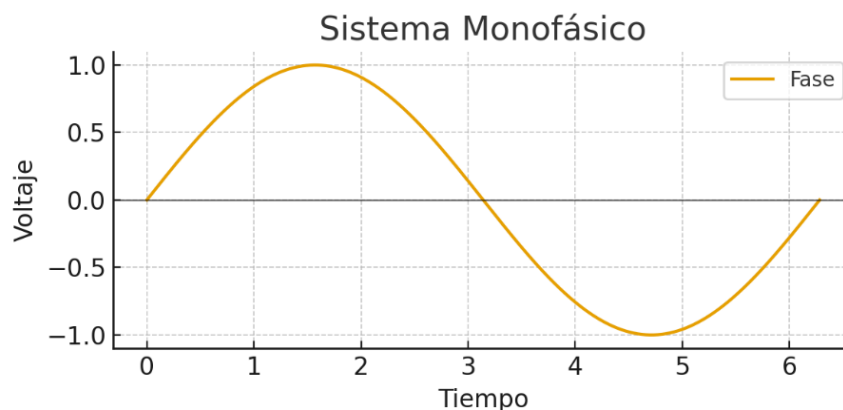
2.1.3 Topologías de los sistemas eléctricos

Las topologías de los sistemas eléctricos describen cómo se organizan y distribuyen las fases dentro de una instalación. Su comprensión es clave para identificar el tipo de suministro y el comportamiento eléctrico del sistema. Además, permiten determinar la compatibilidad entre los equipos y la forma en que fluye la energía en cada configuración.

2.1.3.1 Sistema monofásico

El sistema monofásico utiliza una sola fase de corriente alterna para la distribución de energía eléctrica y está compuesto por dos conductores: uno activo (fase) y uno de retorno (neutro). Se aplica principalmente en instalaciones residenciales, comercios pequeños y cargas de baja potencia por su simplicidad y bajo costo. Resulta fundamental en la electrificación de viviendas y locales, al permitir alimentar de manera confiable aparatos domésticos y equipos de baja demanda energética [22].

Figura 1. Sistema monofásico



Elaborado por Luiggy Herbas

2.1.3.2 Sistema de fase dividida

El sistema de fase dividida es una variación del sistema monofásico en el que el devanado del transformador cuenta con una derivación central, generando dos tensiones iguales pero opuestas respecto al neutro. Esto permite disponer de dos tensiones diferentes en una misma instalación, como por ejemplo 120 V y 240 V en algunos países. Su relevancia radica en que ofrece mayor flexibilidad y eficiencia en el suministro eléctrico, al permitir alimentar tanto cargas pequeñas como equipos de mayor potencia sin necesidad de un sistema trifásico [23].

Figura 2. Sistema de fase dividida

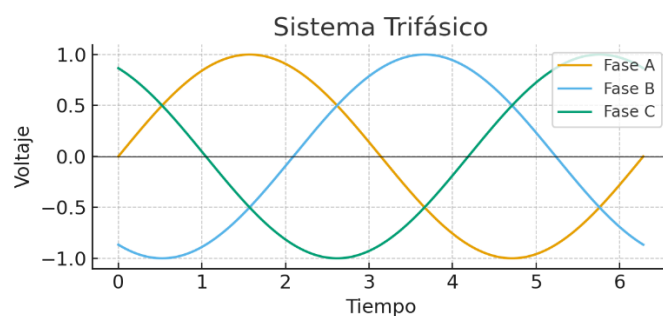


Elaborado por Luiggy Herbas

2.1.3.3 Sistema trifásico

El sistema trifásico es aquel que emplea tres fases de corriente alterna, desfasadas entre sí en 120°. Está compuesto por tres o cuatro conductores (tres fases y, en algunos casos, un neutro). Se utiliza ampliamente en instalaciones industriales, comerciales y de generación eléctrica debido a su capacidad para transmitir grandes cantidades de energía con mayor eficiencia. Es esencial en la distribución de energía a gran escala, ya que reduce las pérdidas en transmisión, permite el uso de motores trifásicos más eficientes y asegura un suministro más estable y equilibrado para cargas de gran magnitud [24].

Figura 3. Sistema trifásico



Elaborado por Luiggy Herbas

2.1.4. Internet de las Cosas

Es un paradigma tecnológico que conecta objetos físicos a través de redes digitales, permitiéndoles recopilar y compartir datos de forma autónoma. Los dispositivos IoT incluyen sensores, actuadores y sistemas inteligentes que, mediante la interconexión, pueden interactuar entre sí y con otras plataformas para realizar tareas específicas. Este enfoque está revolucionando diversas industrias, como la domótica, la gestión energética y la salud, al proporcionar soluciones que mejoran la eficiencia, la toma de decisiones y la automatización en tiempo real [25].

2.1.4.1 Funcionamiento del Internet de las Cosas

El funcionamiento del IoT se basa en la integración de sensores que capturan datos del entorno, como temperatura, humedad o movimiento, y los transmiten a través de redes como Wi-Fi o 5G. Una vez que los datos son procesados en plataformas o servidores, los sistemas pueden generar respuestas automáticas, o bien enviar alertas a los usuarios. Además, la incorporación de inteligencia artificial en estos sistemas permite realizar análisis predictivos y optimizar operaciones sin intervención humana [26].

2.1.4.2 Arquitectura del Internet de las Cosas

La arquitectura de IoT es la estructura tecnológica que integra dispositivos físicos, redes de comunicación y plataformas digitales para crear un ecosistema interconectado. Este modelo permite que sensores, actuadores y otros dispositivos inteligentes capturen datos del entorno, los transmitan mediante diferentes protocolos y los envíen hacia sistemas de almacenamiento o procesamiento en la nube. Su función principal es garantizar el flujo eficiente y confiable de información, de manera que los datos recopilados puedan analizarse y transformarse en acciones útiles para la automatización, supervisión y toma de decisiones en tiempo real [27].

Figura 4. Arquitectura de tres capas basada en Internet de las Cosas



Elaborado por Luiggy Herbas

2.1.4.2.1. Capa de percepción (Capa física)

Es la base de la arquitectura IoT y se encarga de la interacción con el entorno físico. Está conformada por sensores y actuadores que recopilan datos como temperatura, humedad, luz, presión o movimiento, y por dispositivos capaces de ejecutar acciones en respuesta a comandos (ej. abrir una válvula, encender una lámpara o activar un motor). Su función principal es transformar fenómenos físicos en información digital que pueda ser transmitida y procesada por el sistema [28].

2.1.4.2.2. Capa de red

Es la responsable de transportar los datos recopilados en la capa de percepción hacia otros dispositivos o plataformas. Para ello utiliza protocolos y tecnologías de comunicación como Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth, LoRaWAN o redes móviles 4G/5G. También incluye dispositivos intermedios como gateways y routers, que facilitan la transmisión de información entre redes locales y servidores externos. Su propósito es garantizar que los datos lleguen al destino de manera segura, rápida y eficiente [28].

2.1.4.2.3. Capa de aplicación

Constituye la interfaz final con el usuario y transforma los resultados del procesamiento en información accesible y comprensible. En esta capa se ubican las aplicaciones móviles, paneles de control web o dashboards, que permiten al usuario visualizar datos, recibir alertas y controlar dispositivos de forma remota. Su función es facilitar la toma de decisiones y mejorar la interacción humano-sistema en tiempo real [28].

2.1.4.3 Aplicaciones del IoT en sistemas fotovoltaicos

El Internet de las Cosas (IoT) ha tenido un impacto significativo en los sistemas fotovoltaicos, especialmente en áreas rurales donde la eficiencia operativa y la gestión de la energía son esenciales. La implementación de estas tecnologías permite un monitoreo constante de parámetros como tensión, corriente y potencia, optimizando el uso de los recursos energéticos. También resulta clave en condiciones de aislamiento geográfico o conectividad limitada, donde las soluciones tradicionales no son suficientes. Este enfoque incrementa la fiabilidad de los sistemas al posibilitar intervenciones rápidas y eficaces ante anomalías que afecten su funcionamiento [10].

2.1.5. Monitoreo remoto

El monitoreo remoto es un proceso que permite la supervisión continua y en tiempo real de parámetros específicos en ubicaciones distantes, sin necesidad de presencia física constante.

Este tipo de monitoreo se lleva a cabo mediante el uso de tecnologías avanzadas, como sensores, dispositivos conectados a redes de comunicación y plataformas digitales que facilitan la recolección, transmisión y análisis de datos desde ubicaciones remotas. Se utiliza ampliamente en diversas áreas, como la gestión ambiental, la infraestructura y la salud, permitiendo una supervisión más eficiente y precisa que los métodos tradicionales [29].

Los sistemas de monitoreo remoto permiten verificar de manera continua el estado de equipos o procesos en el campo y comunicar esta información a una ubicación centralizada. Esto facilita la detección temprana de fallas o anomalías sin intervención directa en el sitio, lo que optimiza la gestión de recursos y reduce costos operativos. Además, la implementación de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) en estos sistemas ha mejorado significativamente la capacidad para monitorear parámetros clave, como la calidad del agua, la temperatura o la humedad, permitiendo una respuesta más rápida ante posibles fallos o situaciones críticas [30].

2.1.6. Protocolos de comunicación

La elección de un protocolo de comunicación en IoT es una decisión arquitectónica que determina las características intrínsecas de un sistema, como su escalabilidad, capacidad en tiempo real y nivel de acoplamiento entre componentes. Los dos paradigmas dominantes, publicación-suscripción y solicitud-respuesta, ofrecen enfoques contrastantes para la distribución de datos, cada uno con fortalezas y debilidades que los hacen adecuados para diferentes contextos de aplicación.

2.1.6.1. SPI (Interfaz Periférica Serial)

Es un protocolo de comunicación sincrónica que permite la transferencia de datos entre un microcontrolador y dispositivos periféricos, como sensores, memorias y módulos de comunicación. A diferencia de otros protocolos, SPI permite la transmisión de datos en alta velocidad y baja latencia, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren un intercambio rápido de información [31]

SPI opera bajo un modelo maestro-esclavo, donde el maestro controla la comunicación y los esclavos responden a sus solicitudes. Este protocolo es utilizado en dispositivos como el ESP8266 y el ESP32. Aunque ambos soportan SPI, el ESP32 es más potente, con un procesador de mayor capacidad y soporte para Bluetooth, lo que lo hace adecuado para proyectos que requieren mayor rendimiento y conectividad. En comparación, el ESP8266 es más económico y adecuado para aplicaciones más simples [32].

2.1.6.2. UART (Receptor/Transmisor Asíncrono Universal)

Es un protocolo de comunicación serial asíncrono que establece las reglas para el intercambio de datos entre dos dispositivos electrónicos. Su simplicidad radica en que utiliza únicamente dos líneas principales: TX (transmisión) y RX (recepción), además de una referencia común a masa. Esto lo convierte en una solución ampliamente adoptada en sistemas embebidos y microcontroladores [33].

La comunicación bajo UART puede realizarse en distintos modos: simplex, cuando la transmisión ocurre solo en un sentido; semidúplex, cuando ambos extremos pueden transmitir, pero no al mismo tiempo; y dúplex completo, cuando la transmisión y recepción de datos ocurre simultáneamente en ambos sentidos.

Los datos enviados por UART se encapsulan en tramas compuestas por un bit de inicio, un conjunto de bits de datos, un bit de paridad opcional (para verificación de errores) y uno o más bits de parada, que marcan el final de la transmisión. Esta estructura permite que el dispositivo receptor identifique de manera confiable el inicio y la finalización de cada byte de información, aun sin compartir una señal de reloj con el transmisor [33].

2.1.6.3. HTTP (Protocolo de Transferencia de Hipertexto)

HTTP, el protocolo que sustenta la web, ha sido una opción frecuente en IoT debido a su universalidad y a la facilidad de integración con las API RESTful y los servicios en la nube existentes. Para aplicaciones que necesitan enviar datos de forma intermitente a un punto final web, HTTP/ ofrece una solución sencilla y bien documentada [34].

2.1.6.4. Modbus RTU (Unidad Terminal Remota)

Es un protocolo de comunicación serial asíncrono utilizado principalmente en sistemas de automatización industrial para la transmisión de datos entre dispositivos, tales como controladores lógicos programables (PLC), sensores, actuadores y medidores. Fue desarrollado por Modicon (actualmente parte de Schneider Electric) en 1979, y se ha convertido en uno de los protocolos más usados para la supervisión y control de procesos industriales debido a su fiabilidad, simplicidad y bajo costo [35].

2.1.6.4.1 Estructura de una trama Modbus RTU

Una trama Modbus RTU se compone de varios campos que facilitan la comunicación entre el maestro y los esclavos. La dirección del esclavo identifica al dispositivo al que se enviará

la solicitud, y el código de función específica la acción que debe realizar, como leer o escribir registros. Los datos incluyen la información relevante para la operación, como los valores de los registros. Finalmente, el CRC (Cyclic Redundancy Check) asegura la integridad de los datos, detectando posibles errores en la transmisión [36].

2.1.7. Interfaz de comunicación

La interfaz de comunicación corresponde al medio mediante el cual los dispositivos intercambian información dentro de un sistema eléctrico o de Internet de las Cosas. Su función es estandarizar la transferencia de datos entre equipos, garantizando compatibilidad, correcta interpretación de la información y continuidad en el flujo de comunicación entre sensores, controladores y plataformas de monitoreo.

2.1.7.1. Interfaz física de comunicación (RS-232)

RS-232 es un protocolo físico de comunicación serial que se utiliza principalmente en comunicaciones de corto alcance. A pesar de ser un estándar más antiguo en comparación con otros protocolos como RS-485, RS-232 sigue siendo una opción válida para aplicaciones simples que requieren comunicaciones punto a punto. Este protocolo define cómo los datos deben ser transmitidos entre dispositivos conectados a través de señales eléctricas. Aunque no es adecuado para sistemas IoT a gran escala, su simplicidad y baja complejidad lo convierten en una opción útil para dispositivos más antiguos o sistemas que no requieren alta velocidad de transmisión [37].

2.1.7.2. Interfaz física de Comunicación (RS-485)

RS-485 es un protocolo físico que define cómo se deben transmitir las señales entre dispositivos de manera robusta y eficiente. Su principal ventaja es su capacidad de operar a largas distancias (hasta 1200 metros) y ser resistente a las interferencias electromagnéticas, lo que lo hace adecuado para entornos industriales y zonas rurales, donde la calidad de la señal puede ser comprometida [38].

RS-485 es comúnmente utilizado en sistemas de monitoreo y automatización industrial en entornos rurales, donde los dispositivos IoT deben comunicarse a larga distancia sin perder integridad de los datos. Este protocolo permite conectar hasta 32 dispositivos en una misma línea de comunicación, facilitando la gestión remota y el monitoreo de datos de dispositivos dispersos, como en sistemas fotovoltaicos rurales [39].

2.1.8. Transmisión de datos en tiempo real

Se refiere al proceso de transferencia continua de información desde una fuente a un destino sin demoras significativas, permitiendo que los datos sean procesados y utilizados de manera inmediata. Este enfoque es esencial en aplicaciones donde la inmediatez es crítica, como en sistemas de monitoreo remoto, comunicaciones en vivo y análisis de datos en tiempo real. A diferencia del procesamiento por lotes, que maneja conjuntos de datos a intervalos programados, la transmisión en tiempo real permite una respuesta instantánea a los eventos a medida que ocurren [40].

El funcionamiento de la transmisión de datos en tiempo real implica la captura, procesamiento y entrega continua de datos a través de redes de comunicación. Los sistemas diseñados para este propósito utilizan protocolos y arquitecturas especializadas que garantizan baja latencia y alta fiabilidad. Por ejemplo, en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), los dispositivos generan datos que son transmitidos en tiempo real a plataformas de análisis, donde se procesan y se toman decisiones al instante [40].

2.1.9. Eficiencia energética

La eficiencia energética se refiere a la relación entre la cantidad de energía utilizada y la producción o los resultados obtenidos. En este contexto, significa utilizar menos energía para lograr el mismo nivel de producción o desempeño, minimizando el desperdicio. Mejorar la eficiencia energética implica optimizar procesos y adoptar tecnologías que permitan un uso más racional de los recursos energéticos. La eficiencia energética es fundamental para reducir el consumo de energía y los costos operativos, al mismo tiempo que se minimizan los impactos ambientales de los sistemas productivos [41].

2.2. Marco referencial

El estudio de Cruz-Vázquez [42] describe el uso de Arduino y la plataforma my Devices Cayenne para monitorear en tiempo real el voltaje de una placa solar y la calidad luminosa. A través de esta tecnología, los datos se transmiten y visualizan de forma remota, lo que facilita la supervisión y el análisis de los parámetros solares. Este enfoque de monitoreo es relevante para el diseño de un sistema que permita gestionar y optimizar la producción energética, ya que demuestra cómo tecnologías accesibles y de bajo costo pueden ser utilizadas para mejorar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos.

Este estudio realizado por Marcos [43] en el año 2024, compara la eficiencia de paneles fotovoltaicos fijos con sistemas de seguimiento solar de doble eje en la ciudad costera de Manta, Ecuador. Utilizando un sistema de monitoreo en tiempo real basado en IoT, se midieron parámetros como radiación solar, intensidad lumínica, temperatura, corriente de cortocircuito y voltaje en circuito abierto. Los resultados demostraron que los sistemas de seguimiento de doble eje produjeron un 19.62% más de energía que los sistemas fijos, destacando la importancia del seguimiento solar para optimizar la producción energética en regiones ecuatoriales.

El trabajo de Castro [44] desarrolló un sistema de telemetría de bajo costo para el monitoreo remoto de instalaciones solares fotovoltaicas. Este sistema captura valores de corriente y voltaje mediante dispositivos electrónicos y sensores, convirtiendo esta información en datos digitales que se almacenan y publican a través de una plataforma tecnológica web. El monitoreo en tiempo real permite observar el proceso de generación de energía solar desde cualquier dispositivo con acceso a internet, facilitando la supervisión y gestión eficiente del sistema.

Este estudio realizado por Angelino [45] presenta el desarrollo de un sistema embebido basado en IoT para la medición de parámetros eléctricos en un sistema fotovoltaico conectado a la red. Utilizando una placa de desarrollo ESP32, se adquirieron datos de voltaje y corriente de un sistema fotovoltaico de 1.35 kWp instalado en una institución educativa. Los datos se enviaron a una base de datos en la nube, permitiendo el acceso remoto y la validación de las mediciones con un error inferior al 1%. Este enfoque ofrece una solución de bajo costo y de código abierto, adecuada para aplicaciones educativas y de monitoreo remoto.

Esta investigación presenta un sistema de control confiable basado en IoT para gestionar el flujo de energía de paneles solares en una micro red. El estudio destaca cómo la integración de sensores y datos meteorológicos en tiempo real mejora la eficiencia y fiabilidad del sistema. Aunque centrado en microrredes, los principios aplicados son relevantes para el monitoreo y optimización de sistemas fotovoltaicos, justificando el uso de tecnologías similares en el presente estudio. Este enfoque subraya la importancia de integrar datos en tiempo real para una gestión más eficiente de la energía solar, un objetivo central en el monitoreo remoto de magnitudes eléctricas [46].

En un proyecto de titulación para la Universidad Politécnica Salesiana, Baculima y Raiban [47] abordaron la rehabilitación de una instalación fotovoltaica en desuso. Previo a la implementación de un sistema de monitoreo, su metodología incluyó una fase de diagnóstico del estado funcional de los equipos. Realizaron mediciones eléctricas como voltaje de circuito abierto y corriente de cortocircuito en los paneles, además de pruebas de carga y descarga para determinar la capacidad real de las baterías, cuantificando su nivel de degradación y justificando así la necesidad de la intervención.

Por su parte, Corominas y Grebneva [48] desarrollaron un sistema de telemetría IoT para una instalación solar existente. Su fase inicial consistió en un relevamiento centrado en diagnosticar la infraestructura de comunicación del sistema. Se analizaron las interfaces disponibles en el inversor y las limitaciones de la plataforma de monitoreo del fabricante, lo que les permitió justificar el diseño de su prototipo y la selección de la comunicación Wi-Fi como la interfaz más viable para la extracción de datos en tiempo real.

El estudio de Mishra donde desarrollaron un sistema de monitoreo de energía solar basado en IoT utilizando Arduino y sensores ACS712 para medir corriente, junto con sensores de voltaje y una pantalla LCD para visualización local. El sistema también integró la plataforma ThingSpeak para el envío remoto de datos. Su propuesta se centró en una solución de bajo costo y fácil implementación, orientada a aplicaciones de pequeña escala, demostrando la efectividad del uso de tecnologías accesibles para supervisar variables eléctricas en sistemas fotovoltaicos [49].

El estudio de Zarria [50] presenta un sistema de monitoreo remoto para paneles solares utilizando SIM800L y ESP32 para comunicación GSM. El sistema recopila datos de voltaje y corriente, enviándolos a la nube para su visualización remota. Se implementa un algoritmo de alertas vía SMS para notificar sobre parámetros fuera de rango. Este enfoque ofrece una solución económica para monitoreo fotovoltaico en áreas con cobertura móvil, aunque presenta limitaciones en escalabilidad y fiabilidad ante fallos de conexión en entornos rurales.

El presente estudio se diferencia de otros trabajos previos por su enfoque específico en el monitoreo remoto de magnitudes eléctricas en sistemas fotovoltaicos aplicados a un entorno agrícola controlado, como el invernadero ecológico. A diferencia de los estudios que se enfocan en la optimización general de la eficiencia energética o la comparación de tecnologías, mi proyecto integra un sistema de monitoreo basado en IoT adaptado a las

necesidades del invernadero. La solución implementada permite supervisar en tiempo real variables clave como tensión, corriente y potencia, generando información confiable para evaluar el comportamiento energético del sistema y apoyar la gestión de la energía solar en el invernadero ecológico.

2.3. Marco Legal

Hace referencia a las normativas legales que respaldan la implementación de tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT) en sistemas solares fotovoltaicos, enfocándose en la eficiencia energética, el uso de energías renovables y el acceso a tecnologías limpias en Ecuador.

Constitución de la república de Ecuador

Art. 4:

“El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes [51]”

Art. 413:

“El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias, de energías renovables, diversificadas y de bajo impacto [51]”

Ley Orgánica de la eficiencia energética

En lo que respecta a la eficiencia energética, la Ley establece como principios los lineamientos establecidos por la Constitución de la República, los acuerdos internacionales ratificados por el Ecuador, las normativas vinculadas al sector y los principios contemplados dentro de la propia ley.

1. *“Uso racional de la energía y protección de los recursos energéticos, tanto renovables como no renovables;”*
2. *“Incremento de la productividad y la competitividad mediante la disminución de costos asociados al uso eficiente de la energía;”*
3. *“Promoción de fuentes de energía limpia y disminución de las emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero [52].”*

Art. 16 (De los consumidores de energía):

“Los consumidores en los sectores público, industrial, comercial, turístico y recreativo, deberán procurar la implementación de acciones de eficiencia energética, mediante la adquisición de nuevas tecnologías, políticas de concientización empresarial, y optimización de uso de la energía en sus procesos productivos [52].”

Art. 17 *(Ahorro y uso eficiente de energía):*

“A nivel nacional, todo consumidor de energía debe velar permanentemente porque sus consumos estén enmarcados en el uso racional de la energía, y adaptar sus comportamientos de consumo, orientándolos al ahorro energético, sin que esto signifique disminuir sus condiciones de confort y producción [46].”

Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica.

Art.74 *(Exclusión de responsabilidad):* La eficiencia energética tendrá como objetivo general la obtención de un mismo servicio o producto con el menor consumo de energía [53]. En particular, los siguientes:

- Impulsar la eficiencia tanto en la economía como en la sociedad, especialmente dentro del sistema eléctrico;
- Fomentar valores y prácticas que promuevan un uso responsable de los recursos energéticos, dando prioridad a las energías renovables;
- Favorecer que los usuarios finales hagan un uso racional de la energía eléctrica.;
- Estimular la disminución de los costos de producción mediante el aprovechamiento eficiente de la energía, fortaleciendo así la competitividad;
- Reducir la dependencia y el consumo de combustibles fósiles;
- Guiar y proteger los derechos de los consumidores o usuarios finales;
- Disminuir los impactos ambientales mediante una gestión sostenible del sistema energético.

Art. 75 *(Establecimiento de políticas de eficiencia energética):*

“Las políticas y normas que se adopten por parte del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, para el cumplimiento de los objetivos establecidos en esta materia, procurarán una mayor eficiencia en el aprovechamiento de las fuentes de energía y en el uso de la energía eléctrica por parte de los consumidores [53].”

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

El estudio se llevó a cabo en el invernadero ecológico del campus "La María" de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), en Quevedo, Los Ríos, Ecuador. Esta ubicación es clave para implementar tecnologías innovadoras en energía solar y monitoreo remoto, lo que optimiza la gestión energética del sistema. El invernadero ofrece un entorno ideal para integrar sistemas fotovoltaicos optimizados mediante IoT, permitiendo la supervisión en tiempo real de las magnitudes eléctricas.

Latitud: -1.0804917140854189,

Altitud: -79.5028436919181

Figura 5. Ubicación del invernadero ecológico del campus "La María"



Fuente: Luiggy Herbas

3.2. Tipo de Investigación

3.2.1. Investigación cuantitativa

La investigación se basa en el análisis numérico de las magnitudes eléctricas registradas en el sistema fotovoltaico del invernadero. Estos datos fueron obtenidos mediante el dispositivo de medición industrial que permiten describir de manera cuantitativa el comportamiento eléctrico del sistema bajo condiciones reales de operación. Este enfoque se centra en la interpretación de valores medidos y en la identificación de variaciones relacionadas con el funcionamiento de las cargas conectadas, especialmente las bombas de riego y fertirriego.

3.2.2. Investigación descriptiva

El enfoque descriptivo se aplica para caracterizar el comportamiento eléctrico del sistema fotovoltaico del invernadero, detallando las variaciones de las magnitudes registradas por el dispositivo MT61GP durante la operación normal del sistema. Este método permite observar cómo se comportan parámetros como voltaje, corriente, potencia y energía en condiciones

reales, especialmente durante el funcionamiento de las bombas de riego y fertirriego. De esta forma, se proporciona una descripción clara de la situación actual del sistema, basada en datos obtenidos mediante el monitoreo remoto implementado con tecnologías IoT.

3.2.3. Investigación aplicada

Este proyecto se clasifica como una investigación aplicada, ya que desarrolla una solución orientada a resolver un problema práctico relacionado con la supervisión del sistema fotovoltaico del invernadero ecológico. La propuesta consiste en implementar un sistema de monitoreo remoto basado en tecnologías IoT que permita visualizar en tiempo real las magnitudes eléctricas registradas por el medidor industrial MT61GP. De esta manera, se facilita el seguimiento del comportamiento operativo del sistema bajo condiciones reales, aportando una herramienta útil para la gestión y supervisión de instalaciones solares en entornos agrícolas.

3.3. Métodos de Investigación

3.3.1. Método de observación

En este método se realizó una observación directa del sistema fotovoltaico instalado en el invernadero ecológico de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. La observación se enfocó en verificar la instalación del medidor industrial MT61GP, los sistemas embebidos utilizados para la transmisión de datos y el flujo de energía hacia el tablero eléctrico. Este proceso permitió identificar cómo varían las magnitudes eléctricas del sistema bajo condiciones reales de operación, especialmente durante el funcionamiento de las bombas de riego y fertirriego.

3.3.2. Método analítico

El método analítico se utilizó para examinar e interpretar los datos. Este análisis permitió identificar las magnitudes eléctricas con el propósito de comprender el comportamiento eléctrico del sistema fotovoltaico del invernadero, especialmente durante el funcionamiento de las cargas del sistema. El enfoque se centró en la interpretación de los valores obtenidos, sin realizar comparaciones externas ni evaluaciones de eficiencia energética.

3.3.3. Método inductivo

El método inductivo se aplicó para generar conclusiones a partir de la información obtenida durante el monitoreo de las magnitudes eléctricas registradas en el sistema fotovoltaico del

invernadero. A partir de las observaciones las magnitudes eléctricas, se identificaron comportamientos recurrentes asociados al funcionamiento de las cargas, como las bombas de riego y fertirriego. Este razonamiento permitió formular interpretaciones generales sobre el comportamiento eléctrico del sistema bajo condiciones reales de operación, sin abordar análisis de eficiencia ni procesos de optimización energética.

3.4. Fuentes de recolección de información

Las fuentes primarias en este proyecto se centran en los datos obtenidos directamente de los sensores IoT instalados en los paneles solares del invernadero ecológico de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Estos sensores medirán en tiempo real parámetros eléctricos como voltaje, corriente y temperatura, proporcionando información actualizada sobre el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Estos datos son fundamentales, ya que provienen directamente de la instalación y reflejan el comportamiento operativo del sistema, sirviendo como base para el análisis de la eficiencia energética y la optimización del rendimiento de los paneles solares.

Las fuentes secundarias incluyen investigaciones previas, artículos científicos y reportes técnicos sobre el uso de IoT en sistemas fotovoltaicos y energías renovables. Se consultarán repositorios académicos como Google Scholar, IEEE Xplore y Scopus para obtener información relacionada con el monitoreo remoto de paneles solares. Además, se considerarán las normativas nacionales e internacionales sobre energía solar y eficiencia energética, así como datos históricos sobre el uso de tecnologías IoT en sistemas solares. Estas fuentes complementarán la información primaria y proporcionarán el contexto necesario para interpretar los resultados y mejorar el diseño del sistema de monitoreo.

3.5. Diseño de la investigación

3.5.1. Diseño no experimental

En este estudio no se manipularon variables ni se intervinieron los procesos del sistema fotovoltaico. El análisis se basó únicamente en observar y registrar el comportamiento real de las magnitudes eléctricas obtenidas mediante el medidor industrial instalado en el invernadero ecológico. La transmisión continua de datos a través de la arquitectura IoT permitió identificar cómo variaron estas magnitudes durante la operación normal del sistema, especialmente cuando se activaron las cargas asociadas, como las bombas de riego y fertirriego. Este enfoque permitió describir el funcionamiento eléctrico bajo condiciones reales sin alterar el sistema ni modificar su operación.

3.5.2. Fases de investigación

Fase 1: Diagnóstico de la situación actual de los paneles solares y magnitudes eléctricas

Esta fase se ejecutó mediante un levantamiento técnico exhaustivo del sistema fotovoltaico instalado en el invernadero ecológico del campus "La María". Se realizó la caracterización física y eléctrica de todos los componentes, incluyendo la identificación de especificaciones técnicas de los 14 paneles solares ORION PV0081, el sistema de almacenamiento con baterías MIL-31-DC-100, y las cargas finales representadas por las bombas de riego y fertirriego. La metodología incluyó inspección visual directa, revisión de fichas técnicas de fabricantes y mediciones in situ utilizando el dispositivo MT61GP para registrar parámetros eléctricos reales.

Fase 2: Observación de patrones de comportamiento eléctrico

En esta fase se obtuvieron los valores reales registrados por el dispositivo MT61GP durante el funcionamiento del invernadero, incluyendo voltaje, corriente, potencia y energía. Las mediciones se interpretaron de manera descriptiva para comprender el comportamiento del sistema bajo condiciones operativas normales, especialmente durante la activación de las bombas de riego y fertirriego. Esta interpretación permitió identificar variaciones típicas del consumo y establecer la información necesaria para el diseño del sistema de monitoreo remoto.

Fase 3: Diseño del sistema de comunicación IoT para monitoreo en tiempo real

Esta fase se centró en el desarrollo de una arquitectura de comunicación multicapa que garantizara la transmisión eficiente de datos desde el dispositivo MT61GP hasta una plataforma de visualización en la nube. La metodología incluyó la evaluación comparativa de protocolos de comunicación, considerando criterios técnicos como latencia, confiabilidad, resistencia a interferencias y escalabilidad. Se estableció una matriz de evaluación técnica para seleccionar el protocolo más adecuado, priorizando la compatibilidad con el dispositivo existente y las condiciones ambientales del invernadero.

El proceso metodológico se estructuró mediante el diseño de una arquitectura multicapa, definiendo criterios específicos de selección para cada componente del sistema. Se desarrollaron matrices comparativas para la evaluación de microcontroladores, considerando parámetros técnicos, económicos y de soporte. La metodología incluyó el análisis de alternativas de bases de datos en la nube mediante criterios de escalabilidad, latencia y

compatibilidad con aplicaciones IoT. Finalmente, se establecieron protocolos de diseño para los esquemas de conexión electrónica y se definieron estándares de transmisión que garanticen la integridad y disponibilidad de los datos en tiempo real.

Fase 4: Implementación del dispositivo y despliegue en campo

En esta fase se realizó el ensamblaje físico del dispositivo, uniendo todos los componentes de acuerdo con los esquemas de conexión diseñados previamente. Una vez montado, se hizo una validación funcional para asegurar su correcto funcionamiento, verificando que cada uno de los componentes del sistema, como la comunicación inalámbrica operaran como se esperaba.

El despliegue en el campus "La María" se ejecutó mediante un protocolo de instalación que consideró las condiciones ambientales del invernadero y los requerimientos de acceso seguro al sistema eléctrico existente. Se incluyó procedimientos de configuración de parámetros de comunicación, establecimiento de conectividad con la infraestructura de red e implementación de la transmisión hacia la plataforma de almacenamiento. Se definieron protocolos de pruebas de campo, validación de transmisión continua, y procedimientos de monitoreo inicial para verificar la estabilidad operativa del sistema durante un período de prueba antes de su funcionamiento permanente.

Fase 5: Desarrollo de la Interfaz de visualización de datos

Esta fase se enfocó en la construcción de la interfaz web para el usuario final. El proceso consistió en desarrollar los distintos componentes visuales, como la tabla para la presentación detallada de los registros y la sección de gráficos para el análisis estadístico interactivo. Asimismo, se implementó el sistema de control de acceso mediante un portal de autenticación. Esta etapa se basó en traducir los diseños y la arquitectura de datos previamente definidos en una plataforma funcional, con el fin de facilitar el monitoreo en tiempo real de las magnitudes eléctricas.

3.6. Recursos y materiales

El desarrollo del sistema requirió la integración de herramientas de software y componentes de hardware específicos. Esta sección detalla las tecnologías seleccionadas para la programación, la gestión de datos y la infraestructura física del prototipo implementado.

3.6.1 Herramientas y tecnologías utilizadas

Se describen las plataformas, entornos de desarrollo y frameworks utilizados para la programación, gestión de bases de datos y visualización de la interfaz del sistema IoT.

Tabla 1. Recursos a nivel de software utilizados en el proyecto

Software	Uso
Firebase	Base de datos NoSQL en tiempo real para el almacenamiento escalable de las magnitudes eléctricas enviadas por el prototipo IoT.
Arduino IDE	Entorno de desarrollo para programar la lógica de conexión Wi-Fi y la transmisión de datos en microcontroladores ESP.
Thonny	Entorno de desarrollo para programar en MicroPython la comunicación Modbus y la recolección de datos en la Raspberry Pi Pico.
Angular	Framework para el desarrollo del frontend, permitiendo la visualización de tablas, gráficos interactivos y gestión de inicio de sesión.
Java (Spring Boot)	Framework backend para el desarrollo del servidor y la API REST, gestionando la autenticación y la comunicación segura con la base de datos.
IntelliJ IDEA	Entorno de desarrollo integrado (IDE) utilizado para optimizar la escritura de código, la gestión del proyecto y la depuración de la interfaz de usuario.
WebStorm	Herramienta de edición de código empleada para la gestión de archivos del servidor y el soporte en el desarrollo de scripts.

Elaborado por Luiggy Herbas

3.6.2. Recursos de hardware

A continuación, se detallan los componentes electrónicos físicos, incluyendo sistemas embebidos y módulos de comunicación, seleccionados para la adquisición, procesamiento y transmisión de datos del prototipo.

Tabla 2. Recursos de hardware utilizados en el proyecto

Componente	Uso
ESP32	Unidad de procesamiento principal. Procesa los datos del medidor y, mediante su Wi-Fi integrado, los envía directamente a la base de datos en la nube.
Raspberry Pi Pico	Microcontrolador de respaldo. Gestiona la comunicación Modbus RTU, recolecta los datos y los envía al módulo Wi-Fi.
MT61GP	Medidor inteligente que registra en tiempo real parámetros eléctricos del sistema fotovoltaico como voltaje, corriente y potencia.
Módulo RS-485	Conversor que adapta las señales RS-485 del medidor MT61GP para que puedan ser interpretadas por el microcontrolador, asegurando comunicación robusta.

Elaborado por Luiggy Herbas

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Levantamiento y Análisis de la situación actual del sistema fotovoltaico

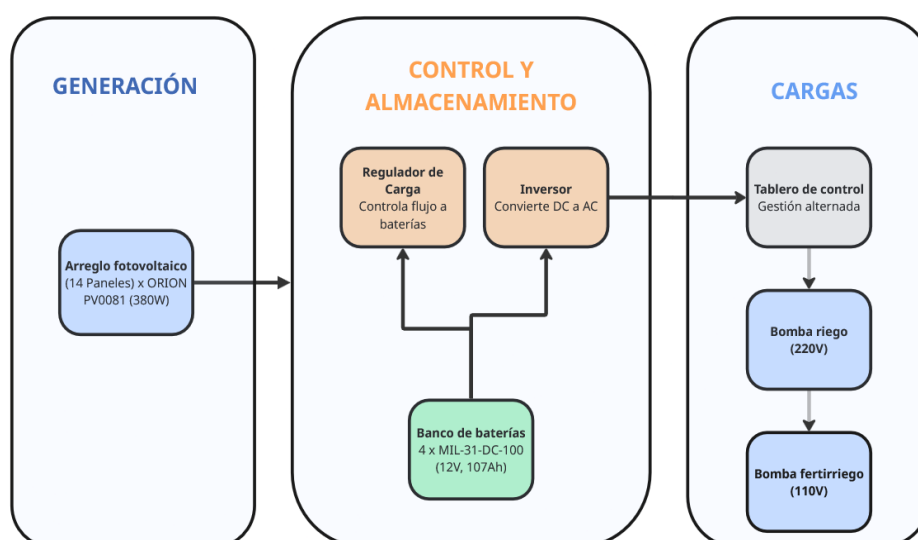
Se realizó un levantamiento de información para analizar la situación actual del sistema fotovoltaico instalado en el invernadero ecológico del campus “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ). A continuación, se detallan los hallazgos.

4.1.1. Descripción del entorno y aplicación del sistema

La instalación fotovoltaica se asienta sobre una estructura metálica fija, anclada directamente a un suelo de grava y vegetación dispersa. Los componentes y su interconexión se detallan en la figura 6. El sistema, que carece de mecanismo de seguimiento solar, se compone de tres bloques funcionales: un arreglo de paneles para la generación de energía, un banco de baterías para su almacenamiento y un conjunto de equipos para el control y conversión.

4.1.2 Componentes y esquema del sistema fotovoltaico actual

Figura 6. Diagrama del sistema fotovoltaico existente



Elaborado por Luiggy Herbas

4.1.2.1 Generación

El diagrama muestra el flujo de energía de un sistema fotovoltaico. En la generación, el arreglo fotovoltaico compuesto por 14 paneles solares ORION PV0081 de 380W cada uno genera energía en corriente continua (DC). Esta energía es dirigida al control y almacenamiento, donde el regulador de carga gestiona el flujo de energía hacia el banco de baterías (8 unidades de MIL-31-DC-100, con 12 V y 107 Ah cada una), asegurando que la energía se almacene de manera eficiente.

4.1.2.1.1. Paneles solares

El sistema utiliza módulos fotovoltaicos policristalinos marca Orion Solar Technology, diseñados para aplicaciones de generación distribuida en sistemas aislados. Cada módulo incorpora 72 células fotovoltaicas de silicio policristalino con tecnología de interconexión optimizada para condiciones de irradiancia variable.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico ORION PV008

Característica	Especificación
Potencia máxima (Pmax)	380 W
Voltaje en circuito abierto (Voc)	48.4 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9.95 A
Voltaje a máxima potencia (Vmp)	39.35 V
Corriente a máxima potencia (Imp)	9.66 A

Elaborado por Luiggy Herbas

4.1.2.1.2. Arreglo fotovoltaico

La instalación fotovoltaica se asienta sobre una estructura metálica fija de soporte, anclada al suelo mediante fundaciones de concreto. Como se observa en la figura 7, el arreglo está distribuido en dos filas paralelas que se extienden horizontalmente, con orientación optimizada para captar la máxima radiación solar disponible. La estructura elevada permite ventilación natural en la parte posterior de los módulos, facilitando la disipación térmica y manteniendo la eficiencia operativa del sistema.

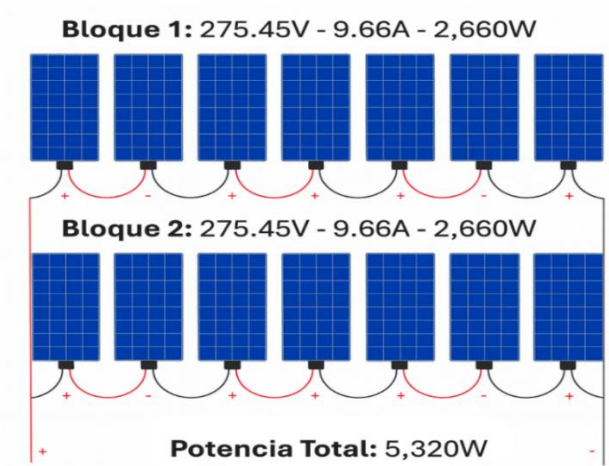
Figura 7. Vista del arreglo fotovoltaico instalado



Elaborado por Luiggy Herbas

Los 14 módulos implementan una configuración eléctrica de dos bloques en paralelo de siete paneles en serie cada uno, como se detalla en la figura 8. Esta topología optimiza el balance voltaje-corriente del sistema, permitiendo compatibilidad con inversores de cadena convencionales mientras maximiza la extracción de potencia. La configuración en paralelo de los bloques proporciona redundancia operativa ante condiciones de sombreado parcial, garantizando continuidad en la generación energética.

Figura 8. Esquema de la configuración eléctrica del arreglo fotovoltaico.



Elaborado por Luiggy Herbas

Como resultado de esta configuración, se consolidan las capacidades individuales de cada panel en un único sistema de mayor potencia. Las especificaciones técnicas nominales del arreglo fotovoltaico completo se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del arreglo fotovoltaico total

Característica	Especificación
Configuración eléctrica	2 bloques en paralelo de 7 paneles en serie
Número total de módulos	14 paneles Orion PV008
Potencia máxima total (Pmax)	5,320 W (5.32 kW)
Voltaje en circuito abierto (Voc)	338.8 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	19.90 A
Voltaje a máxima potencia (Vmp)	275.45 V
Corriente a máxima potencia (Imp)	19.32 A

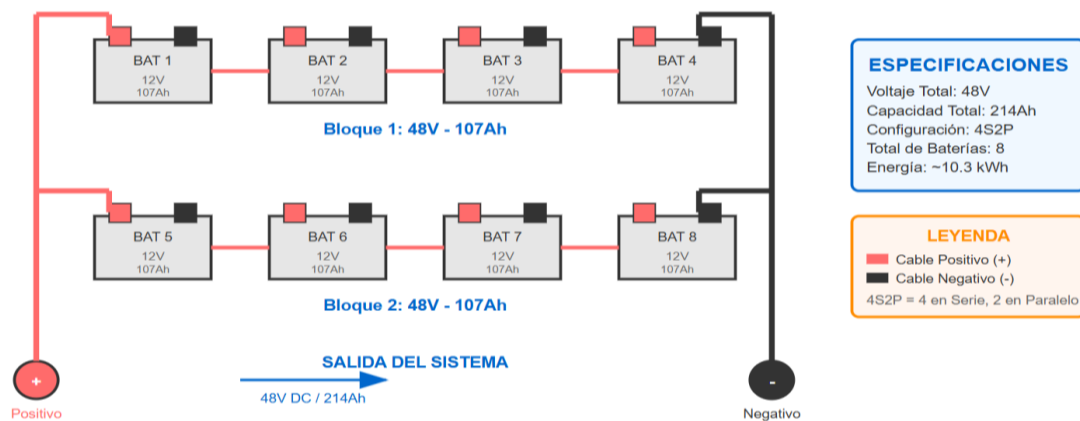
Elaborado por Luiggy Herbas

4.1.2.2. Control y almacenamiento

4.1.2.2.1. Banco de baterías

Este sistema utiliza 8 baterías de 12V/107Ah organizadas en dos bloques idénticos conectados en paralelo. Como se observa en la figura 9, cada bloque contiene 4 baterías conectadas en serie, manteniendo la capacidad de 107Ah. La conexión en paralelo entre ambos bloques duplica la capacidad total a 214Ah mientras conserva el voltaje de 48V. Esta configuración 4S2P (4 en Serie, 2 en Paralelo) proporciona mayor autonomía energética.

Figura 9. Diagrama del banco de baterías



Elaborado por Luiggy Herbas

La implementación física del sistema muestra las 8 baterías instaladas en bastidores metálicos con distribución optimizada del espacio. Los cables de interconexión de alta capacidad (rojo para positivo, negro para negativo) están estratégicamente enrutados para minimizar resistencias y facilitar el mantenimiento. El montaje en estructura metálica garantiza estabilidad mecánica.

Figura 10. Banco de baterías del sistema fotovoltaico utilizado para almacenamiento de energía



Elaborado por Luiggy Herbas

4.1.2.2.2. Inversor

El sistema utiliza un inversor híbrido POWEST de 6 kVA (6000 W) de onda senoidal pura como se observa en la figura 11. diseñado para la conversión de corriente continua (DC) proveniente de los paneles solares en corriente alterna (AC), garantizando compatibilidad con equipos eléctricos convencionales. El dispositivo soporta un rango de tensión de entrada fotovoltaica de 120–450 Vdc, con una tensión máxima de 450 Vdc, e incorpora un seguidor MPPT (120–430 Vdc) que optimiza el aprovechamiento de la radiación solar.

Figura 11. Inversor híbrido instalado en el sistema fotovoltaico



Elaborado por Luiggy Herbas

En la salida AC entrega 110/220 Vac, con un factor de potencia unitario y frecuencia de 50/60 Hz. Además, integra un sistema de carga para banco de baterías de 48 Vdc, con capacidad máxima de carga de 100 A, lo que permite tanto la operación en conexión a red como el respaldo mediante almacenamiento. Su rango de operación térmica de -10°C a 55°C , junto con un grado de protección IP21 y clase de protección I, aseguran confiabilidad en ambientes variables.

Tabla 5. Características técnicas del inversor híbrido para sistema fotovoltaico

Característica	Descripción
Marca	POWEST – NUHIB-7565
Tipo de inversor	Híbrido
Potencia nominal	6000 W / 6 kVA

Rango de entrada (PV)	120 – 450 Vdc
Rango MPPT	120 – 430 Vdc
Corriente de cortocircuito (Isc PV)	27 A
Tensión de salida (AC)	110 / 220 Vac
Capacidad del cortocircuito	6 kA

Elaborado por Luiggy Herbas

4.1.2.3. Cargas

4.1.2.3.1. Tablero de control

La energía convertida es distribuida a través de un tablero de control como se observa en la figura 12. gestiona la conmutación automática y el funcionamiento secuencial de cuatro bombas centrífugas del sistema de irrigación. El sistema integra bombas con diferentes especificaciones de voltaje (120 V y 220 V) para optimizar el consumo energético según los requerimientos específicos de fertirriego y riego convencional.

Figura 12. Tablero de control



Elaborado por Luiggy Herbas

4.1.2.3.2. Bombas

Se identificaron las cargas eléctricas finales del sistema, constituidas por cuatro bombas centrífugas encargadas de alimentar los sistemas de riego y fertirriego del invernadero ecológico. Mediante la inspección en sitio de los equipos, se determinó que el sistema integra dos (2) bombas operando a 120 V destinadas al fertirriego de precisión con soluciones

nutritivas, y dos (2) bombas adicionales funcionando a 220 AhV para el riego convencional de mayor caudal. Esta configuración dual permite optimizar el consumo energético según los requerimientos específicos de cada aplicación agrícola. Las especificaciones técnicas completas de los modelos representativos se obtuvieron de las fichas técnicas de fabricante.

Tabla 6. Especificaciones técnicas de las bombas centrífugas

Característica	Bomba de fertirriego (120 V)	Bomba de riego (220 V)
Modelo	WMCM158h	WMCM200h
Marca	PEDROLLO	PEDROLLO
Tipo	Centrífuga monoetapa	Centrífuga monoetapa
Potencia nominal	1 CV (735 W)	2 CV (1470 W)
Voltaje nominal	120V AC $\pm$ 10%	220V AC $\pm$ 10%
Frecuencia	60 Hz	60 Hz
Corriente nominal	8.2 A	8.9 A
Caudal máximo	110 L/min (6,600 L/h)	233 L/min (14,000 L/h)
Diámetro de succión	1" BSP	1.5" BSP
Diámetro de descarga	1" BSP	1" BSP
pH del líquido	6 - 8	6 – 8
Peso	11.6 kg	21.5 kg

Elaborado por Luiggy Herbas

4.1.3. Datos eléctricos y energéticos del sistema

En el análisis realizado se obtuvieron mediciones mediante el dispositivo MT61GP, el cual registra internamente los parámetros eléctricos para su posterior lectura. Estas lecturas permiten observar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de operación, especialmente durante la activación de las bombas de riego y fertirriego. La siguiente tabla resume los parámetros más representativos identificados durante los periodos de observación.

Tabla 7. Resumen de datos energéticos y tensión de fase del sistema fotovoltaico

Dato energético		Valor	Tensión de fase	Valor
Energía activa consumida		102.99 kWh	Voltaje fase A	110.8 V
Potencia reactiva consumida		108.22 kVArh	Voltaje fase B	110.3 V
Corriente		7.68A	Voltaje fase C	109.3 V
Factor de potencia		1.000	Voltaje línea AB	219.3 V
Frecuencia		59.95 Hz	Voltaje línea BC	0.0 V
Energía reactiva		24 KVArh	Voltaje fase CB	219.1 V

Elaborado por Luiggy Herbas

Desde el punto de vista eléctrico, los valores de tensión por fase se encuentran dentro de rangos aceptables (110.3–110.8 V), lo que indica una buena calidad de suministro en cada línea. Sin embargo, la lectura cero en la línea BC (ausente en la tabla por estar fuera de operación) podría estar indicando que el sistema no está utilizando una de las fases del suministro trifásico.

El factor de potencia registrado fue 1.000, lo que demuestra que no hay presencia de cargas inductivas importantes y que la potencia reactiva se mantiene bajo control. Este equilibrio, junto con la frecuencia de 59.95 Hz, garantiza una operación eficiente del inversor y estabilidad en la entrega de energía a las cargas conectadas. En cuanto al consumo energético, el sistema consume 102.99 kWh por día en promedio. Multiplicando este valor por los 22 días laborales, el consumo estimado de energía activa para el mes completo sería de 2,265.78 kWh.

4.1.4. Verificación de Dispositivo MT61GP

El dispositivo MT61GP cumple la función de recolectar en tiempo real los principales parámetros eléctricos del sistema fotovoltaico. Estos datos se obtienen directamente desde el tablero de distribución del invernadero ecológico, permitiendo un monitoreo constante del rendimiento del sistema. Gracias a su servidor integrado, la información queda registrada de forma automática y accesible para su análisis, sin necesidad de intervención manual o equipos externos adicionales.

Figura 13. Dispositivo MT61GP.



Elaborado por Luiggy Herbas

Las especificaciones técnicas del dispositivo MT61GP confirman su capacidad para realizar mediciones de alta precisión y proporcionar protecciones eléctricas integrales al sistema fotovoltaico. Este sistema integrado combina funciones de medición inteligente, protección eléctrica y comunicación en un solo dispositivo, optimizando el espacio de instalación y simplificando la arquitectura del sistema de monitoreo. Las características técnicas principales del equipo se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8. Especificaciones técnicas del dispositivo MT61GP

Característica	Especificación
Voltaje de medición	230V / 400V
Corriente máxima	80 ^a
Frecuencia	50/60Hz ±10%
Precisión voltaje/corriente	±0.50%
Precisión potencia activa	±1.00%
Precisión energía activa	±1.00%
Protección IP	IP40
Temperatura operativa	-15°C a +55°C
Comunicación	RS485, Modbus
Protecciones integradas	Sobretensión, subtensión, sobre corriente, pérdida de fase

Elaborado por Luiggy Herbas

4.1.5. Análisis de las magnitudes eléctricas del sistema

El análisis de la situación actual se fundamentó en el análisis estadístico de las magnitudes eléctricas que definen el estado operativo del sistema fotovoltaico. Los datos fueron recolectados durante un periodo de 10 días, comprendido entre el 4 y 8 de agosto y el 11 y 15 de agosto, mediante mediciones en intervalos de dos horas en horarios matutinos y vespertinos. Esta metodología permitió establecer una línea base para evaluar la condición y el rendimiento de la instalación bajo diferentes condiciones operativas.

Tabla 9. Resumen de parámetros eléctricos y operativos observados

Parámetro	Valor Registrado
Rango de Tensión de Fase	109.3 V – 110.8 V
Frecuencia del Sistema	59.95 Hz
Factor de Potencia	1.000
Consumo Energético Promedio	102.99 kWh/día
Capacidad Nominal de Generación	5.32 kW
Demanda Máxima de Carga	1470 W (Bomba de riego)

Elaborado por Luiggy Herbas

4.1.5.1. Suministro Eléctrico

Los valores registrados para las fases se encuentran en un rango estable y aceptable, entre 109.3 V y 110.8 V, lo cual es indicativo de una excelente regulación por parte del inversor híbrido. Esta estabilidad es crucial para el correcto funcionamiento de las cargas conectadas, específicamente las bombas centrífugas del sistema de riego. De igual manera, la frecuencia se mantiene firme en 59.95 Hz, un valor prácticamente ideal que asegura la compatibilidad y el rendimiento óptimo de los equipos eléctricos alimentados por el sistema fotovoltaico.

4.1.5.2. Rendimiento energético

Un parámetro clave del rendimiento fue el factor de potencia, registrado con un valor unitario de 1.000, lo que minimiza la potencia reactiva y optimiza la capacidad de corriente del sistema. Esto confirmó la alta eficiencia operativa de las cargas. El sistema, con una

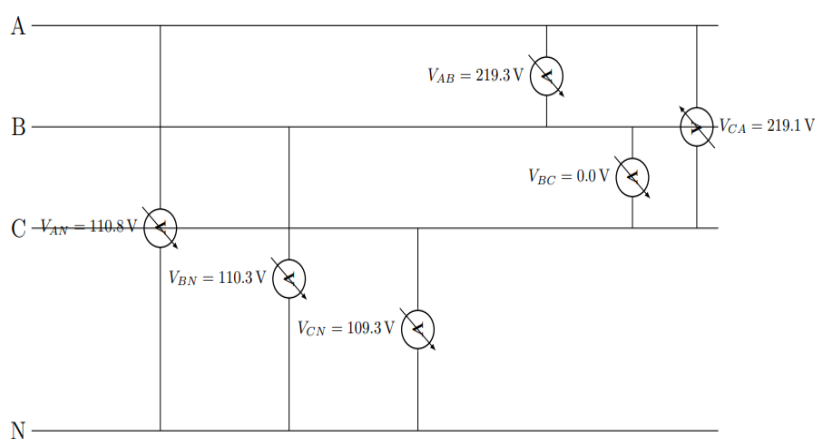
capacidad de generación nominal de 5.32 kW, gestionó un consumo energético promedio de 102.99 kWh, evidenciando una carga de trabajo significativa. Se concluyó que el sistema fotovoltaico opera dentro de sus parámetros eléctricos nominales, estableciendo una línea base de funcionalidad óptima para el posterior análisis de comportamiento.

El análisis de las magnitudes eléctricas estáticas concluye que el sistema fotovoltaico del invernadero ecológico opera dentro de parámetros eléctricos nominales. La instalación es robusta y la gestión de la potencia es correcta. Esta condición de normalidad funcional es el punto de partida esencial sobre el cual se realiza el análisis subsecuente de los patrones de comportamiento del sistema.

4.1.5.3. Identificación de la configuración eléctrica del sistema

Un análisis más profundo de los parámetros eléctricos permitió identificar que la instalación no opera en una configuración trifásica, a pesar de utilizar un medidor de este tipo. En cambio, el sistema corresponde a una topología monofásica de tres hilos, también conocida como fase dividida. Esto se evidencia en la figura 14 en el diagrama de mediciones de voltaje eficaz.

Figura 14. Mediciones de voltaje eficaz del sistema de fase dividida



Elaborado por Luiggy Herbas

El diagrama anterior muestra visualmente las relaciones de tensión entre las fases A, B, C y el neutro (N). Para un análisis más claro, se resumen numéricamente en la Tabla 10 donde los valores clave demuestran la configuración de fase dividida.

Tabla 10. Evidencia de configuración monofásica de tres hilos (Fase dividida)

Parámetro Medido	Valor eficaz
Tensión Fase A-N (V_AN)	110.8 V
Tensión Fase C-N (V_CN)	109.3 V
Tensión Línea B-C (V_BC)	0.0 V

Elaborado por Luiggy Herbas

En cambio, el sistema corresponde a una topología monofásica de tres hilos (fase dividida). Como se detalla en la tabla, la Fase B presenta valores de tensión y corriente cercanos a cero, indicando que no está en uso, mientras que las Fases A y C actúan como las dos líneas activas (L1 y L2). Esta configuración provee tanto 110 V (fase-neutro) para las cargas menores, como 220 V (fase-fase) para la bomba de mayor potencia. Esto es perfectamente consistente con las cargas del invernadero.

4.1.6. Patrones de comportamiento del sistema

La investigación abordó la observación de los patrones de comportamiento para comprender la interacción entre la generación y el consumo. Este análisis se enfocó en revelar las características que definieron el perfil operativo del sistema y las oportunidades existentes para su optimización.

4.1.6.1. Patrón de consumo

El primer patrón observado fue el del consumo energético, cuyo comportamiento estuvo directamente relacionado por las necesidades agrícolas del invernadero, resultando en un perfil de carga marcadamente intermitente y discontinuo.

El análisis de datos reveló que la activación de las bombas, por su naturaleza inductiva, generó significativos transitorios de corriente. La Tabla 11 resume estos eventos, presentando los valores más representativos de corriente registrados durante los instantes de arranque de la bomba y evidenciando el impacto que generan sobre el perfil de consumo del sistema.

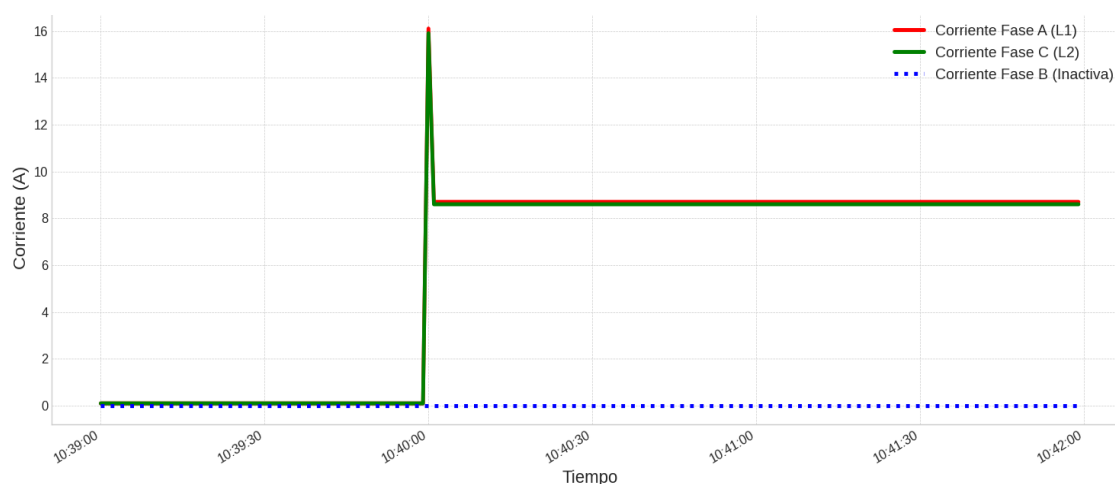
Tabla 11. Caracterización del transitorio de corriente de carga

Parámetro	Valor Registrado
Corriente de Arranque (Pico)	16.1 A
Corriente de Operación (Estable)	8.7 A
Factor de Sobrecarga de Corriente	1.85

Elaborado por Luiggy Herbas

Como se detalla, el pico de corriente en el arranque alcanzó los 16.1 A, representando un factor de sobrecarga de 1.85, es decir, un 85% más que la corriente de operación en estado estable de 8.7 A. Este comportamiento como se observa en la figura 15. define el perfil de consumo como una demanda basal, interrumpido por eventos programados de alta exigencia transitoria.

Figura 15. Corriente por fase durante el arranque de carga



Elaborado por Luiggy Herbas

4.1.6.2. Patrón de generación

En contraposición, se observó que el patrón de generación de energía fue predecible, siguiendo la naturaleza del recurso solar. Su comportamiento fue diurno y su producción, inherentemente suave y cíclica, dependió directamente de la irradiancia solar. Se constató que la producción iniciaba con la salida del sol, alcanzaba su punto de máxima potencia cercano a la capacidad nominal del arreglo de 5.32 kW al mediodía, y finalizaba al atardecer.

4.1.6.3. Balance de carga entre generación y consumo

La correlación de estos dos perfiles opuestos reveló la principal característica del sistema: un evidente desbalance temporal. Se infirió que los periodos de alta demanda de los sistemas de riego, por prácticas agrícolas, ocurrirían en horarios matutinos o vespertinos, momentos en que la curva de generación fotovoltaica no se encontraba en su punto de máxima potencia. Este desfase entre la disponibilidad del recurso y la demanda fue el patrón más crítico identificado en el diagnóstico. Como consecuencia, la operación implicó una alta dependencia cíclica del banco de baterías de 48 V para suplir los déficits de generación.

Esta dependencia representó una ineficiencia en el flujo energético directo sol carga y sometió a las baterías a ciclos de descarga más exigentes. Se constató que la activación de cargas de alta potencia durante periodos de baja irradiancia solar inducía caídas de tensión. Este fenómeno, que evidencia el estrés al que es sometido el banco de baterías, se cuantifica en la Tabla 12.

Tabla 12. Análisis del evento de carga

Parámetro Eléctrico	Valor de observación
Tensión Nominal Previa (RMS)	110.8 V
Tensión Mínima Durante el Evento (RMS)	107.5 V
Caída de Tensión (Sag)	3.3 V

Elaborado por Luiggy Herbas

4.1.7. Discusión

La caracterización del sistema fotovoltaico reveló una instalación funcional con arreglo de 14 paneles solares de 380 W cada uno, distribuidos en una configuración eléctrica de dos cadenas paralelas de siete módulos en serie. Los datos energéticos registrados por el dispositivo MT61GP confirmaron un consumo activo promedio de 102.99 kWh, lo que representa un aprovechamiento adecuado del sistema considerando las condiciones operativas del invernadero. Las tensiones por fase mantuvieron valores estables entre 109.3-110.8 V con factor de potencia unitario, indicando operación eficiente sin presencia significativa de cargas reactivas en el sistema de bombeo.

Los resultados obtenidos son consistentes con los reportados por Baculima y Raiban [29], quienes también implementaron sistemas de caracterización previos a la instalación de monitoreo IoT. Sin embargo, a diferencia de su estudio que abordó un sistema en desuso con degradación significativa, el presente sistema opera bajo condiciones funcionales normales. La metodología de levantamiento técnico coincide con la aplicada por Corominas y Grebneva [30], aunque nuestro análisis se enfoca en la ausencia total de infraestructura de monitoreo, mientras que ellos evaluaron limitaciones de sistemas existentes.

La principal limitación identificada fue una evidente desalineación operativa. Se observó que la alta demanda energética, dictada por las necesidades de riego en horarios matutinos o vespertinos, no coincidió con el período de máxima generación solar al mediodía. Esta falta de sincronización obliga a una dependencia intensiva del banco de baterías, representando la principal ineficiencia del sistema. La ausencia de un sistema automatizado y de datos históricos impide la optimización de los ciclos de consumo para corregir este desfase y mejorar el rendimiento.

Estos resultados establecen la línea base técnica justificando la necesidad de implementar un sistema de monitoreo remoto para el sistema fotovoltaico caracterizado. La identificación de parámetros eléctricos nominales y la configuración operativa actual proporcionan los criterios de diseño fundamentales para la selección de sensores y protocolos de comunicación adecuados. La caracterización completa del sistema permite definir rangos de operación normal, elemento crucial para el desarrollo de algoritmos de supervisión inteligente que optimicen la gestión energética del invernadero ecológico.

4.2. Diseño del sistema de monitoreo

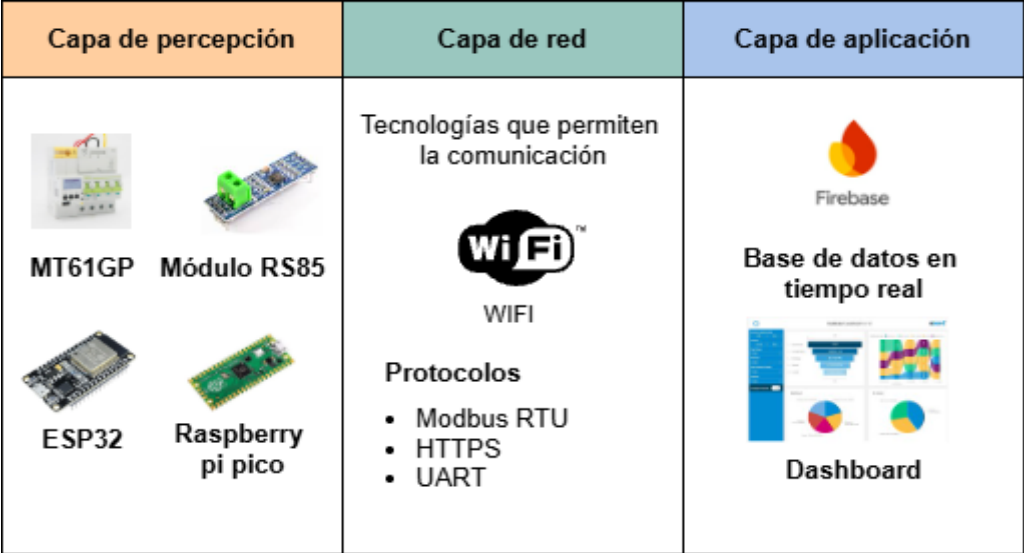
El diseño del sistema de monitoreo establece una estructura clara que permita organizar cómo se capturan, procesan y transmiten los datos eléctricos del sistema fotovoltaico. Para ello, se definió una arquitectura de comunicación que integra los componentes electrónicos y los protocolos necesarios para garantizar un flujo de datos continuo. A partir de esta base, se detalla la arquitectura IoT empleada y el funcionamiento de cada una de sus capas.

4.2.1. Arquitectura de comunicación IoT

El diseño del sistema de comunicación se estructura mediante una arquitectura multicapa que organiza la transmisión de datos desde el dispositivo de medición hasta la plataforma de visualización. Esta estructura permite separar cada función del sistema medición,

comunicación y presentación de la información, facilitando su comprensión, mantenimiento y posible ampliación. La figura 16 muestra las tres capas que conforman la arquitectura implementada:

Figura 16. Arquitectura de comunicación IoT



Elaborado por Luiggy Herbas

Esta arquitectura integra desde la captura física de datos hasta su presentación final al usuario, asegurando un flujo de información coherente y seguro. A continuación, se detalla la función de cada una de las capas.

4.2.1.1. Capa de Percepción

Esta capa constituye la base física del sistema y es responsable de la adquisición de datos directamente del entorno. Está compuesta por el dispositivo MT61GP, que captura magnitudes eléctricas del sistema fotovoltaico. La información transmitida a través de un módulo RS-485, que asegura una comunicación robusta y resistente a interferencias. Finalmente, el sistema embebido Raspberry Pi Pico actúa como la unidad central de procesamiento en esta capa, gestionando la recolección de datos y preparándolos para su envío a la siguiente etapa del sistema de monitoreo.

4.2.1.2. Capa de Red

La capa de red es la encargada de la transmisión de datos desde la capa física hasta la nube. Este proceso se divide en dos etapas principales. En primer lugar, se establece una comunicación local mediante el protocolo Modbus RTU (Unidad Terminal Remota) sobre una interfaz física RS-485. El módulo conversor RS-485–UART (Transmisor/Receptor

Asíncrono Universal) adapta esta señal para ser interpretada por el puerto serie de la Raspberry Pi Pico, permitiendo que el microcontrolador reciba y decodifique correctamente los registros enviados por el dispositivo MT61GP. Posteriormente, los datos procesados se envían a internet mediante conectividad Wi-Fi a través del ESP32, permitiendo su transferencia continua hacia la plataforma de almacenamiento en la nube.

4.2.1.3. Capa de Aplicación

Una vez que los datos llegan a la nube, la capa de aplicación se encarga de su procesamiento, gestión y visualización. La información se administra en Firebase, una base de datos NoSQL en tiempo real que facilita un almacenamiento eficiente y escalable de los registros obtenidos del sensor. En esta etapa también se implementan mecanismos de seguridad como el uso de protocolos HTTPS, que garantizan la integridad y confidencialidad de los datos durante la interacción entre la plataforma y la interfaz del usuario. Finalmente, los datos almacenados se transforman en información comprensible mediante un dashboard web que presenta gráficos, indicadores y tablas que permiten el monitoreo remoto, el análisis del rendimiento y la toma informada de decisiones.

4.2.2. Diseño de hardware

El diseño de hardware constituye la base física del sistema de monitoreo, integrando los componentes encargados de la adquisición, procesamiento y transmisión de los datos. En esta sección establece los criterios técnicos para seleccionar los sistemas embebidos, las interfaces de comunicación y los módulos necesarios para asegurar un funcionamiento estable y compatible con el dispositivo MT61GP. A partir de esta base, se presenta la estructura electrónica que sostiene el funcionamiento del sistema y garantiza la fiabilidad del proceso de monitoreo.

4.2.2.1. Selección de tecnologías

La selección de la unidad de procesamiento central constituye un factor crítico para garantizar el rendimiento del sistema IoT. Se evaluaron diferentes tipos de sistemas embebidos considerando criterios de capacidad de procesamiento, conectividad, eficiencia energética y compatibilidad con los protocolos de comunicación requeridos. Esta evaluación permitió identificar la combinación de dispositivos que mejor se ajustaba a las necesidades del invernadero y al flujo de datos del sistema fotovoltaico.

Tabla 13. Comparación de sistemas embebidos para el sistema de monitoreo.

Fabricante	Modelo	Características principales
Raspberry Pi Foundation	Raspberry Pi Pico	ARM Cortex-M0+, 133 MHz, 264 KB RAM, bajo consumo
Arduino	Arduino Uno R3	ATmega328P, 16 MHz, 2 KB RAM, fácil programación.
Espressif	ESP32	Dual-core, 240 MHz, 520 KB RAM, conectividad Wi-Fi/Bluetooth integrada
Microchip	PIC18F4550	8-bit, 48 MHz, 2 KB RAM, USB nativo
STMicroelectronics	STM32F103	ARM Cortex-M3, 72 MHz, 20 KB RAM, periféricos avanzados

Elaborado por Luigy Herbas

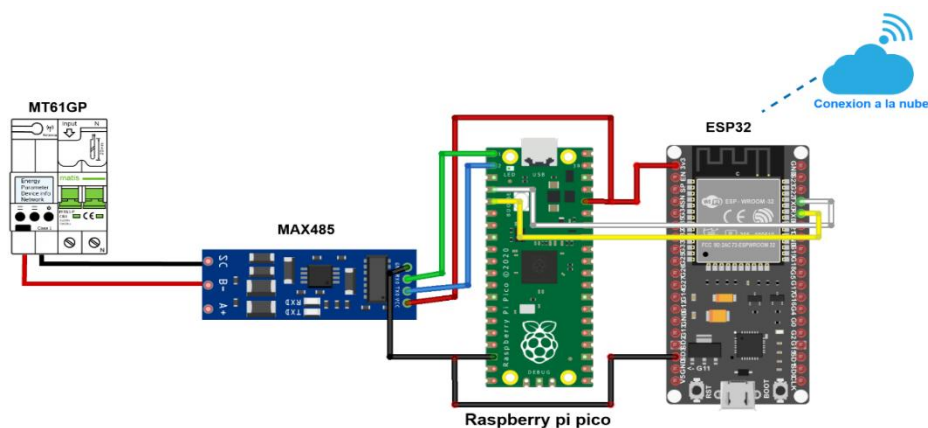
El sistema implementa dos sistemas embebidos con roles claramente diferenciados. La Raspberry Pi Pico, con gestión de comunicación serie UART (Receptor/Transmisor Asíncrono Universal), maneja eficientemente el protocolo Modbus RTU mediante interfaz RS-485 [55], mientras el ESP32 se dedica a la conectividad inalámbrica y sincronización con la base de datos en la nube.

Para la conectividad inalámbrica se seleccionó el ESP32, cuya versatilidad, bajo costo y eficiencia energética han sido validadas en estudios recientes [54]. Su arquitectura SoC (Sistema en un Chip) integra conectividad Wi-Fi nativa, eliminando necesidad de módulos externos como los requeridos en soluciones GSM (Sistema Global para las Comunicaciones Móviles). Esta decisión se fundamenta en la ubicación del invernadero dentro del campus universitario, donde la infraestructura de red inalámbrica institucional existente permite aprovechar conectividad estable sin costos operativos recurrentes asociados a planes de datos móviles que demandaría tecnología como la GSM o GPRS (Servicio General de Paquetes vía Radio).

4.2.2.2. Esquema de conexión del sistema electrónico

La topología de conexión establece la ruta de los datos desde su origen en el medidor industrial hasta su destino final en la nube, integrando interfaces de comunicación serie, conversores de protocolo y microcontroladores especializados. Como se presenta en la Figura 17, el sistema implementa una configuración dual que aprovecha las capacidades complementarias del ESP32 y la Raspberry Pi Pico, garantizando flexibilidad operativa y redundancia en la arquitectura de adquisición de datos del sistema fotovoltaico del invernadero.

Figura 17. Diagrama del circuito del dispositivo



Elaborado por Luiggy Herbas

El esquema establece el flujo de comunicación desde el dispositivo MT61GP hasta su publicación en la nube, asignando al ESP32 el rol de unidad central de conectividad y transmisión remota. No obstante, la adquisición de datos no se realiza directamente desde este módulo, sino a través de la Raspberry Pi Pico, la cual se conecta al convertor MAX485 para gestionar la comunicación bidireccional basada en el protocolo RS-485.

La Raspberry Pi Pico ejecuta la comunicación Modbus RTU mediante peticiones periódicas al MT61GP, recibiendo como respuesta tramas que contienen los valores de las magnitudes eléctricas codificados en registros hexadecimales. El microcontrolador decodifica estos registros aplicando conversiones numéricas según las especificaciones del protocolo, extrayendo valores de voltaje, corriente, potencia y frecuencia. Posteriormente, estructura esta información en formato JSON, organizando cada magnitud como par clave-valor identificable, lo que facilita su interpretación por el ESP32 y su posterior almacenamiento en Firebase sin transformaciones adicionales.

La conectividad Wi-Fi integrada del ESP32 permite que, una vez validados, estos datos sean sincronizados con la base de datos en la nube sin necesidad de módulos de comunicación adicionales. En esta configuración, la Raspberry Pi Pico también actúa como dispositivo de respaldo, garantizando la continuidad de la recolección de datos ante pérdidas temporales de conectividad o en escenarios de despliegue alternativos.

4.2.2.3. Interfaz física de comunicación

La selección de RS-485 para la extracción de datos del dispositivo MT61GP se fundamenta en la compatibilidad nativa del equipo con este estándar de comunicación industrial. El estándar RS-485 ofrece ventajas técnicas superiores para entornos agrícolas, incluyendo comunicación diferencial inmune a interferencias electromagnéticas, capacidad de transmisión a distancias de hasta 1200 metros y soporte para múltiples dispositivos en un mismo bus. Como se muestra en la Figura 18, Esta configuración permite establecer un enlace confiable entre el MT61GP y la unidad de procesamiento Raspberry Pi, facilitando la extracción de datos almacenados y transmisión a la base de datos en tiempo real.

Figura 18. Cableado de conexión al dispositivo MT61GP.



Elaborado por Luiggy Herbas

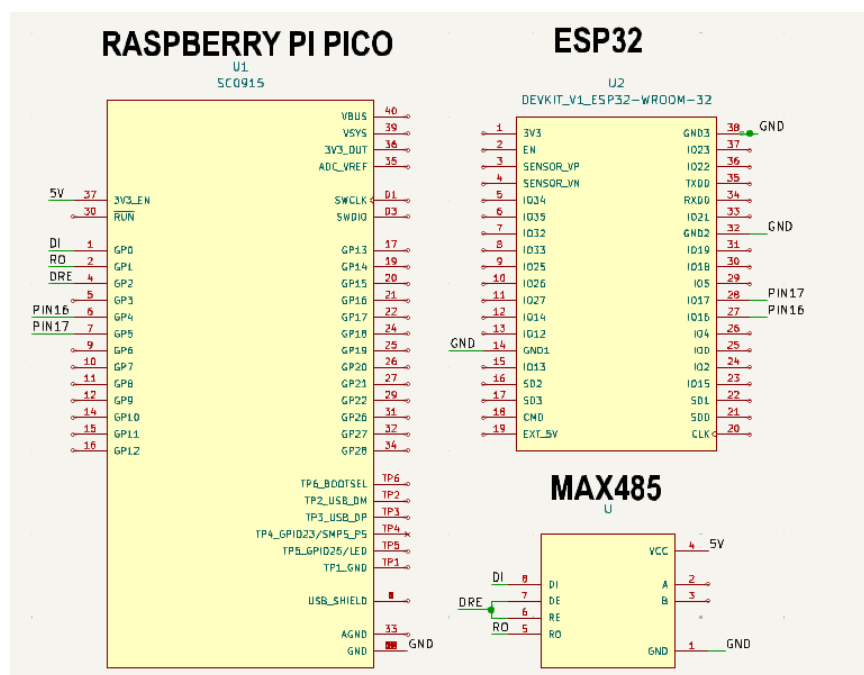
4.2.3. Diseño de la PCB

Para la transición del prototipo hacia una solución más robusta y profesional, se desarrolló un circuito impreso utilizando KiCad 8, una plataforma de diseño electrónico de código abierto ampliamente adoptada en la industria. Esta herramienta permitió materializar el diseño esquemático en un layout físico optimizado, mejorando significativamente la confiabilidad del sistema frente a las conexiones provisionales del prototipo inicial.

4.2.3.1. Esquemático del circuito

El desarrollo del circuito impreso inició con la definición del esquemático electrónico que establece las interconexiones entre componentes. Este diagrama especifica las conexiones lógicas del sistema, identificando cada elemento mediante referencias únicas y valores nominales. Como muestra la Figura 19, el esquema integra la Raspberry Pi Pico como unidad de comunicación Modbus, el ESP32 para conectividad Wi-Fi y el módulo MAX485 como interfaz RS-485. El diseño contempla las alimentaciones requeridas, líneas de datos y conexiones de tierra necesarias para el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo.

Figura 19. Diagrama lógico del dispositivo



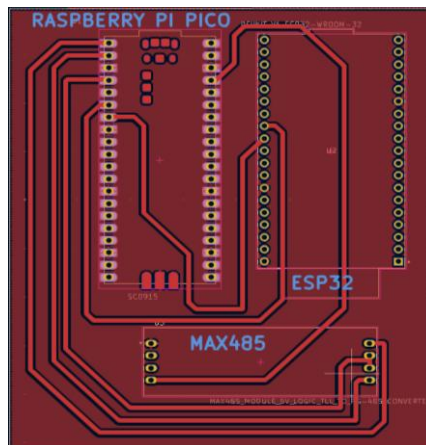
Elaborado por Luiggy Herbas

El esquemático representa la arquitectura eléctrica completa del dispositivo, donde cada componente cumple una función específica dentro del flujo de comunicación. La Raspberry Pi Pico gestiona la lectura Modbus RTU mediante sus pines GPIO configurados como UART (, mientras el ESP32 procesa y transmite los datos hacia Firebase. El módulo MAX485 actúa como convertor de niveles, adaptando las señales TTL (Lógica Transistor-Transistor) del microcontrolador al estándar diferencial RS-485 requerido por el medidor MT61GP. Las conexiones de alimentación se distribuyen desde una fuente única de 5V, garantizando estabilidad operativa del sistema completo.

4.2.3.2. Enrutamiento y consideraciones de diseño

La etapa de enrutamiento transformó el esquemático en un diseño físico de circuito impreso, optimizando la disposición espacial de componentes. El layout se desarrolló considerando criterios de minimización de interferencias electromagnéticas y eficiencia en el uso del espacio disponible. Como se observa en la Figura 20, el diseño implementa una configuración de capa simple con plano de tierra continuo en la cara inferior.

Figura 20. Enrutamiento de la PCB del sistema de monitoreo



Elaborado por Luiggy Herbas

El enrutamiento optimiza el flujo de señales mediante la ubicación estratégica de los componentes, reduciendo longitudes de pista y cruces innecesarios. Se maximizaron las áreas de cobre en zonas críticas para mejorar la disipación térmica y las referencias de tierra. El diseño incluye puntos de prueba accesibles para facilitar la validación y mantenimiento, asegurando una mayor confiabilidad operativa frente a protoboards convencionales.

4.2.3.3. Validación del diseño (DRC y ERC)

Previo a la fabricación, el diseño fue sometido a verificaciones automatizadas para garantizar su viabilidad de manufactura y corrección eléctrica. Se ejecutó la verificación de reglas de diseño DRC (Verificación de Reglas de Diseño) en KiCad, validando parámetros geométricos como ancho mínimo de pistas, separación entre conductores y dimensiones de perforaciones. Complementariamente, la verificación de reglas eléctricas ERC (Verificación de Reglas Eléctricas) del esquemático detectó errores lógicos como conexiones flotantes, cortocircuitos potenciales o alimentaciones incorrectas. Ambas validaciones arrojaron resultados satisfactorios, certificando la integridad técnica del diseño antes del envío a producción.

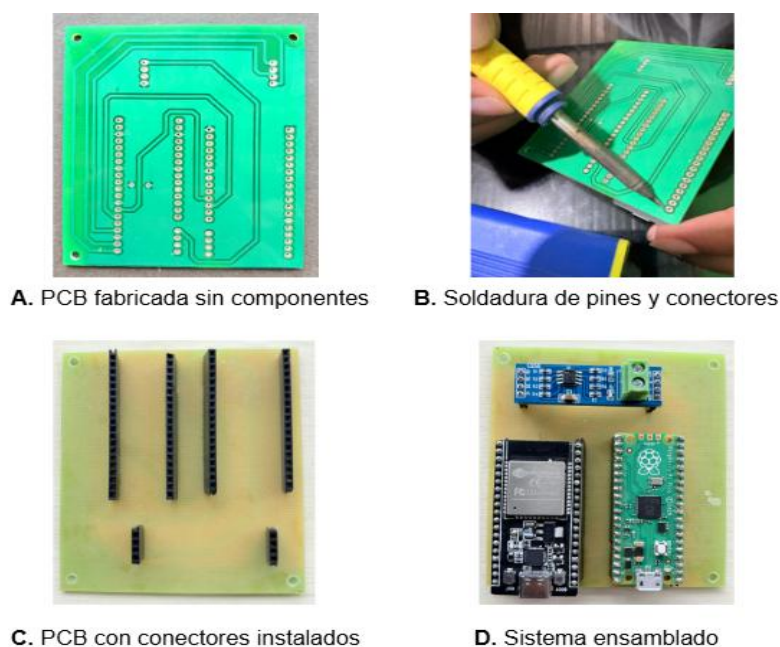
4.2.4. Ensamblaje del sistema de monitoreo

El ensamblaje del sistema de monitoreo integra los componentes electrónicos previamente seleccionados en una estructura funcional capaz de operar de manera continua dentro del invernadero. Este apartado expone de forma general la disposición física del hardware y las conexiones esenciales entre los sistemas embebidos e interfaces de comunicación, con el fin de garantizar una implementación estable, segura y adecuada para el entorno de trabajo.

4.2.4.1. Proceso de ensamblaje de componentes

El ensamblaje del sistema se ejecutó mediante un procedimiento secuencial que garantizó la correcta integración de todos los componentes electrónicos sobre la PCB (Placa de Circuito Impreso) fabricada con máscara antisoldante verde para protección de pistas. El proceso inició con la soldadura de headers y conectores base, continuó con la verificación de continuidad eléctrica y finalizó con el montaje de los módulos principales. Como se observa en la figura 21, la secuencia incluyó cuatro etapas críticas: recepción de la PCB (Placa de Circuito Impreso), soldadura de pines y conectores, instalación de bases para microcontroladores y acoplamiento del ESP32, Raspberry Pi Pico y módulo MAX485.

Figura 21. Proceso de ensamblaje del dispositivo



Elaborado por Luiggy Herbas

El proceso de ensamblaje priorizó la soldadura de componentes de menor altura progresando hacia los módulos de mayor perfil, técnica que facilita el acceso y previene daños por

sobrecalentamiento. Los pines se soldaron utilizando cautín de temperatura controlada para asegurar uniones firmes sin comprometer las pistas de cobre adyacentes. Posteriormente, se instalaron sockets para los microcontroladores, permitiendo reemplazo o mantenimiento sin desoldar. La configuración final integró todos los módulos verificando polaridades correctas y alineación física, resultando en un sistema robusto listo para validación funcional.

4.2.4.2. Pruebas de funcionalidad del hardware

Una vez completado el ensamblaje, se implementó un protocolo de validación para verificar el correcto funcionamiento de cada subsistema del dispositivo. Las pruebas abarcaron desde la verificación básica de conexiones eléctricas hasta la validación completa de la cadena de comunicación con el medidor inteligente. Como se detalla en la secuencia de validación, el proceso incluyó pruebas de continuidad eléctrica, verificación de la interfaz RS-485, establecimiento de conectividad Wi-Fi y finalmente la lectura exitosa de registros Modbus desde el dispositivo MT61GP, confirmando la operatividad integral del sistema de monitoreo.

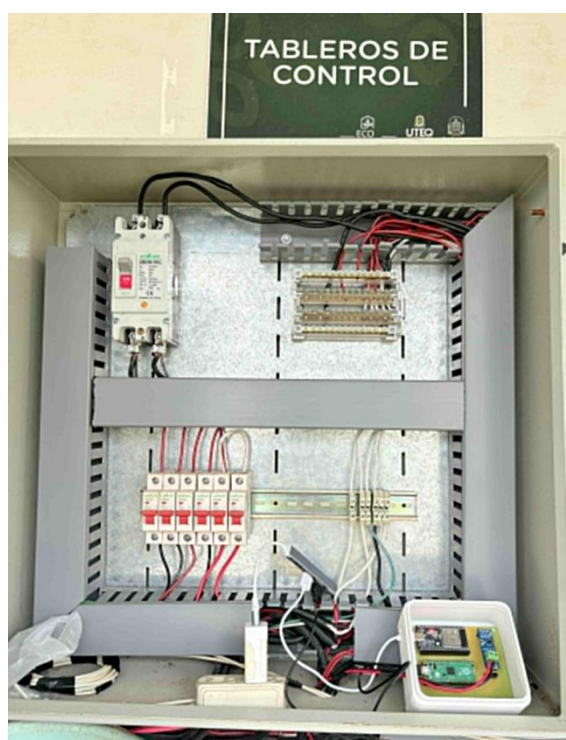
La primera fase consistió en pruebas de continuidad utilizando multímetro digital, verificando ausencia de cortocircuitos entre pistas y correcta conexión de alimentación a cada módulo. Posteriormente se validó la comunicación RS-485 mediante la configuración de parámetros Modbus RTU (9600 baudios, 8N1) y la transmisión de tramas de prueba hacia el MT61GP.

La conectividad Wi-Fi se confirmó mediante la asociación exitosa del ESP32 a la red local y la transmisión de paquetes de prueba hacia Firebase. Finalmente, se ejecutó la lectura completa de registros eléctricos del medidor, verificando la integridad de datos y la sincronización temporal, consolidando así la funcionalidad completa del prototipo implementado.

4.2.5. Implementación en el invernadero ecológico

El despliegue del sistema se realizó en el invernadero ecológico del campus "La María", marcando la transición del prototipo hacia una herramienta operativa integrada al entorno productivo. La instalación se realizó dentro del tablero de control existente. Como se muestra en la Figura 22, el dispositivo se montó estratégicamente para facilitar las conexiones físicas con el medidor MT61GP mediante interfaz RS-485, permitiendo el inicio inmediato de la captura de magnitudes eléctricas en condiciones operativas reales del invernadero.

Figura 22. Implementación del prototipo en el invernadero



Elaborado por Luiggy Herbas

Las conexiones RS-485 respetaron polaridades correctas (A y B) y se verificó la continuidad del bus de comunicación hasta el MT61GP. La configuración de red Wi-Fi se ajustó para garantizar señal estable considerando la estructura metálica del invernadero. Tras la puesta en marcha, el sistema inició la transmisión continua de datos hacia Firebase, validando así la integración exitosa de todas las capas de la arquitectura IoT propuesta y consolidando la funcionalidad completa del sistema de monitoreo remoto.

4.2.6. Discusión

El sistema de comunicación diseñado establece una arquitectura que aprovecha la infraestructura existente del MT61GP, reduciendo costos de implementación y simplificando el mantenimiento. La selección del protocolo RS-485 garantiza compatibilidad con equipos industriales, mientras la arquitectura multicapa facilita escalabilidad futura. El desarrollo de una PCB personalizada mediante KiCad refuerza la confiabilidad operativa frente a soluciones en protoboard, consolidando un diseño robusto para entornos agrícolas adversos donde la estabilidad de conexiones resulta crítica para la continuidad del monitoreo.

Este diseño contrasta fundamentalmente con enfoques como el de Mishra [49], quien implementó un sistema desde cero utilizando Arduino y sensores discretos ACS712. Mientras su trabajo se centra en dispositivos de medición autónomos, el presente proyecto integra hardware de grado industrial existente, evitando redundancia de sensores. Similarmente, Zarria [50] empleó ESP32 con comunicación GSM, requiriendo módulos SIM800L adicionales. La presente solución optimiza recursos mediante conectividad Wi-Fi nativa del ESP32, reduciendo complejidad y costos sin comprometer funcionalidad del sistema de monitoreo remoto.

El diseño presenta limitaciones que restringen su aplicabilidad en ciertos escenarios operativos. La dependencia exclusiva de conectividad Wi-Fi, sin alternativas como LoRaWAN para comunicación de largo alcance, limita su implementación en instalaciones fotovoltaicas rurales dispersas o zonas sin infraestructura de red estable. La ausencia de redundancia en la comunicación RS-485 genera punto único de fallo ante desconexiones físicas del bus de comunicación. Estas limitaciones, aunque significativas para contextos específicos, no comprometen la funcionalidad del sistema en el entorno del invernadero ecológico donde fue implementado.

4.3. Visualización de datos en la interfaz web

La integración de Firebase permitió que los datos almacenados fueran accesibles y útiles para el análisis, desarrollando una interfaz web o dashboard. El objetivo principal de esta interfaz es traducir los registros numéricos de la base de datos en una presentación visual clara y comprensible, permitiendo al usuario final monitorear el estado del sistema fotovoltaico de manera remota y en tiempo real.

4.3.1. Infraestructura de datos

La infraestructura de datos constituye el entorno donde se almacenan, organizan y gestionan los registros generados por el sistema de monitoreo. En este apartado se describen los componentes y servicios utilizados para garantizar un almacenamiento fiable, accesible y seguro, permitiendo que la información capturada en el invernadero sea procesada y consultada de forma remota en tiempo real.

4.3.1.1. Selección de base de datos en la nube

La selección de una plataforma de almacenamiento en la nube constituye una decisión arquitectónica fundamental que determina la escalabilidad, latencia y confiabilidad del sistema de monitoreo remoto. Esta elección impacta directamente la capacidad del sistema para gestionar el flujo continuo de datos provenientes del dispositivo IoT y garantizar su disponibilidad para consulta en tiempo real. Como se presenta en la Tabla 14, se evaluaron cinco alternativas de bases de datos en la nube.

Tabla 14. Comparación de bases de datos en la nube.

Plataforma	Proveedor	Tipo	Características principales
Firestore Database	Google	NoSQL en tiempo real	Sincronización instantánea, escalabilidad automática, sin configuración de servidor
AWS DynamoDB	Amazon	NoSQL	Alta disponibilidad, escalamiento automático, integración completa con AWS
Google Cloud Firestore	Google	NoSQL documental	Consultas complejas, transacciones ACID, escalabilidad global
Azure CosmosDB	Microsoft	Multi-modelo	Múltiples APIs, distribución global, consistencia configurable
InfluxDB Cloud	InfluxData	Serie temporal	Optimizada para métricas, consultas temporales, compresión de datos

Elaborado por Luiggy Herbas

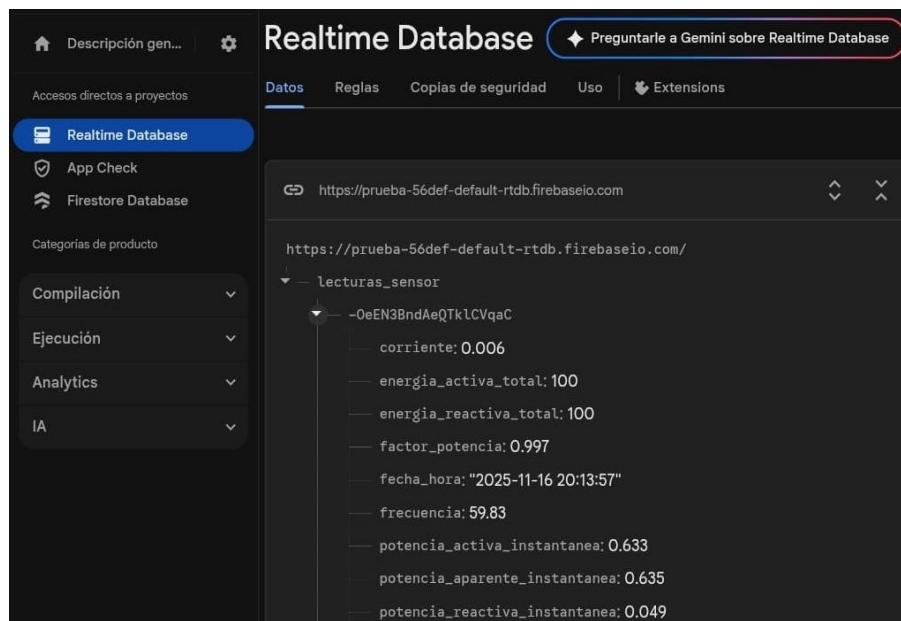
La elección de Firebase como plataforma de almacenamiento se fundamenta en investigaciones previas que demuestran su efectividad para sistemas IoT de monitoreo en tiempo real. Una investigación en 2023 confirma que Firebase es una base de datos NoSQL confiable que acomoda grandes volúmenes de datos en tiempo real, ofreciendo autenticación, mensajería y otras funciones ampliamente utilizadas en investigación IoT [56]. Esta capacidad de manejo de datos masivos en tiempo real es esencial para el monitoreo continuo de magnitudes eléctricas en sistemas fotovoltaicos.

Estudios recientes resaltan ventajas técnicas específicas de Firebase para aplicaciones de monitoreo remoto [57]. La plataforma ofrece escalabilidad automática, baja latencia y sincronización en tiempo real, permitiendo que los datos se almacenen como registros JSON consultables eficientemente. La integración en la nube mediante Firebase facilita el acceso global en tiempo real sin necesidad de desarrollar un backend propio, reduciendo significativamente la complejidad del sistema y acelerando la implementación del proyecto de monitoreo solar.

4.3.1.2. Estructura de datos en Firebase

La organización de la información utiliza un esquema jerárquico NoSQL que optimiza el almacenamiento y consulta de las magnitudes eléctricas del sistema fotovoltaico. Como muestra la figura 23, la estructura establece una colección principal que contiene documentos individuales identificados mediante claves alfanuméricas únicas generadas automáticamente, permitiendo flexibilidad en la adición de campos sin requerir modificaciones al esquema de la base de datos.

Figura 23. Estructura del almacenamiento en Firebase



Elaborado por Luiggy Herbas

Cada documento almacena trece campos correspondientes a las variables eléctricas monitoreadas: corriente, energía activa y reactiva total, factor de potencia, frecuencia, potencias instantáneas (activa, reactiva y aparente), voltajes de fase y timestamps de registro. La estructura JSON nativa facilita consultas temporales mediante campos de fecha y hora, permitiendo análisis histórico, identificación de patrones de consumo y generación de

reportes estadísticos del sistema. Esta arquitectura documental garantiza escalabilidad horizontal, integridad referencial y acceso en tiempo real a la información del rendimiento del sistema fotovoltaico, consolidando una solución robusta para el monitoreo continuo del invernadero ecológico.

4.3.2. Tecnologías de desarrollo de la aplicación web

El desarrollo de la interfaz web requiere un conjunto de tecnologías que permitan procesar, visualizar y gestionar los datos provenientes del sistema de monitoreo. Este apartado presenta las herramientas, lenguajes y servicios utilizados para construir una interfaz funcional, segura y adaptable, capaz de mostrar la información en tiempo real y facilitar la interacción del usuario con la plataforma.

4.3.2.1. Selección de tecnología para la interfaz de usuario

La selección de la tecnología para construir la interfaz de usuario constituye una decisión crítica que impacta la experiencia del usuario final, la mantenibilidad del código fuente y la velocidad de desarrollo del proyecto. Se analizaron diversas alternativas consolidadas en el mercado para construir interfaces interactivas de aplicación de página única. Como se presenta en la tabla 15, la evaluación consideró aspectos arquitectónicos, curva de aprendizaje y madurez del ecosistema de cada tecnología disponible para el desarrollo web moderno.

Tabla 15. Comparación de tecnologías para la interfaz de usuario

Tecnología	Arquitectura	Curva de aprendizaje	de Ecosistema y soporte
Angular	Framework completo con herramientas integradas.	Alta, por su complejidad y conceptos avanzados.	Respaldado por Google, usado en apps empresariales.
React	Librería para la UI, requiere librerías extra.	Moderada, centrada en componentes.	Respaldado por Meta, con comunidad muy grande.
Vue.js	Framework progresivo y modular.	Baja, fácil de aprender.	Impulsado por la comunidad, con gran documentación.

Svelte	Compila en código JS optimizado, sin virtual DOM.	Baja, sintaxis simple y clara.	Comunidad en crecimiento, enfoque en rendimiento.
Next.js	Framework sobre React, incluye SSR y SSG.	Moderada, requiere entender React.	Respaldado por Vercel, muy popular en desarrollo web moderno.

Elaborado por Luiggy Herbas

El desarrollo de la plataforma de visualización utilizada es el framework Angular. Esta elección está respaldada en investigaciones como la de Logroño Haro [58], que destacan al framework Angular como una tecnología robusta y óptima para aplicaciones a gran escala, manteniendo un funcionamiento eficiente y funcional. La decisión también se fundamenta por su arquitectura estructurada que proporciona soluciones integradas para enrutamiento, gestión de formularios y comunicación HTTP. El uso de TypeScript como lenguaje base aporta robustez mediante tipado fuerte, reduciendo errores durante el desarrollo y facilitando el mantenimiento a largo plazo, características ideales para una aplicación de monitoreo donde la fiabilidad resulta primordial.

Asimismo, para la codificación de la interfaz gráfica, se empleó WebStorm como entorno de desarrollo integrado. La elección de este software se debe a su especialización en el ecosistema, ofreciendo una compatibilidad nativa con el framework Angular. Esta herramienta facilitó la detección de errores en tiempo real dentro de las plantillas HTML y los componentes, optimizó la refactorización automática del código y agilizó la gestión de dependencias a través de su terminal integrada. Su capacidad para interpretar la estructura modular de Angular permitió un flujo de trabajo más dinámico, asegurando la calidad y estandarización del código.

4.3.2.2. Selección de Tecnología para el servidor (Backend)

El servidor de aplicaciones constituye el núcleo funcional de la plataforma, responsable de gestionar los datos de manera segura y eficiente mediante una interfaz de programación de aplicaciones. La selección de esta plataforma define aspectos críticos como el rendimiento bajo carga, la escalabilidad horizontal y la estabilidad del sistema. Se evaluaron cinco plataformas consolidadas para el desarrollo de servicios web presentadas en la tabla 16, considerando rendimiento computacional, lenguaje de programación y madurez del ecosistema tecnológico.

Tabla 16. Comparación de Tecnologías para el Backend

Tecnología	Rendimiento	Lenguaje	Ecosistema y madurez
Java (Spring Boot)	Excelente para aplicaciones de alta concurrencia y procesos intensivos gracias a su multihilo.	Java (fuertemente tipado, orientado a objetos).	Muy maduro y extenso, con un ecosistema robusto para aplicaciones empresariales.
Node.js (Express)	Rápido para operaciones de I/O (entrada/salida) no bloqueantes. Monohilo.	JavaScript (tipado dinámico, aunque se puede usar TypeScript).	Gran ecosistema a través de npm, muy popular en startups y desarrollo rápido.
Python (Django/Flask)	Bueno, pero generalmente más lento que Java y Node.js para tareas intensivas de CPU.	Python (tipado dinámico, sintaxis simple).	Ecosistema fuerte, especialmente en ciencia de datos, IA y desarrollo web.
PHP (Laravel)	Rendimiento aceptable para aplicaciones web tradicionales, aunque menor en alta concurrencia.	PHP (tipado dinámico, orientado a objetos).	Muy usado en web, con un ecosistema sólido y Laravel como framework principal.
Ruby (Ruby on Rails)	Adecuado para aplicaciones web rápidas.	Ruby (tipado dinámico, sintaxis legible y concisa).	Ecosistema estable, popular en startups y proyectos ágiles.

Elaborado por Luiggy Herbas

El lenguaje de programación seleccionado fue Java en conjunto con Spring Boot, un framework que facilita la creación de aplicaciones web y servicios backend al simplificar configuraciones, manejo de dependencias y procesos de despliegue. Esta elección es consistente con investigaciones en entornos empresariales como la de Girón Rodríguez [59] quien utilizó esta combinación para desarrollar un sistema que optimizó significativamente la eficiencia operativa y la toma de decisiones en tiempo real. La decisión se fundamenta en

la reconocida robustez y rendimiento de Java, que la convierten en un estándar para aplicaciones críticas. A demás, Java garantiza la fiabilidad necesaria para un sistema que debe procesar y entregar datos de manera continua y segura.

Finalmente, para la codificación, depuración y gestión del ciclo de vida del desarrollo backend, se seleccionó IntelliJ IDEA. La elección de este entorno de desarrollo integrado (IDE) se fundamenta en su integración nativa y profunda con el framework Spring Boot, lo cual proporciona herramientas avanzadas de asistencia inteligente, inyección de dependencias y análisis estático de código en tiempo real. Su robusto ecosistema facilita la gestión automatizada de paquetes, la ejecución de pruebas unitarias y el monitoreo de los servicios REST (Transferencia de estado representacional), garantizando un flujo de trabajo eficiente que minimiza la deuda técnica y asegura la estabilidad del código fuente en el servidor.

4.3.3. Implementación del sistema de autenticación

La implementación del sistema de autenticación garantiza el acceso seguro a la plataforma web, permitiendo únicamente usuarios autorizados gestionen y visualicen la información del monitoreo. Este apartado describe los métodos, servicios y configuraciones aplicadas para validar identidades, proteger las sesiones y asegurar la integridad de datos dentro de la aplicación.

4.3.3.1. Desarrollo del módulo de login

El acceso a la plataforma de monitoreo está protegido mediante un sistema de autenticación que garantiza que únicamente usuarios autorizados puedan visualizar los datos del sistema fotovoltaico. La interfaz incorpora una pantalla de inicio de sesión como punto de entrada obligatorio a la plataforma, requiriendo credenciales válidas para habilitar el acceso al panel de control presentadas en la figura 24, el módulo presenta un diseño minimalista, incorporando campos para nombre de usuario y contraseña, junto con validación en tiempo real de los datos ingresados antes de procesar la solicitud de autenticación.

Figura 24. Interfaz de inicio de sesión de la plataforma



Elaborado por Luiggy Herbas

La interfaz de autenticación utiliza componentes reactivos de framework Angular que validan la integridad de los datos ingresados antes de enviarlos al servidor. El formulario implementa controles de validación que verifican campos no vacíos, formato correcto del nombre de usuario y requisitos mínimos de seguridad en las contraseñas.

Al iniciar de sesión, el sistema establece comunicación con el servidor de aplicaciones mediante peticiones HTTP seguras, transmitiendo las credenciales encriptadas para su verificación. La respuesta del servidor determina si el acceso se concede o se rechaza, proporcionando mensajes claros al usuario en caso de credenciales inválidas o errores de conexión.

4.3.3.2. Gestión de sesiones y seguridad

La verificación de credenciales y el mantenimiento de sesiones activas gestionan el sistema de autenticación de Firebase, plataforma que proporciona funcionalidades robustas para la administración segura de usuarios y garantiza que únicamente el personal autorizado acceda a los datos del sistema fotovoltaico. Firebase maneja internamente el cifrado de contraseñas y la validación de identidad. Los usuarios autorizados se registran previamente en la consola de administración de Firebase, donde configuran credenciales únicas y políticas de seguridad específicas para la plataforma de monitoreo del invernadero ecológico.

Una vez autenticado exitosamente, el sistema mantiene la sesión activa mediante tokens de seguridad, permitiendo al usuario navegar entre las diferentes secciones de la aplicación sin

requerir autenticación repetida. La implementación de mecanismos de protección de rutas redirige automáticamente a la pantalla de inicio de sesión cuando se detecta ausencia de credenciales válidas o expiración de la sesión. Esta arquitectura de seguridad multicapa restringe el acceso exclusivamente al personal técnico pertinente del invernadero ecológico, protegiendo la confidencialidad e integridad de los datos del sistema fotovoltaico monitoreado.

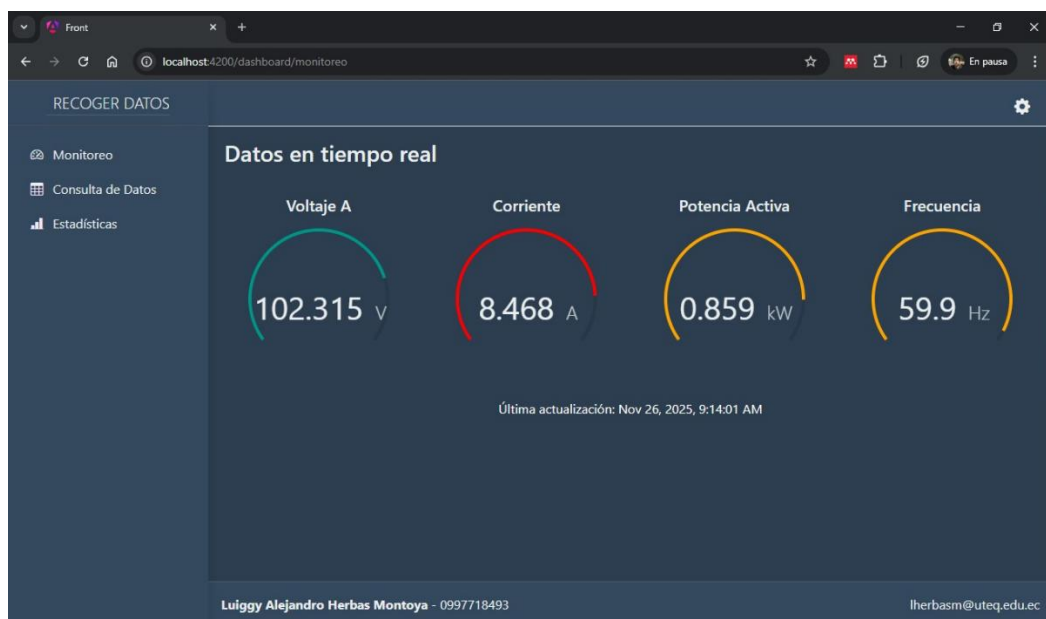
4.3.4. Desarrollo del dashboard principal

El dashboard principal constituye la interfaz central de visualización del sistema, presentando de forma organizada las magnitudes eléctricas, estados y registros obtenidos del proceso de monitoreo. Este apartado describe el diseño, estructura y funcionalidades implementadas mostrando información en tiempo real y la visualización de datos.

4.3.4.1. Visualización de datos en tiempo real

La sección de monitoreo presenta las magnitudes eléctricas actuales mediante tarjetas informativas que despliegan los valores recientes capturados por el dispositivo. Cada tarjeta utiliza colores distintivos y muestra el valor numérico junto con su unidad de medida correspondiente presentadas en la figura 25, la interfaz muestra los parámetros eléctricos del sistema fotovoltaico, actualizándose automáticamente conforme se reciben nuevas mediciones.

Figura 25. Interfaz del panel de control con menú de navegación



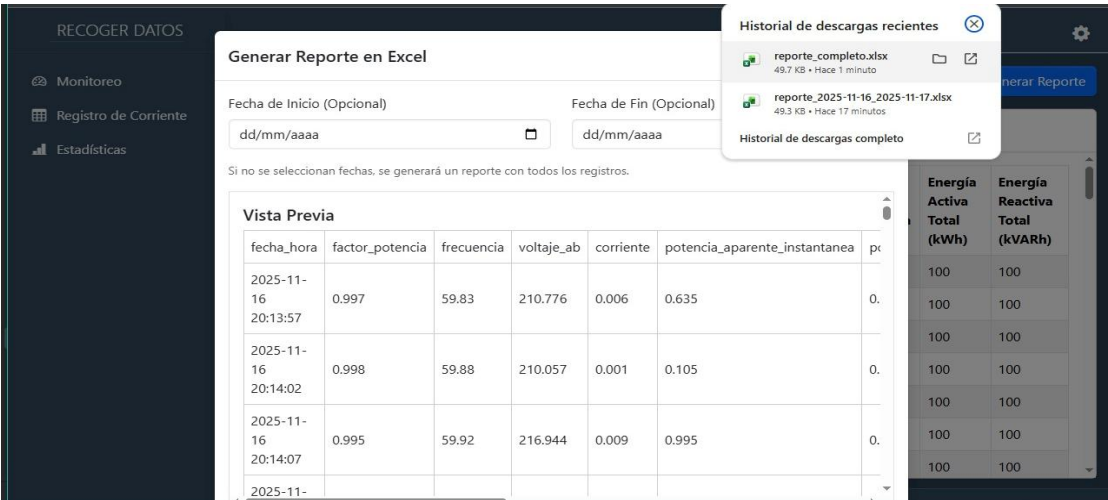
Elaborado por Luiggy Herbas

La diferenciación entre tarjetas facilita la identificación rápida de cada parámetro durante el monitoreo. Esta presentación permite supervisión instantánea del estado operativo del sistema fotovoltaico, habilitando detección inmediata de desviaciones respecto a rangos normales de funcionamiento. La actualización automática garantiza que el personal técnico disponga siempre de información actualizada evaluando el rendimiento del sistema del invernadero ecológico.

4.3.4.2. Historial de datos y generación de reportes

La sección de historial proporciona acceso al registro histórico de mediciones almacenadas en la base de datos, organizadas cronológicamente mediante tabla estructurada que despliega todas las variables eléctricas monitoreadas. La interfaz incorpora funcionalidad de generación de reportes en formato Excel, presentadas en la figura 26, permitiendo al usuario exportar los datos para análisis externo.

Figura 26. Historial de datos con funcionalidad de generación de reportes



Elaborado por Luiggy Herbas

El modal de generación de reportes presenta vista previa tabular de los datos que serán exportados, validando visualmente la información antes de la descarga. La funcionalidad permite generar reportes completos con filtros o reportes personalizados especificando rangos temporales específicos. Los archivos Excel generados mantienen estructura organizada con encabezados descriptivos y formato de celdas apropiado, facilitando procesamiento posterior mediante hojas de cálculo o herramientas de análisis estadístico. Esta característica resulta especialmente valiosa para documentación de auditorías energéticas o estudios comparativos de rendimiento del sistema fotovoltaico.

4.3.4.3. Interfaz de visualización de parámetros eléctricos

La sección dedicada a la representación visual convierte los datos tabulares en representaciones gráficas que facilitan la identificación de patrones y tendencias en el comportamiento del sistema fotovoltaico. Se implementó un sistema de visualización basado en gráficos de barras que permite comparar magnitudes de forma intuitiva y detectar variaciones significativas entre mediciones. Como se presenta en la figura 27, la interfaz incorpora un selector desplegable que habilita al usuario elegir dinámicamente cuál variable desea visualizar, actualizando automáticamente el gráfico sin necesidad de recargar la vista completa.

Figura 27. Interfaz de visualización con gráfico interactivo



Elaborado por Luiggy Herbas

El gráfico de barras representa cada registro del sistema mediante una barra vertical cuya altura es proporcional al valor de la magnitud seleccionada, facilitando la comparación visual directa entre múltiples mediciones. El selector interactivo ofrece todas las variables eléctricas disponibles en la base de datos, permitiendo alternar entre las diferentes magnitudes. Esta funcionalidad resulta especialmente útil para identificar picos de consumo o generación y correlacionar variables para diagnóstico técnico. La implementación reactiva del componente asegura que cualquier cambio en la selección se refleje instantáneamente en la visualización gráfica presentada.

4.3.5. Discusión

La implementación del dashboard cumple exitosamente con el objetivo de visualizar las magnitudes eléctricas del sistema. La plataforma centraliza datos en tiempo real desde Firebase y protege el acceso mediante un portal de autenticación. Al combinar una presentación de datos en formato tabular para registros detallados con una sección de gráficos visual para el análisis, la interfaz se constituye como una herramienta integral para la supervisión remota y la gestión informada del sistema fotovoltaico.

La inclusión de la sección de estadísticas gráficas representa un avance significativo más allá de la simple muestra de datos. Este desarrollo contrasta con enfoques previos como el de Mishra [49], quien empleó la plataforma ThingSpeak para visualización básica sin implementar una base de datos propia ni capacidades de análisis interactivo. Similarmente, Castro [44], desarrolló un sistema de visualización de datos que carecía de interactividad y análisis estadístico dinámico. El proyecto desarrolla un ecosistema que combina autenticación robusta mediante Firebase, visualizaciones estadísticas dinámicas con selección de variables en tiempo real y módulos complementarios de documentación técnica, consolidando una solución que supera las limitaciones de implementaciones previas.

El sistema presenta oportunidades de mejora en funcionalidades avanzadas de análisis y supervisión proactiva. La ausencia de un sistema de alertas automáticas requiere supervisión activa continua del usuario, reduciendo efectividad para detección inmediata de anomalías operativas. Las visualizaciones estadísticas actuales, basadas en gráficos de barras estáticos, podrían expandirse incorporando representaciones temporales tipo línea que faciliten análisis de tendencias.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El análisis del sistema fotovoltaico evidenció que los parámetros eléctricos operaban dentro de rangos adecuados, con tensiones entre 109 y 111 V, corrientes de 8–9 A, potencias activas de 0,8–0,9 kW y un factor de potencia cercano a 1. Antes de implementar el monitoreo, esta información solo se obtenía mediante lecturas puntuales, limitando el seguimiento continuo del sistema. Un sistema de monitoreo remoto permitiría supervisar continuamente el comportamiento del sistema fotovoltaico, permitiendo una eficaz gestión de la energía generada y asegurando su máximo rendimiento. Con la visualización remota incorporada, ahora es posible acceder a estas variables en tiempo real, mejorando la comprensión de la operación y respalda decisiones basadas en datos actualizados sin alterar su desempeño eléctrico.

El diseño del sistema de comunicación entre el MT61GP, la interfaz RS-485 y el ESP32 permitió una comunicación confiable a través de la adquisición y transmisión de datos en tiempo real. La integración de estos componentes garantizó la obtención continua de las magnitudes eléctricas del sistema fotovoltaico y su disponibilidad en la plataforma web, cumpliendo los requerimientos de monitoreo establecidos en el proyecto. Esta arquitectura demostró ser estable y adecuada para el entorno del invernadero ecológico, contribuyendo al seguimiento eficiente del desempeño energético.

La visualización de los datos recopilados se materializó mediante el desarrollo de una interfaz web integral. La plataforma se consolidó como una solución funcional que permite el monitoreo remoto del sistema fotovoltaico, garantizando el acceso seguro a través de un sistema de autenticación de usuarios. La interfaz presenta las magnitudes eléctricas de manera efectiva, utilizando tanto un formato tabular para el registro detallado como una sección de gráfico en barras que facilitan el análisis visual del rendimiento, demostrando ser una herramienta robusta para la supervisión en tiempo real.

5.2 Recomendaciones

Considerar la expansión de la red de sensores para incluir más puntos de monitoreo en el sistema fotovoltaico. Esto permitirá obtener datos más detallados sobre el rendimiento de cada panel y optimizar la eficiencia general del sistema. Además, utilizar modelos predictivos basados en IoT que integren variables como radiación solar y temperatura podría anticipar el rendimiento de los paneles y ajustar automáticamente el sistema para maximizar la generación de energía.

Para fortalecer la escalabilidad del sistema, futuras investigaciones podrían explorar la integración de tecnologías de comunicación complementarias. Esto permitiría adaptar la solución tanto a entornos urbanos con buena conectividad, como a zonas rurales donde el acceso a internet es limitado. De esta manera, el sistema mantendría su versatilidad y aplicabilidad en diferentes contextos de implementación. Además, sería útil incorporar mecanismos de alerta temprana capaces de detectar interrupciones en la transmisión de datos, valores anómalos o posibles fallos en los dispositivos del sistema fotovoltaico. Estas funciones incrementarían la confiabilidad del monitoreo remoto.

Luego de la implementación del sistema de visualización en tiempo real, se recomienda realizar estudios a largo plazo (entre seis y doce meses) para evaluar la utilidad de la plataforma en distintos escenarios operativos. Este seguimiento permitiría analizar el comportamiento de las variables eléctricas bajo condiciones estacionales y validar la continuidad de la transmisión de datos. En futuras ampliaciones, podrían incorporarse funciones de análisis estadísticos básico orientadas a resaltar cambios repentinos, incrementos inusuales o valores fuera de rango, aportando mayor utilidad al monitoreo energético sin requerir análisis estadísticos complejos.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6.1 Bibliografía

- [1] I. E. A. Dr Fatih Birol, “World Energy Outlook 2024 – Analysis - IEA.” Accessed: Jul. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- [2] Alusion solar, “Los 5 mayores países productores de energía solar del mundo.” Accessed: Jul. 23, 2025. [Online]. Available: https://alusinsolar.com/los-5-mayores-paises-productores-de-energia-solar-del-mundo/?utm_source
- [3] Olade, “Panorama energético de América Latina y el Caribe.” Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: https://www.olade.org/wp-content/uploads/2024/12/PANORAMA-ENERGETICO-ALC_202418-12-2024.pdf
- [4] INAHMI, “Clima,” Predicción climática. Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: <https://servicios.inamhi.gob.ec/clima/>
- [5] The Cuenca Dispatch, “Lo que necesita saber sobre la instalación de un sistema de energía solar en su hogar ecuatoriano.” Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: https://thecuecadispatch.com/what-you-need-to-know-about-installing-a-solar-energy-system-to-your-ecuadorian-home/?utm_source
- [6] IRENA, “Costos de generación de energía renovable en 2024.” Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>
- [7] N. Unidas, *América Latina y el Caribe ante las trampas del desarrollo: transformaciones indispensables y cómo gestionarlas*. CEPAL, 2024. Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11362/80727>
- [8] M. Mogrovejo-Narvaez, A. Barragán-Escandón, E. Zalamea-León, and X. Serrano-Guerrero, “Barriers to the Implementation of On-Grid Photovoltaic Systems in Ecuador,” *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 9466, vol. 16, no. 21, p. 9466, Oct. 2024, doi: 10.3390/SU16219466.

- [9] M. M. Alam, “Un sistema de monitoreo de energía y corriente de fuga para la detección de anomalías en aparatos eléctricos.,” *Scientific Reports 2022 12:1*, vol. 12, no. 1, pp. 1–23, Nov. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-22508-2.
- [10] M. A. Ponce-Jara, C. Velásquez-Figueroa, M. Reyes-Mero, and C. Rus-Casas, “Performance Comparison between Fixed and Dual-Axis Sun-Tracking Photovoltaic Panels with an IoT Monitoring System in the Coastal Region of Ecuador,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 3, Feb. 2022, doi: 10.3390/SU14031696.
- [11] H. J. Jara Ochoa, R. Peña, Y. Ledo Mezquita, E. Gonzalez, and S. Camacho-Leon, “Comparative Analysis of Power Consumption between MQTT and HTTP Protocols in an IoT Platform Designed and Implemented for Remote Real-Time Monitoring of Long-Term Cold Chain Transport Operations,” *Sensors 2023, Vol. 23, Page 4896*, vol. 23, no. 10, p. 4896, May 2023, doi: 10.3390/S23104896.
- [12] Víctor Alfonso Martínez-Falcones and Alan Cobeña-Zambrano, “Environmental monitoring system to optimize the performance of solar panels in university environments.” Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: <https://sciencescholar.us/journal/index.php/ijpse/article/view/15071/12098>
- [13] C. D. Larreana and C. Ibarrola, “Optimización de la Captación de Energía Solar mediante un Sistema de Seguimiento Solar,” Oct. 2023.
- [14] Salgado Garciglia Rafael, “Paneles solares: Generadores de energia electrica”, Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://saberimas.umich.mx/archivo/tecnologia/133-numero-1755/268-paneles-solares-generadores-de-energia-electrica.html>
- [15] Buele Carlos Omar and Chazi Andrés Marcelo, “Modelación del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca,” 2019, Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18210/1/UPS-CT008653.pdf>
- [16] J. Šaliga, “MEASUREMENTS OF ELECTRICAL QUANTITIES”.
- [17] BigMat, “¿Qué son las magnitudes eléctricas y cómo se conectan entre sí?,” Summer 2025, Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available:

http://www.bigmat.pt/es/blog/d/que-son-las-magnitudes-electricas-y-como-se-conectan-entre-si-18132?utm_source

- [18] Fiveable, “Tensión de fase - (Circuitos y Sistemas Eléctricos I) - Vocab, Definición, Explicaciones.” Accessed: Sep. 27, 2025. [Online]. Available: <https://fiveable.me/key-terms/electrical-circuits-systems-i/phase-voltage>
- [19] Munir Ahmad, “Potencia activa, poder reactivo, poder aparente y el factor de papel de la energía - Artículos técnicos.” Accessed: Sep. 27, 2025. [Online]. Available: <https://control.com/technical-articles/active-power-reactive-power-apparent-power-and-the-role-of-power-factor>
- [20] Pablo Rodríguez, “Frecuencia Eléctrica: Conceptos, Medición, Fórmula y Ejemplos.” Accessed: Sep. 27, 2025. [Online]. Available: <https://electricidad-basica.com/conceptos-basicos/frecuencia-electrica/>
- [21] Miguel Galvez, “Qué es el factor de potencia y cuál su impacto en los activos industriales.” Accessed: Sep. 27, 2025. [Online]. Available: <https://traction.com/es/blog/que-es-el-factor-de-potencia-y-cual-su-impacto-en-los-activos-industriales>
- [22] Aarón López, “Monofásica: Todo lo que Necesitas Saber sobre este Sistema de Energía Eléctrica - Enertek.” Accessed: Sep. 27, 2025. [Online]. Available: <https://enertekcr.com/blog/monofasica-todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-este-sistema-de-energia-electrica>
- [23] Nature’s Generator, “¿Qué es la fase dividida?” Accessed: Sep. 27, 2025. [Online]. Available: <https://naturesgenerator.com/blogs/news/what-is-split-phase?srsId=AfmBOopCbRxF-eZ0wr4sf8M2Hn0S6TgL48LIJMIEzTsJhUJ4equBybwd>
- [24] Anna Giménez, “¿Qué es la Energía Eléctrica Trifásica y cómo funciona? - Area Cooling Solutions.” Accessed: Sep. 27, 2025. [Online]. Available: <https://areacooling.com/es/glosario-de-terminos-hvac/energia-electrica-trifasica/>
- [25] M. G. Dos Santos, D. Ameyed, F. Petrillo, F. Jaafar, and M. Cheriet, “Internet of Things Architectures: A Comparative Study”, Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2004.12936>

- [26] Caquete Shirley, “Sistema telemático para el control y monitoreo de invernaderos de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo Campus ‘La María,’” Univerisidad técnica estatal de Quevedo, 2023.
- [27] GeeksforGeeks, “Arquitectura de 5 capas de Internet de las cosas.” Accessed: Sep. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/5-layer-architecture-of-internet-of-things/>
- [28] Device Authority, “Desembalaje de la arquitectura IoT: explicaciones de capas y componentes.” Accessed: Sep. 27, 2025. [Online]. Available: <https://deviceauthority.com/unpacking-iot-architecture-layers-and-components-explained/>
- [29] Ruben Nogales, Jesús Guamán, Carlos Vargas, and Alberto Ríos, “Plataforma Cloud de Monitoreo del Funcionamiento de una Electrolinera Solar Fotovoltaica.” Accessed: Jul. 24, 2025. [Online]. Available: <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/326/311>
- [30] R. Smalling and L. Blankenstein, “Remote monitoring and computer applications,” *Techniques for Corrosion Monitoring*, pp. 476–498, 2008, doi: 10.1533/9781845694050.3.476.
- [31] Paguayo, “Protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) - MCI Educación.” Accessed: Sep. 24, 2025. [Online]. Available: <https://cursos.mcielectronics.cl/2022/08/23/serial-peripheral-interface-spi>
- [32] ElOsciloscopio, “Tutorial SPI para Arduino y ESP8266.” Accessed: Sep. 24, 2025. [Online]. Available: https://elosciloscopio.com/tutorial-spi-arduino-esp8266/#google_vignette
- [33] Rohde & Schwarz, “Qué es UART.” Accessed: Sep. 24, 2025. [Online]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/es/productos/test-y-medida/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/que-es-uart_254524.html
- [34] X. Masip-Bruin, “Una encuesta de protocolos de comunicación para Internet de las Cosas y los desafíos relacionados con la integración de la computación en la niebla y en la nube,” *ACM Comput Surv*, vol. 1, no. 1, 2019, Accessed: Aug. 16, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/0000001.0000001>

- [35] Serrano Manuel, “¿Qué es Modbus y cómo funciona?” Accessed: Sep. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.dragsa.com/blog/protocolos/que-es-modbus-y-como-funciona>
- [36] WEG S.A, “Manual de usuario Modbus RTU,” Dec. 2023, Accessed: Sep. 24, 2025. [Online]. Available: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hef/hc4/WEG-sca06-manual-de-la-modbus-rtu-10001625786-manual-espanol.pdf>
- [37] Baker.io, “Norma RS-232.” Accessed: Sep. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/maker/blogs/2023/understanding-the-rs-232-standard>
- [38] Mark Harris, “Serial Communications Protocols - Part Four: RS-485 and Baud Rates | Altium.” Accessed: Sep. 12, 2025. [Online]. Available: <https://resources.altium.com/p/serial-communications-protocols-rs-485>
- [39] “RS485 to LoRaWAN Converters in Smart Agriculture.” Accessed: Sep. 12, 2025. [Online]. Available: <https://iotstudioz.com/how-rs485-to-lorawan-converters-modernize-agriculture-and-smart-irrigation/>
- [40] Badman Annie, “¿Qué es la transmisión de datos? .” Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/streaming-data?utm_source
- [41] Carolina Salazar Aragón and Edson de Olivera Pamplona, “La eficiencia energética como herramienta de gestión de costos: una aplicación para la identificación de inversiones de en eficiencia energética, su evaluación económica y de riesgo,” no. 1, pp. 48–73, 2012, Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4172007&info=resumen&idioma=SPA>
- [42] J. K. Cruz-Vázquez, M. Velasco-Pineda, F. G. Ruiz-Ruiz, J. K. Cruz-Vázquez, M. Velasco-Pineda, and F. G. Ruiz-Ruiz, “Monitoreo del voltaje de una placa solar y calidad luminosa usando Internet de las Cosas,” *Nova scientia*, vol. 13, no. 26, pp. 1–17, May 2021, doi: 10.21640/NS.V13I26.2684.
- [43] M. A. Ponce-Jara, I. Pazmino, Á. Moreira-Espinoza, A. Gunsha-Morales, and C. Rus-Casas, “Evaluación de la eficiencia del sistema de seguimiento solar de un solo eje en

regiones ecuatoriales: Un estudio de caso de Manta, Ecuador,” *Energies* 2024, Vol. 17, Page 3946, vol. 17, no. 16, p. 3946, Aug. 2024, doi: 10.3390/EN17163946.

- [44] J. E. Castro Segura and R. Posso García, “Diseño e implementación de un sistema de telemetría para el monitoreo de un sistema de generación de energía solar fotovoltaico,” 2015, *Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira*. Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11059/5637>
- [45] D. Santos *et al.*, “Diseño IoT y validación de sistema de medida para generación fotovoltaica,” Jul. 2022, doi: 10.17163/ings.n28.2022.04.
- [46] M. Duong Phung, M. De La Villefromoy, and Q. Ha, “Gestión de la energía solar en microrredes utilizando control confiable basado en IoT,” Oct. 2020, Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1710.03422>
- [47] B. E. Baculima Pérez and D. F. Raiban Vera, “Rehabilitación de la instalación solar fotovoltaica de la Universidad Politécnica Salesiana (edificio Guillermo Mensi) y su gestionamiento mediante la implementación de un sistema de monitoreo y base de datos,” Oct. 2022, Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23918>
- [48] M. C. Corominas and A. Grebneva, “Sistema de telemetría IoT para el monitoreo de la instalación solar fotovoltaica del centro tecnológico FUNINTEC.,” 2022, Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <http://ri.unsam.edu.ar/handle/123456789/1978>
- [49] P. Mishra, G. Sethi, N. Kumar Prasad, B. Pradhan, and A. C. Mishra, “SISTEMA DE MONITOREO SOLAR BASADO EN IOT CON ARDUINO,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2024, Accessed: Aug. 16, 2025. [Online]. Available: www.irjet.net
- [50] E. V. Zarria Totoy and R. D. Solís, “Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto IoT de parámetros para un sistema fotovoltaico aislado,” May 2025, Accessed: Aug. 28, 2025. [Online]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/66050>
- [51] “Constitución de la República del Ecuador.” Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: www.lexis.com.ec

- [52] Barrezueta Hugo, “Ley orgánica de eficiencia energética.” Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: www.registroficial.gob.ec
- [53] Hugo Del Pozo Barrezueta, “Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica,” Jan. 2018, Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2019/03/LEY-DE-ELECRICIDAD.pdf>
- [54] E. V. Zarria Totoy and R. D. Solís, “Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto IoT de parámetros para un sistema fotovoltaico aislado,” May 2025, Accessed: Sep. 29, 2025. [Online]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/66050>
- [55] M. A. A. Radia, M. K. E. Nimr, and A. S. Atlam, “IoT-based wireless data acquisition and control system for photovoltaic module performance analysis,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 6, p. 100348, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.PRIME.2023.100348.
- [56] W. T. Sung, I. G. T. Isa, and S. J. Hsiao, “An IoT-Based Aquaculture Monitoring System Using Firebase,” *Computers, Materials & Continua*, vol. 76, no. 2, pp. 2179–2200, Aug. 2023, doi: 10.32604/CMC.2023.041022.
- [57] I. ' Am Fathi, “An IoT-Based Low-Cost Smart Greenhouse Monitoring System Using ESP8266 and Firebase for Real-Time Environmental Control,” *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, vol. 9, no. 5, pp. 268–286, May 2025, Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://as-proceeding.com/index.php/ijanser/article/view/2671>
- [58] D. O. Logroño Haro, “Aplicación web para el seguimiento de avance de obras eficiente de la ciudad de Ambato utilizando angular y nodejs,” Dec. 05, 2024, *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*. Accessed: Oct. 01, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/23595>
- [59] J. Pierre and G. Rodríguez, “Desarrollo de un sistema web para la mejora del seguimiento de recomendaciones emitidas por los entes de control interno y externo de la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A.,” 2025. Accessed: Oct.

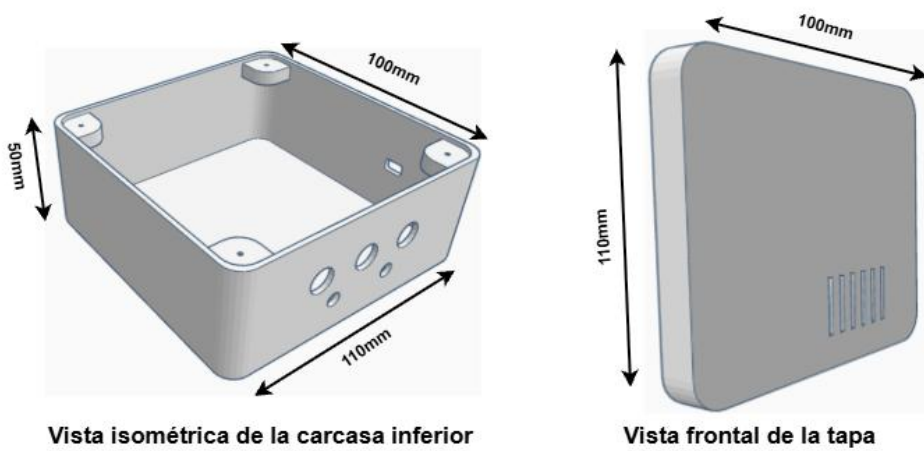
01, 2025. [Online]. Available:
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/45313>

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1. Diseño de la carcasa para el dispositivo IoT

El diseño de la carcasa protectora presenta una geometría rectangular con dimensiones externas de 110 mm de largo por 100 mm de ancho. La estructura se compone de una base inferior con una profundidad de 50 mm, proporcionando el volumen necesario para alojar la PCB, los microcontroladores y el módulo de comunicación. La tapa frontal replica las dimensiones de superficie (110 mm x 100 mm) para asegurar un encaje preciso e incorpora ranuras de ventilación para la disipación térmica, mientras que la base incluye orificios laterales estratégicos para la entrada y salida del cableado de conexión.



Anexo 2. Estimación de costos de producción del prototipo

Categoría	Componente	Especificaciones	Cantidad	Costo Total (USD)
Sistemas Embebidos	ESP32 DevKit	Dual-core, 240 MHz, Wi-Fi/BT Integrado	1	\$15.00
	Raspberry Pi Pico	ARM Cortex-M0+, 133 MHz, Lógica 3.3V	1	\$10.50
Comunicación	Módulo MAX485	Conversor TTL a RS- 485 (5V)	1	\$2.00
Electrónica	PCB	Fibra de vidrio	1	\$20.00

	Componentes de conexión	Sócalos, borneras	Global	\$4.00
Alimentación	Fuente de poder	Adaptador 5V/2A + Cable Micro USB	1	\$5.00
Estructura	Carcasa protectora	Filamento PLA	1	\$10.00
			Total	\$66.50

Anexo 3. Repositorio del proyecto

El repositorio contiene el código fuente utilizado para el desarrollo de la página implementada en la investigación.

Enlace: <https://github.com/LAHM06/proyectoDatos>