

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

**Plataforma IoT de bajo costo para el monitoreo remoto de una estación
meteorológica, Distrito de Chiclayo, Departamento de Lambayeque**

Para Optar por el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

ELABORADA POR:

Bach. Sialer Rivas Jean Carlos

Bach. Sipión Vilchez Aldo Gabriel

ASESOR:

M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla

LAMBAYEQUE – PERÚ

2026

TESIS

**Plataforma IoT de bajo costo para el monitoreo remoto de una estación
meteorológica, Distrito de Chiclayo, Departamento de Lambayeque**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:



**MAG. ING. SEGURA ALTAMIRANO SEGUNDO FRANCISCO
PRESIDENTE**



**MAG. ING. PACHAMANGO BAUTISTA THAUSO GAD
SECRETARIO**



**MG. ING. JUAN CARLOS ÑÁÑEZ AGUILAR
VOCAL**

TESIS

**PLATAFORMA IOT DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO REMOTO DE UNA
ESTACIÓN METEOROLÓGICA, DISTRITO DE CHICLAYO, DEPARTAMENTO DE
LAMBAYEQUE**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

AUTORES:



Bach. Sialer Rivas Jean Carlos



Bach. Sipi3n Vilchez Aldo Gabriel

ASESOR:



M. Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria – Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCIÓN DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 -2023-SUNEDU / CD



0054



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 28-202.6-D/FACFyM

Siendo las 09:00 a.m. del día 05 de Marzo del 2026, se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

"Platocanna IoT de bajo costo para el monitoreo remoto de una estación meteorológica Distrito de Chiclayo Departamento de Lambayeque"

Designados por Resolución N° 654-2025 D/FACFyM de fecha 17 de Julio de 2025

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

M.Sc. Segundo Francisco Segura Altamirano	Presidente
Mg. Ing. Thais Gal Pachamayo Bautista	Secretario
Mg. Ing. Juan Carlos Nuñez Aguilar	Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla, nombrado por Resolución N° 654-2025 D/FACFyM de fecha 17 de Julio de 2025

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 136-2026 D/FACFyM de fecha 13 de Febrero de 2026

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): Siler Rivas Sean Carlos y Siler Vilchez Aldo Gabriel y tuvo una duración de 40 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de Buena (15) en la escala vigesimal, mención (Regular).

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 10:20 a.m. se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

M.Sc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano
 Presidente

Mg. Ing. Thais Gal Pachamayo Bautista
 Secretario

Mg. Ing. Juan C. Nuñez Aguilar
 Vocal

M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla
 Asesor

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL ASESOR

Yo, M. Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla, usuario revisor del documento titulado: **“Plataforma IoT de bajo costo para el monitoreo remoto de una estación meteorológica, Distrito de Chiclayo, Departamento de Lambayeque”**

Cuyos autores son:

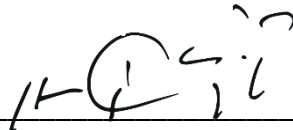
- Bach. Jean Carlos Sialer Rivas
- Bach. Aldo Gabriel Sipi3n Vilchez

Identificado con Documento de Identidad 16703734; declaro que la evaluaci3n realizada por el Programa Inform3tico Turnitin, ha arrojado un porcentaje de similitud de 07 %, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompa1a.

El suscrito analiz3 dicho reporte y concluy3 que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad cient3fica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 24 de enero del 2026



M. Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla

DNI N° 16703734

Plataforma IoT de bajo costo para el monitoreo remoto de una estación meteorológica, Distrito de Chiclayo, Departamento de Lambayeque

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%	5%	1%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo	2%
	Trabajo del estudiante	
2	sedici.unlp.edu.ar	<1%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.unprg.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
4	dspace.unach.edu.ec	<1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.uss.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
6	doku.pub	<1%
	Fuente de Internet	
7	www.coursehero.com	<1%
	Fuente de Internet	
8	ondafuerteventura.es	<1%
	Fuente de Internet	
9	www.dspace.espol.edu.ec	<1%
	Fuente de Internet	
10	www.controlhome.net	<1%
	Fuente de Internet	
11	pidiscat.cat	<1%
	Fuente de Internet	

12	repositorio.uch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	Submitted to Universidad Manuela Beltrán Trabajo del estudiante	<1 %
14	Submitted to Universidad Católica San Pablo Trabajo del estudiante	<1 %
15	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	<1 %
16	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	repository.eia.edu.co Fuente de Internet	<1 %
18	crea.ujaen.es Fuente de Internet	<1 %
19	anes.org.mx Fuente de Internet	<1 %
20	documents.tips Fuente de Internet	<1 %
21	ediss.uni-goettingen.de Fuente de Internet	<1 %
22	www.inevm.ru Fuente de Internet	<1 %
23	Submitted to Unviersidad de Granada Trabajo del estudiante	<1 %
24	oceanografia.cicese.mx Fuente de Internet	<1 %


 Ing. HUGO JAVIER CHICLAYO PADILLA
hchiclayo@unprg.edu.pe - 920583570
 ASESOR

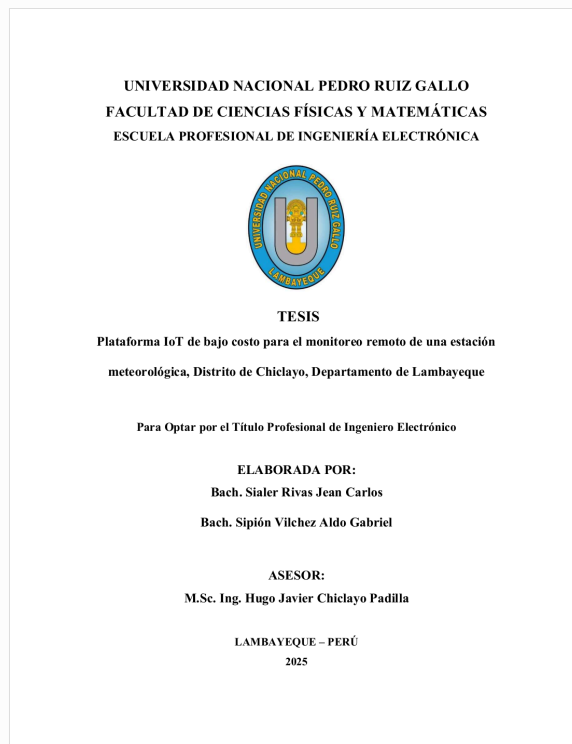


Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Sialer Rivas Sipi3n Vilchez
Título del ejercicio: Quick Submit
Título de la entrega: Plataforma IoT de bajo costo para el monitoreo remoto de un...
Nombre del archivo: Informe_Final_-_Sialer_-_Sipi_n.docx
Tamaño del archivo: 10.35M
Total páginas: 94
Total de palabras: 15,019
Total de caracteres: 86,113
Fecha de entrega: 24-ene-2026 07:33a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2862619760




Ing. HUGO JAVIER CHICLAYO PADILLA
hchiclayo@unprg.edu.pe - 920583570
ASESOR

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi guía y fortaleza para seguir adelante.

A toda la plana docente de ingeniería electrónica por sus enseñanzas para desarrollarme profesionalmente y en especial a mi asesor por su orientación y apoyo constante para el desarrollo de nuestro proyecto.

Sialer Rivas Jean Carlos

DEDICATORIA

*A mí padres cande y Eladio por todo el apoyo incondicional
y mis mayores motivaciones para seguir adelante.*

Sialer Rivas Jean Carlos

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios, por darme fortaleza, sabiduría y acompañarme en cada paso de este camino, guiándome siempre hacia lo correcto y lo prudente.

Agradezco también a mi universidad, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y permitirme desarrollar mis capacidades en el campo que tanto me apasiona.

De igual manera, expreso mi sincero agradecimiento a mi asesor de tesis, M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla, cuya orientación, dedicación, constancia y apoyo fueron fundamentales para la culminación de esta investigación.

A mi compañero de tesis, Jean Sialer Rivas, y a todas las personas que participaron en este proceso, ya sea de manera directa o indirecta, les extiendo mi más profundo agradecimiento. Cada uno de ustedes ha contribuido de manera valiosa a la realización de este logro.

Sipi3n Vilchez Aldo Gabriel

DEDICATORIA

A mi madre, María Olga Vilchez Silva, y a mi padre, Teófilo Alberto Sipión Cabrales, por ser mi ejemplo de esfuerzo, constancia y dignidad. Gracias por enseñarme el valor del trabajo y por mostrarme que detrás de cada logro siempre existe un sacrificio silencioso.

También deseo agradecer a mis hermanos, Fernando Alberto Sipión Vilchez y Denis Daniel Sipión Vilchez, así como a mi amigo de infancia, quien es para mí un hermano, Walter Brayan Castillo Alayo, por creer en mí, incluso cuando yo dudaba y por acompañarme a lo largo de mis estudios universitarios y de mi carrera profesional. Extiendo igualmente mi agradecimiento a sus padres, Florinda Eugenia Alayo Vázquez y Walter Domingo Castillo Abad, por todo el apoyo brindado.

No existen palabras suficientes para expresar mi gratitud por todo lo que han hecho por mí. Llevaré siempre conmigo, y con mucho orgullo, los valores, la fuerza y el corazón que me han transmitido.

Sipión Vilchez Aldo Gabriel

INDICE DE CONTENIDOS

1	CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO	16
1.1	Antecedentes.....	16
1.1.1	Antecedentes Internacionales	16
1.1.2	Antecedentes Nacionales.....	17
1.2	Bases Teóricas	19
1.2.1	Internet de las Cosas (IoT)	19
1.2.2	Estaciones meteorológicas	24
2	CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES	28
2.1	Diseño de Contrastación de Hipótesis	28
2.2	Población, muestra.....	29
2.2.1	Población.....	29
2.2.2	Muestra.....	30
2.3	Técnicas, instrumentos, equipos y materiales	30
3	CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
3.1	Resultados.....	32
3.1.1	Criterios de Elección del Módulo de Control en la Estación Meteorológica	34
3.1.2	Plataforma de telemetría IoT para el monitoreo meteorológico	63
3.2	Discusión	81
4	CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
4.1	Conclusiones.....	82
4.2	Recomendaciones	84
5	REFERENCIAS.....	85

Índice de Figuras

Figura 1: Evolución y proyección hasta 2030 del número de dispositivos IoT conectados	14
Figura 2: Internet de las Cosas (IoT)	19
Figura 3: Conceptos fundamentales.....	20
Figura 4: Características de IoT.....	21
Figura 5: Arquitectura de sistemas IoT.....	22
Figura 6: Protocolos de comunicación en IoT.....	24
Figura 7: Componentes básicos de un sistema de monitoreo ambiental	25
Figura 8: Estaciones meteorológicas IoT	27
Figura 9: Diseño de Contrastación Hipótesis	29
Figura 10 Arquitectura de comunicación y servicios de monitoreo	34
Figura 11 Integración de sensores meteorológicos en la plataforma IoT	39
Figura 12 Arquitectura de adquisición de datos de la estación meteorológica	40
Figura 13 Estructura modular del software en Python para la plataforma IoT	41
Figura 14 Módulo en Python - adquisición de las variables meteorológicas	42
Figura 15 Código de comunicación entre la Raspberry Pi y el ADC MCP3008	46
Figura 16 Módulo de gestión de la base de datos en la plataforma IoT meteorológica.....	48
Figura 17 Dashboard web de la plataforma IoT para monitoreo en tiempo real.....	51
Figura 18 Módulo de telemetría MQTT.....	52
Figura 19 Esquema de comunicación de la plataforma IoT hacia la interfaz de usuario.....	55
Figura 20 Módulo de notificación por correo electrónico en la plataforma IoT	55
Figura 21 Proceso de generación y envío de alertas críticas en la plataforma IoT.....	57

Figura 22 Script principal de adquisición, almacenamiento y envío de datos meteorológicos.....	58
Figura 23 Diagrama de energización	61
Figura 24 Diseño de la infraestructura de telecomunicaciones de la plataforma IoT meteorológica	63
Figura 25 Enlace meteorológico entre la estación y el centro de monitoreo	64
Figura 26 Torre de comunicaciones para el sistema de telemetría meteorológica	65
Figura 27 Antena receptora del enlace de telemetría meteorológica.....	65
Figura 28 Enlace punto a punto entre la estación meteorológica y el centro de monitoreo.....	66
Figura 29 Trazado del enlace de fibra óptica entre el NAP y el centro de monitoreo.....	74
Figura 30 Enlace propuesto (Google Masp).....	74
Figura 31 Integración de Starlink como enlace satelital	77
Figura 32 Panel de simulación del demodulador y antenas en el sistema satelital.....	78
Figura 33 Sistema de respaldo de energía automática	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sensores seleccionados para la plataforma IoT.....	37
Tabla 2 Coordenadas, altura y azimut de la antena de la estación meteorológica.....	67
Tabla 3 Parámetros espaciales de la antena en el centro de monitoreo.....	67
Tabla 4 Parámetros del sistema de comunicación de la estación meteorológica.....	68
Tabla 5 Atenuaciones del canal radioeléctrico para el enlace meteorológico	68
Tabla 6 Parámetros de desempeño del enlace de la estación meteorológica.....	69
Tabla 7 Parámetros de operación del enlace de la estación meteorológica.....	70
Tabla 8 Relación entre modulación y sensibilidad mínima.....	70
Tabla 9 Componentes del enlace de fibra óptica	75
Tabla 10 Pérdida total de potencia en el enlace óptico	76
Tabla 11 Potencia transmitida y recibida en el enlace óptico.....	76
Tabla 12 Comparativa de escenarios de conectividad	80

RESUMEN

Se aborda el problema de la escasa disponibilidad de datos meteorológicos locales en Chiclayo, condicionada por el alto costo y la poca flexibilidad de las estaciones meteorológicas convencionales, lo que limita la toma oportuna de decisiones en agricultura y gestión de riesgos, el objetivo fue diseñar una plataforma IoT de bajo costo para el monitoreo remoto de una estación meteorológica, se desarrolló un estudio de enfoque cuantitativo, con diseño descriptivo y no experimental, basado en el análisis del estado del arte y en la modelación y simulación de una arquitectura hardware–software con Raspberry Pi 3B, sensores económicos, base de datos SQLite y dashboard web, complementada con el análisis de tres escenarios de conectividad (radioenlace 5,8 GHz, fibra óptica y enlace satelital), los resultados muestran que la plataforma adquiere y visualiza en tiempo casi real las variables clave y que radioenlace y fibra cumplen márgenes de enlace holgados, mientras que el satélite es viable pero más exigente en energía. Se concluye que la solución es técnicamente factible, escalable y pertinente para fortalecer redes de monitoreo climático de bajo costo en contextos similares.

Palabras clave: IoT, Internet de las Cosas; estación meteorológica; monitoreo remoto; telemetría.

ABSTRACT

This thesis addresses the lack of local weather data in Chiclayo, largely due to the high cost and limited flexibility of conventional weather stations, which constrains timely decision-making in agriculture and risk management. The aim was to design a low-cost IoT platform for the remote monitoring of a weather station. A quantitative, descriptive and non-experimental study was conducted, combining a state-of-the-art review with the modelling and simulation of a hardware–software architecture based on a Raspberry Pi 3B, low-cost sensors, an SQLite database and a web dashboard, together with the evaluation of three backhaul scenarios (5.8 GHz radio link, optical fibre and satellite link). Results show that the platform reliably acquires and displays key variables in near real time, and that radio and fibre links offer comfortable fade margins, whereas the satellite option is technically feasible but more demanding in terms of power consumption. The study concludes that the proposed solution is technically sound, scalable and suitable to support low-cost climate monitoring networks in comparable environments.

Keywords: IoT, Internet of Things; weather station; remote monitoring; telemetry.

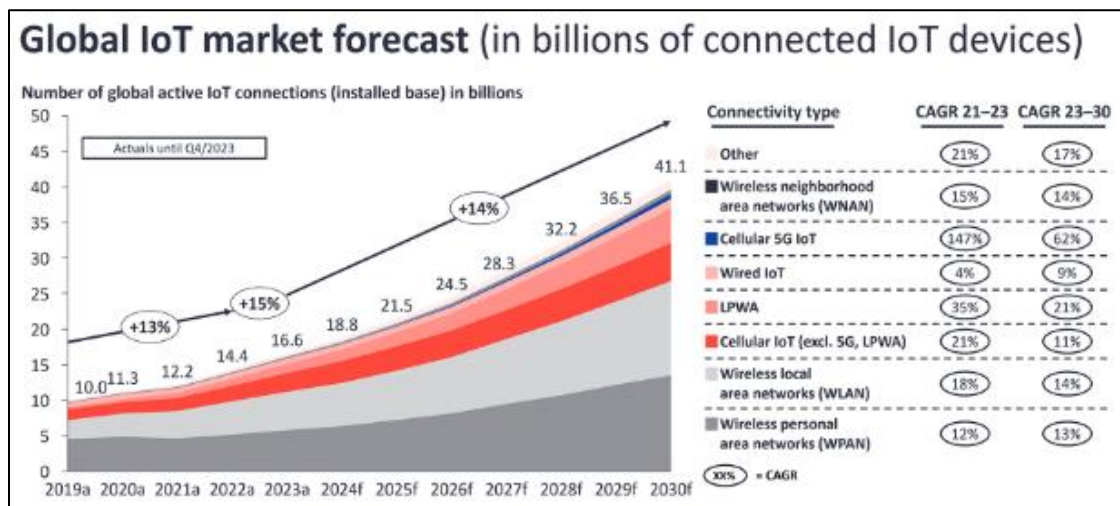
INTRODUCCIÓN

El monitoreo meteorológico remoto ha evolucionado con el empleo de plataformas IoT que reducen costos y consumo energético, en el ámbito global se observa que enfrenta deficiencias en cuanto a precisión industrial y robustez en entornos adversos, prototipos basados en NB-IoT alcanzan latencias de transmisión inferiores a 3 s y consumos cercanos a 1.8 W/h (Wang, 2022), mientras que optimizaciones posteriores han logrado disminuir aún más el consumo hasta 1.5 W/h y mejorar la exactitud de los sensores a ± 0.1 °C (Rennane et al., 2024).

La figura N° 1, muestra un crecimiento desde aproximadamente 10,000'000,000 en 2019 hasta 41,100'000,000 previstos en 2030. El área total evidencia el aporte de distintas tecnologías de conectividad desde redes de área personal inalámbricas (WPAN) y locales (WLAN) hasta soluciones de baja potencia de largo alcance (LPWA), redes celulares tradicionales y 5G IoT, cada una con tasas de crecimiento anual compuestas (CAGR) diferenciales: LPWA lidera con un 35% en 2021 al 2023 y 21% en 2023 al 2030, mientras que 5G IoT experimenta un auge inicial del 147% y se mantiene con un 62% en el segundo periodo;

Figura 1:

Evolución y proyección hasta 2030 del número de dispositivos IoT conectados



reflejando la diversificación de infraestructuras de comunicación para el Internet de las Cosas y subrayan la rápida adopción de tecnologías específicas según sus ventajas en alcance, consumo energético y ancho de banda, configurando así un panorama de despliegue masivo y heterogéneo de dispositivos inteligentes en el siguiente decenio.

En el Perú, las iniciativas de monitoreo remoto en estaciones meteorológicas existen de forma esporádica y con soluciones de alto costo, pero apenas se documentan implementaciones económicas y escalables basadas en IoT. Esta brecha entre la investigación internacional y su aplicación en instituciones nacionales limita el acceso a datos en tiempo real y el desarrollo de sistemas sostenibles (Lema & Cabrera, 2023)

En el departamento de Lambayeque, las cinco estaciones meteorológicas oficiales carecen de sistemas de monitoreo remoto basados en plataformas IoT de bajo costo, lo cual dificulta la gestión agrícola de precisión, la predicción de eventos climáticos extremos y la optimización de recursos hídricos en la región (Rubiños et al., 2023)

Investigar y desarrollar una plataforma IoT de bajo costo para monitoreo remoto es crucial por su potencial impacto en la agricultura de precisión, la gestión de riesgos climáticos y la administración eficiente de recursos hídricos, ámbitos donde la disponibilidad inmediata de datos meteorológicos contribuye a decisiones más informadas, reducción de pérdidas económicas y fortalecimiento de la resiliencia ante eventos extremos (Carranza et al., 2024).

La presente tesis se fundamenta en la necesidad de trasladar al contexto local de Chiclayo los avances en plataformas IoT eficientes y económicas documentados internacionalmente, promoviendo una solución accesible que fortalezca la gestión meteorológica regional y aporte al desarrollo sostenible de Lambayeque(Castro & Ramírez, 2024).

1 CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes Internacionales

Chamba (2022) planteó como objetivo el crear un prototipo autónomo que monitoree parámetros ambientales y los transmita mediante WiFi. Empleando metodología experimental, diseñó un anemómetro asimétrico innovador basado en el encoder AS5048A y utilizó el sensor BME688 para medir temperatura, humedad, presión y calidad del aire. La placa ESPDUINO-32 gestionó la integración y transmisión de datos a la plataforma ThingSpeak, mientras un sistema solar aseguró su autonomía energética. Los resultados mostraron un dispositivo funcional con precisión entre 58.8-87.5% para dirección del viento y un coste (24-73€) significativamente inferior a alternativas comerciales, demostrando la viabilidad de desarrollar estaciones meteorológicas accesibles con IoT.

Betancur (2021), propuso desarrollar un prototipo de estación meteorológica parametrizable, robusta y funcional en condiciones extremas. Utilizando la metodología de Karl T. Ulrich, identificó requerimientos técnicos, diseñó subsistemas de energía y respaldo de información, ensambló el dispositivo integrando tecnologías IoT, y verificó su funcionamiento en campo. El prototipo implementó un Feather M0 Adalogger, comunicación GPRS/GSM, batería principal de descarga profunda, batería auxiliar, panel solar y maletín de seguridad IP68, probándose en la Reserva Ecológica San Sebastián de la Castellana a 2911 msnm. Los resultados confirmaron su resistencia a intemperie, transmisión confiable de datos a la nube, bajo costo, facilidad de transporte e instalación, y diseño modular que permite mantenimiento ágil.

Angulo (2023), propuso como objetivo crear un sistema de monitoreo continuo de parámetros meteorológicos y contaminación del aire mediante tecnología IoT. La metodología implementó un modelo de arquitectura IoT de tres capas (sensorial, conectividad y aplicación), desarrollando dos nodos sensores con microcontroladores ESP8266 y sensores DHT11, BMP180 y GP2Y1010AU0F. La muestra incluyó dos ubicaciones en Esmeraldas (PUCESE y CODESA). Se utilizó la plataforma Ubidots para visualización web y protocolo MQTT para comunicación. Los resultados evidenciaron un sistema funcional que registró temperatura (27-29°C), humedad (74-90%), densidad de polvo (0.029-0.223kg/m³) y material particulado (6084216-7756230mg/m³). Se concluyó que los sensores IoT de bajo costo ofrecen una solución viable y escalable para monitoreo ambiental.

1.1.2 Antecedentes Nacionales

Arteaga (2024), planteó como objetivo el optimizar recursos agrícolas mediante tecnología avanzada, empleó metodología aplicada y experimental con enfoque cuantitativo, implementando tres estaciones en Arequipa (Cayma, Socabaya y Hunter) basadas en ESP8266, sensores DHT-11, ML8511, comunicación MQTT y visualización en Grafana. Los resultados demostraron alta confiabilidad (81.55%-97.43%) comparados con mediciones oficiales del SENAMHI, validando que el sistema proporciona datos precisos en tiempo real sobre condiciones ambientales, permitiendo decisiones agrícolas informadas. La tesis concluye que la implementación del prototipo optimiza el monitoreo ambiental en cultivos de cebolla, mejorando la productividad y reduciendo impactos ambientales negativos asociados con prácticas agrícolas ineficientes.

Guillen (2021), desarrolló un sistema para monitorear variables meteorológicas (temperatura, humedad, calidad del aire y radiación UV) utilizando recursos electrónicos de bajo costo. Empleando metodología RUP para el desarrollo de software y una investigación cuantitativa-descriptiva, implementó una plataforma IoT con Arduino, Raspberry Pi y sensores ambientales para realizar pruebas en Arequipa e Ilo (Perú). Los resultados mostraron una diferencia del 18% respecto a estaciones meteorológicas comerciales, validando la factibilidad de crear sistemas de monitorización accesibles y económicamente viables que pueden implementarse en localidades donde no existen estaciones meteorológicas convencionales.

Solano (2021), propuso como objetivo de diseñar una estación meteorológica automática que transmita datos vía radiofrecuencia a internet desde áreas sin cobertura. La metodología incluyó el diseño e implementación del hardware para medir temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación UV, aplicando técnicas de bajo consumo energético y comunicación inalámbrica mediante módulos XBee. La estación fue probada comparando sus mediciones con equipos estandarizados, obteniendo errores relativos promedio de 3.31%, 2.75%, 0.9% y 0% para los parámetros monitoreados. Se logró implementar exitosamente la comunicación entre la estación remota e internet utilizando una estación base con Raspberry Pi y Node-RED, permitiendo la visualización en tiempo real de los parámetros ambientales desde cualquier ubicación con acceso a internet.

1.2 Bases Teóricas

1.2.1 Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT) es la red de dispositivos físicos interconectados que contienen electrónica integrada, software, sensores y conectividad, que les permite recopilar e intercambiar datos (Tolozza et al., 2023). El IoT permite la integración del mundo físico con sistemas basados en computadoras, resultando en mejoras de eficiencia, precisión económica y reducción de la intervención humana (Ioannou et al., 2021).

Figura 2:

Internet de las Cosas (IoT)



A. Los conceptos fundamentales incluyen:

- ✓ **Dispositivos conectados:** Objetos físicos equipados con sensores, actuadores y conectividad (Ahrend et al., 2021).
- ✓ **Identificación única:** Cada dispositivo posee un identificador único (como direcciones IP o identificadores RFID).

Figura 3:

Conceptos fundamentales



- ✓ **Comunicación M2M (Machine-to-Machine):** Capacidad de intercambiar información entre dispositivos sin intervención humana.
- ✓ **Edge computing:** Procesamiento de datos en el dispositivo o cerca de la fuente de datos para reducir latencia y tráfico de red.
- ✓ **Analítica de datos:** Procesamiento de grandes volúmenes de datos generados por dispositivos IoT para obtener información útil (Agarwal et al., 2022).

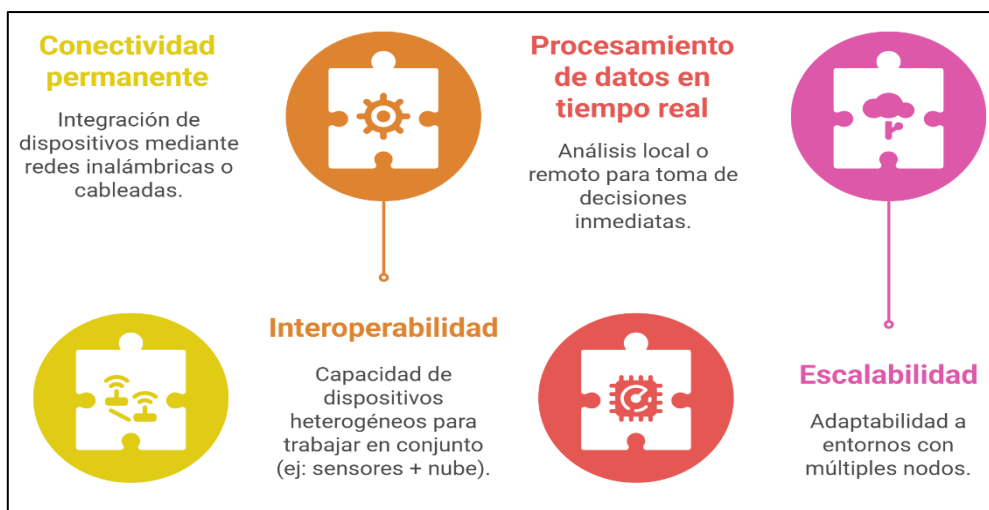
B. Características:

- ✓ **Conectividad permanente:** Capacidad de los dispositivos IoT para mantenerse interconectados en cualquier ubicación geográfica, utilizando redes inalámbricas o cableadas, garantizando la transmisión continua de datos (Hampe et al., 2021).

- ✓ **Interoperabilidad:** Habilidad de dispositivos heterogéneos (sensores, actuadores, servidores) de diferentes fabricantes o tecnologías para intercambiar datos y funcionar de manera coordinada (Ahmed et al., 2023).

Figura 4:

Características de IoT



- ✓ **Procesamiento de datos en tiempo real:** Capacidad de analizar y actuar sobre los datos generados por los sensores en cuestión de segundos o milisegundos, ya sea localmente (edge computing) o en la nube.
- ✓ **Escalabilidad:** Capacidad del sistema IoT para adaptarse a un aumento en el número de dispositivos, usuarios o volumen de datos sin degradar su rendimiento.

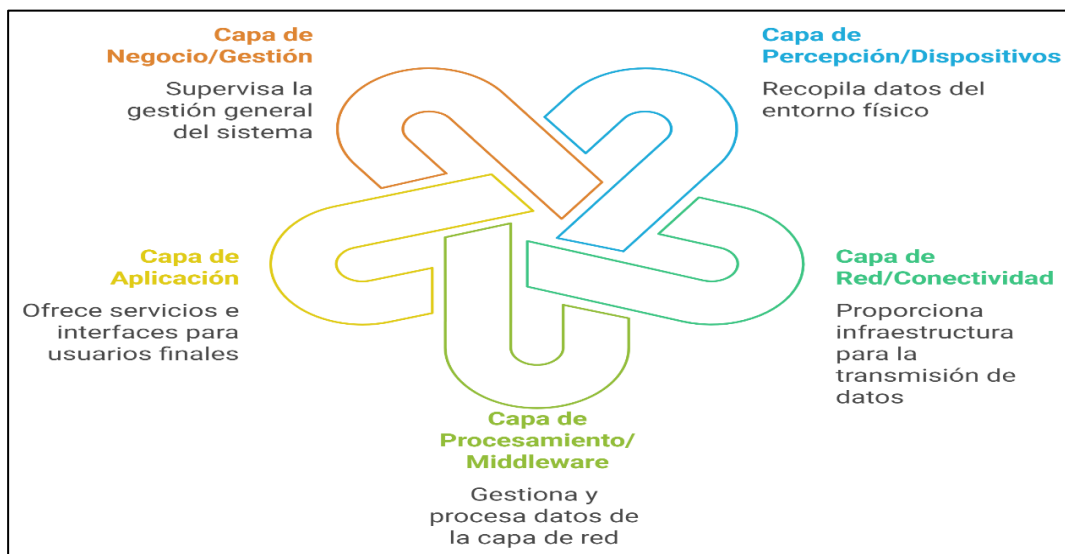
C. Arquitectura de sistemas IoT:

- ✓ **Capa de percepción/dispositivos:** Formada por sensores y actuadores que recopilan datos o ejecutan acciones en el entorno físico, dispositivos como sensores de temperatura, humedad, presión (Abusabah et al., 2022)

- ✓ **Capa de red/conectividad:** Proporciona la infraestructura para transmitir los datos desde los dispositivos hacia las capas superiores, tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN, Zigbee, redes celulares, etc.
- ✓ **Capa de procesamiento/middleware:** Gestiona los datos provenientes de la capa de red, realiza filtrado, agregación y procesamiento preliminar.

Figura 5:

Arquitectura de sistemas IoT



- ✓ **Capa de aplicación:** Proporciona servicios específicos e interfaces para usuarios finales. Incluye dashboards, aplicaciones móviles, sistemas de alertas y otras interfaces que permiten la visualización y análisis de datos.
- ✓ **Capa de negocio/gestión:** Responsable de la gestión general del sistema, incluyendo modelos de negocio, privacidad de datos y aspectos de seguridad.

D. Protocolos de comunicación en IoT

Los protocolos de comunicación en IoT se pueden clasificar según su función:

i. Protocolos de capa de aplicación:

- ✓ **MQTT (Message Queuing Telemetry Transport):** Protocolo ligero basado en publicación/suscripción, ideal para conexiones con ancho de banda limitado (Woo et al., 2023).
- ✓ **CoAP (Constrained Application Protocol):** Diseñado para dispositivos con recursos limitados, similar a HTTP pero optimizado para IoT (Almudayni et al., 2022).
- ✓ **HTTP/HTTPS:** Utilizado para comunicaciones RESTful, aunque más pesado que protocolos específicos de IoT (Chen et al., 2025) .
- ✓ **AMQP (Advanced Message Queuing Protocol):** Protocolo de mensajería orientado a transacciones (Mukadam & Hirikude, 2023).
- ✓ **WebSockets:** Permite comunicación bidireccional en tiempo real .

ii. Protocolos de capa de red:

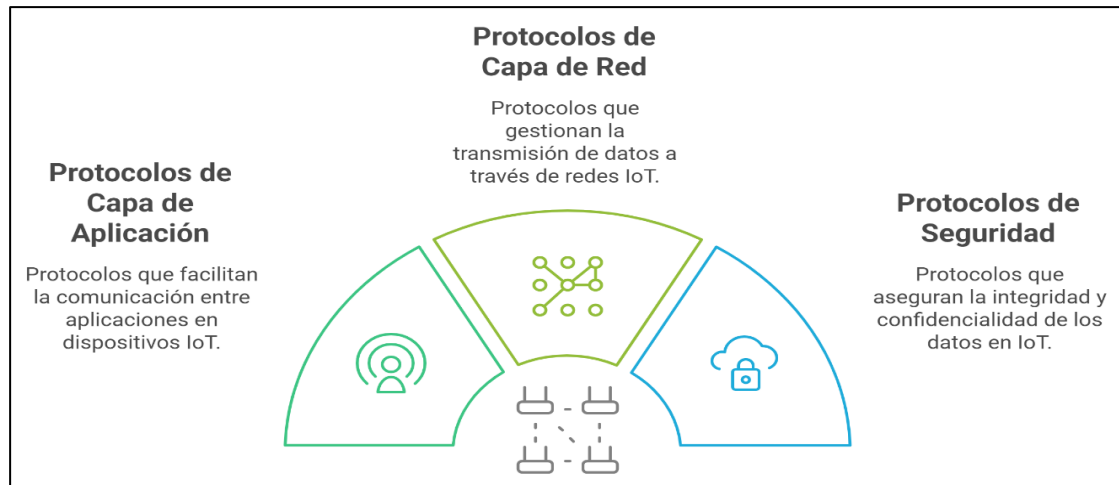
- ✓ **IPv6/6LoWPAN:** Adaptación de IPv6 para redes de bajo consumo.
- ✓ **RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks):** Protocolo de enrutamiento para redes con pérdidas.
- ✓ **BLE (Bluetooth Low Energy):** Versión de bajo consumo de Bluetooth.

iii. Protocolos de seguridad:

- ✓ **DTLS (Datagram Transport Layer Security):** Seguridad para protocolos basados en datagramas.
- ✓ **TLS/SSL:** Para asegurar comunicaciones.

Figura 6:

Protocolos de comunicación en IoT



1.2.2 Estaciones meteorológicas

A. Fundamentos y componentes básicos

Una estación meteorológica es un conjunto de instrumentos diseñados para medir y registrar condiciones atmosféricas (Carranza et al., 2024). Los componentes básicos incluyen:

i. Unidad central de procesamiento: Microcontrolador o computadora que recopila, procesa y almacena datos de los sensores. En sistemas modernos, también gestiona la conectividad (Cerdan & Andrade, 2022).

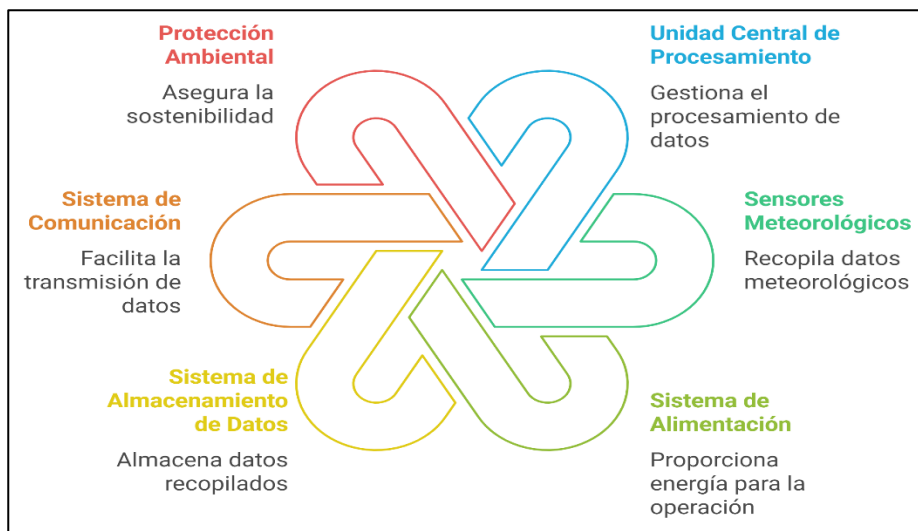
ii. Sensores meteorológicos:

- ✓ Termómetro (sensor de temperatura)
- ✓ Higrómetro (sensor de humedad)
- ✓ Barómetro (sensor de presión atmosférica)
- ✓ Anemómetro (sensor de velocidad del viento)
- ✓ Veleta (sensor de dirección del viento)
- ✓ Pluviómetro (sensor de precipitación)
- ✓ Piranómetro (sensor de radiación solar)

- iii. **Sistema de alimentación:** Puede incluir conexión a la red eléctrica, baterías o sistemas de energía renovable como paneles solares.
- iv. **Sistema de almacenamiento de datos:** Memoria interna, tarjetas SD o almacenamiento en la nube.
- v. **Sistema de comunicación:** Para transmitir datos a un sistema central o a la nube (Wi-Fi, GSM, radio, LoRa, etc.).
- vi. **Protección ambiental:** Cajas protectoras, escudos de radiación y otros elementos que protegen los componentes electrónicos de condiciones climáticas adversas.

Figura 7:

Componentes básicos de un sistema de monitoreo ambiental



B. Variables meteorológicas y su medición

i. Temperatura:

- **Unidad:** Grados Celsius (°C), Fahrenheit (°F) o Kelvin (K)
- **Sensores:** Termistores NTC/PTC, RTD (PT100, PT1000), termopares, sensores digitales (DHT22, DS18B20, BME280)
- **Precisión típica:** $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ hasta $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ en sensores de precisión.

ii. Humedad relativa:

- **Unidad:** Porcentaje (%)
- **Sensores:** Capacitivos (DHT22, SHT31, BME280), resistivos
- **Precisión típica:** $\pm 3-5\%$ hasta $\pm 2\%$ en sensores de precisión

iii. Presión atmosférica:

- **Unidad:** Hectopascales (hPa), milibares (mb), mmHg
- **Sensores:** Piezoeléctricos, capacitivos (BMP280, BME280)
- **Precisión típica:** $\pm 1-2$ hPa

iv. Velocidad del viento:

- **Unidad:** Metros por segundo (m/s), kilómetros por hora (km/h), nudos
- **Sensores:** Anemómetros de cazoletas, ultrasónicos, de hilo caliente
- **Precisión típica:** ± 0.5 m/s o $\pm 5\%$ de la lectura

v. Dirección del viento:

- **Unidad:** Grados (0-360°), donde 0° o 360° es norte
- **Sensores:** Veletas con potenciómetros, brújulas digitales, anemómetros ultrasónicos
- **Precisión típica:** $\pm 5^\circ$

vi. Precipitación:

- **Unidad:** Milímetros (mm)
- **Sensores:** Pluviómetros de balancín, pesaje, ópticos

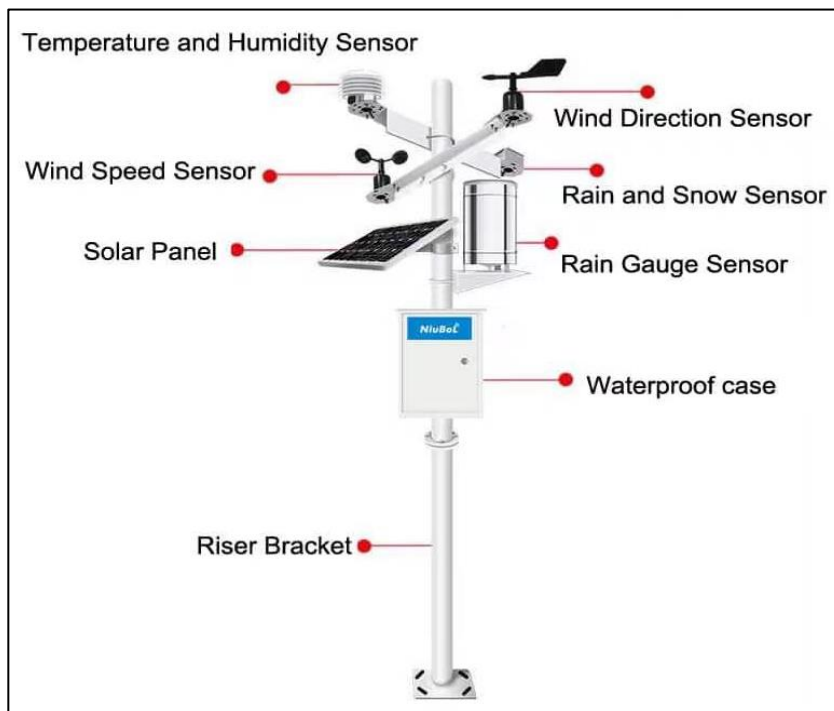
- **Precisión típica:** ± 0.2 mm o $\pm 5\%$ del total

vii. Radiación solar:

- **Unidad:** Vatios por metro cuadrado (W/m^2)
- **Sensores:** Piranómetros, células fotovoltaicas calibradas
- **Precisión típica:** $\pm 5-10\%$ en sensores económicos

Figura 8:

Estaciones meteorológicas IoT



2 CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES

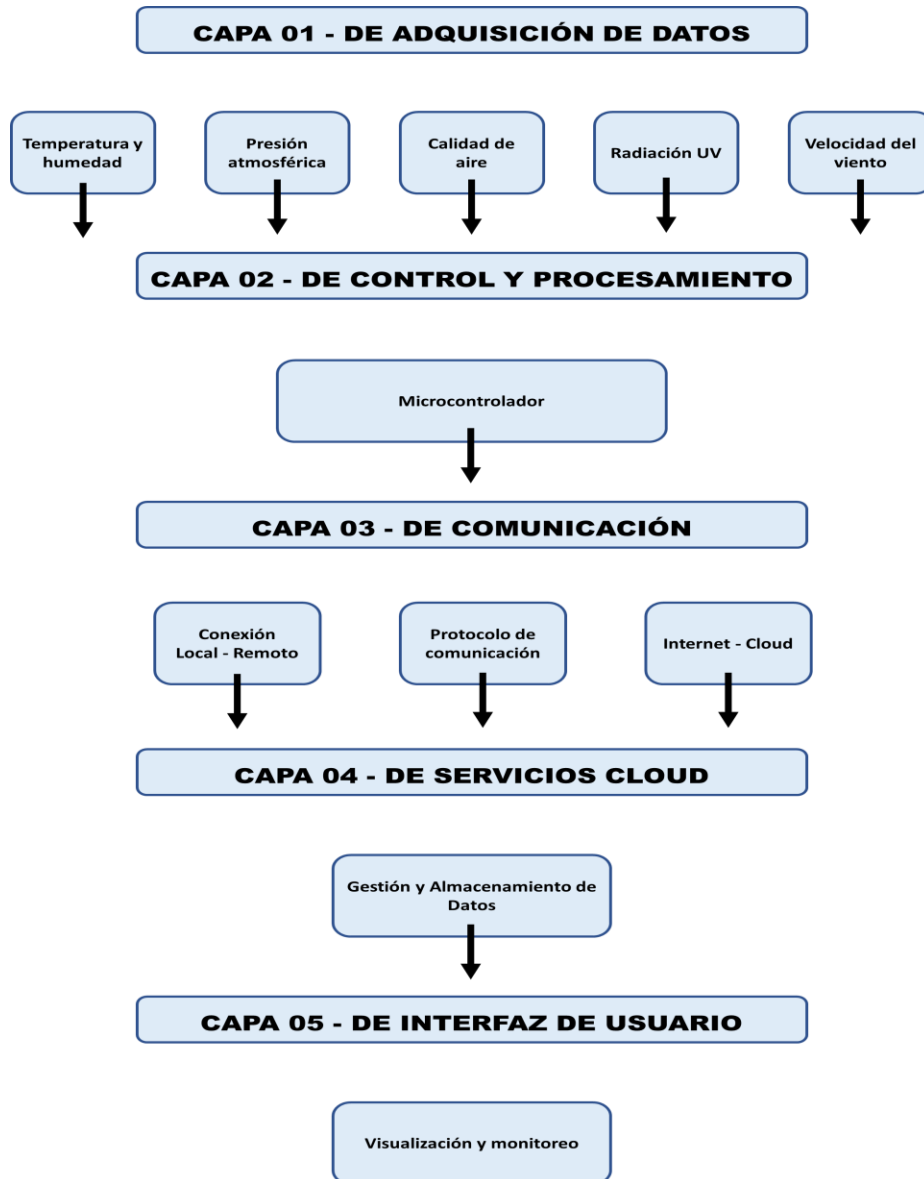
2.1 Diseño de Contrastación de Hipótesis

Partiendo de los fundamentos teóricos del Internet de las Cosas (IoT) y las tecnologías de monitoreo meteorológico, la presente investigación desarrollará un estudio técnico orientado al diseño de una plataforma IoT de bajo costo que garantice el monitoreo remoto efectivo de una estación meteorológica en el Distrito de Chiclayo, Departamento de Lambayeque. Considerando las condiciones climáticas propias de la región y las limitaciones presupuestarias, se propondrá una solución tecnológica basada en microcontroladores, sensores meteorológicos y protocolos de comunicación eficientes, con el propósito de proporcionar un sistema de monitoreo estable, preciso y sostenible, adecuado para la recolección de datos meteorológicos en entornos urbanos, El estudio contemplará el diseño de la arquitectura hardware y software, simulaciones mediante software especializado y una evaluación sistemática de parámetros técnicos del sistema propuesto, con el fin de validar su rendimiento, precisión y escalabilidad. Se analizarán aspectos críticos como la adquisición de datos, transmisión, almacenamiento y visualización de variables meteorológicas (temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad del viento y precipitación), evaluando el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones de operación (Guarnizo & Osorio, 2021).

Esta investigación, de tipo descriptiva, con enfoque cuantitativo y diseño no experimental, tiene como finalidad generar una propuesta replicable que contribuya al desarrollo de sistemas de monitoreo meteorológico accesibles económicamente para instituciones y organizaciones con recursos limitados, facilitando así la toma de decisiones basada en datos meteorológicos locales y en tiempo real en el marco de una infraestructura tecnológica sostenible (Guillen, 2021).

Figura 9:

Diseño de Contratación Hipótesis



2.2 Población, muestra

2.2.1 Población

Comprende las estaciones meteorológicas basadas en tecnologías IoT de bajo costo implementadas en zonas urbanas con características climatológicas similares a las del Distrito de Chiclayo, Departamento de Lambayeque.

2.2.2 Muestra

Plataformas IoT de bajo costo diseñadas específicamente para el monitoreo remoto de variables meteorológicas (temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad del viento y precipitación) en el Distrito de Chiclayo.

2.3 Técnicas, instrumentos, equipos y materiales

Plataformas IoT de bajo costo diseñadas específicamente para el monitoreo remoto de variables meteorológicas (temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad del viento y precipitación) en el Distrito de Chiclayo.

3 CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo expone los hallazgos obtenidos del diseño de la plataforma IoT de bajo costo para el monitoreo meteorológico en el distrito de Chiclayo, se han organizado siguiendo los tres objetivos específicos planteados, permitiendo una comprensión sistemática de las decisiones técnicas adoptadas y su fundamentación.

En primer lugar, se presenta el análisis del estado del arte que orientó la selección de componentes, identificando soluciones tecnológicas viables y sus implicancias en precisión, consumo energético y costo. A continuación, se desarrolla la arquitectura de hardware diseñada, incluyendo las especificaciones de sensores meteorológicos, el procesador central Raspberry Pi 3B, y los esquemas de conexión simulados, validando así su funcionamiento integrado, detallando la configuración del sistema de adquisición de datos, el procesamiento mediante interfaces digitales y analógicas, así como la estructura de almacenamiento local y visualización web.

Finalmente, se examina la viabilidad técnica de escalabilidad mediante un análisis comparativo de tecnologías de conectividad mediante radioenlace punto a punto, fibra óptica y Starlink, evaluando parámetros de velocidad, latencia, consumo energético y costos operativos.

Los resultados nos muestran que el enlace inalámbrico de 5.8 GHz constituye la alternativa más eficiente para la distancia establecida, equilibrando rendimiento técnico con sostenibilidad económica y energética del sistema propuesto.

3.1 Resultados

El diseño de una plataforma IoT para monitoreo meteorológico parte de las variables ambientales a medir, la selección de estos parámetros determina tanto la arquitectura del sistema como la instrumentación requerida, la temperatura y la humedad relativa caracterizan las condiciones térmicas e hídricas del aire, la presión atmosférica permite inferir cambios en las masas de aire, mientras que la velocidad y dirección del viento junto con la precipitación completan el perfil climático del diseño, la elección óptima de sensores responde a las características del departamento de Lambayeque, donde la variabilidad climática influye directamente en actividades productivas como la agricultura de riego y la gestión de recursos hídricos.

Una vez definidos los parámetros a medir, el siguiente paso consiste en seleccionar los sensores más adecuados, considerando de manera equilibrada su precisión, rango de operación, consumo energético y costo, cada dispositivo contribuirá lecturas específicas que deberán ser procesadas, validadas y almacenadas con eficiencia para evitar pérdidas de información o distorsiones en los registros, esta fase resulta decisiva para la eficacia del sistema, pues la calidad de los datos generados por la plataforma IoT depende de la confiabilidad y estabilidad de los sensores elegidos, validando los análisis meteorológicos que se realizarán a partir de ellos.

Con los sensores instalados, el siguiente paso es el procesamiento de la información a través de una Raspberry Pi 3, que actúa como unidad central de control del sistema, esta placa, de bajo costo y alta versatilidad, concentra los datos provenientes de los distintos sensores, ejecuta los cálculos necesarios y permite implementar rutinas de supervisión que pueden derivar en alertas ante condiciones meteorológicas específicas, además, su capacidad de integración con diversas

tecnologías de conectividad optimiza el carácter modular y escalable de la plataforma, convirtiéndola en una alternativa adecuada para investigaciones con IoT, orientados al monitoreo remoto de variables ambientales.

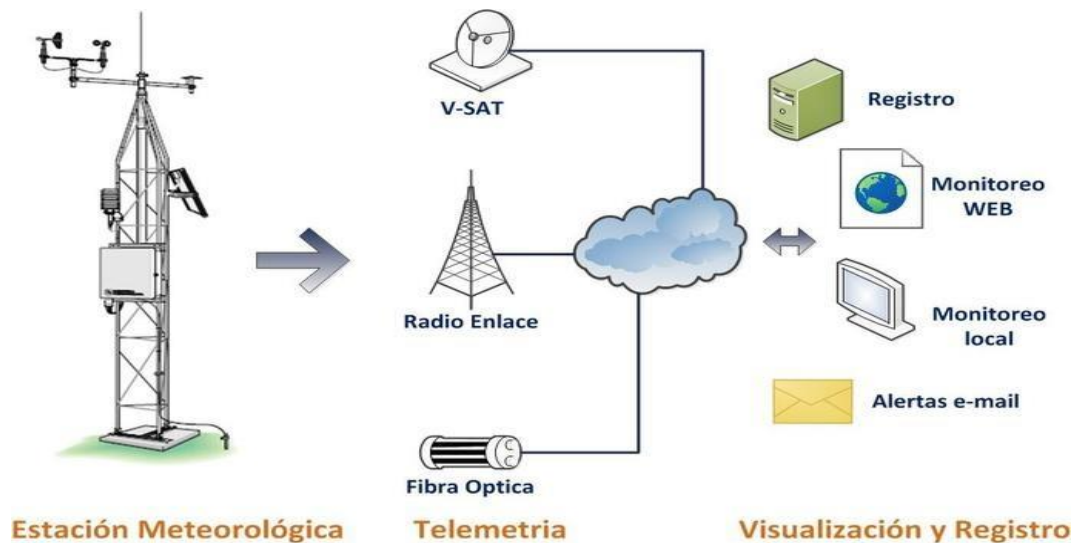
La conectividad constituye un componente estratégico en la solución propuesta, en función de la ubicación de la estación y de la infraestructura disponible, el enlace hacia internet puede establecerse mediante sistemas V-SAT, radioenlace o fibra óptica, seleccionando la opción más coherente con las condiciones técnicas y geográficas del entorno, la capacidad de conexión permite que los datos meteorológicos sean transmitidos en tiempo real hacia servidores o plataformas en la nube, donde pueden ser almacenados, visualizados y analizados de forma centralizada, de este modo, se habilita el acceso remoto y la supervisión continua de la estación, y así poder tomar decisiones basada en información actualizada.

Con la estación ya conectada a internet, es posible incorporar herramientas que convierten los datos en información útil para la toma de decisiones, entre ellas, los paneles o dashboards web que permiten visualizar de manera organizada y comprensible las variables meteorológicas en tiempo real, facilitando la identificación de tendencias y comportamientos atípicos, además, los sistemas de registro almacenan series históricas que sirven de base para análisis comparativos y estudios de variabilidad climática, asimismo, la implementación de mecanismos de alerta mediante correo electrónico u otros canales digitales mantiene informados a los usuarios ante cambios significativos en las condiciones del tiempo, reforzando el carácter preventivo y operativo de la plataforma IoT.

La figura N° 10, representa el flujo integral de información en un sistema de monitoreo meteorológico remoto, a la izquierda se observa la estación meteorológica con sus sensores instalados en torre, encargados de medir las variables climáticas, los datos registrados se envían mediante diferentes alternativas de enlace como V-SAT, radioenlace o fibra óptica hacia la nube, donde se realiza la telemetría, desde allí, la información se deriva a módulos de registro y almacenamiento, a una plataforma de monitoreo web, a estaciones de monitoreo local y a un sistema de alertas por correo electrónico, configurando una solución que integra captura de datos, transmisión y visualización en tiempo real.

Figura 10

Arquitectura de comunicación y servicios de monitoreo



3.1.1 Criterios de Elección del Módulo de Control en la Estación Meteorológica

Para el desarrollo de la estación meteorológica se optó por un sistema basado en la Raspberry Pi 3B, seleccionada por su ponderación entre capacidad de procesamiento y bajo consumo energético, siendo una plataforma para gestionar la adquisición, el procesamiento y la

transmisión de datos, evitando al mismo tiempo un sobredimensionamiento innecesario de recursos, mostrando un diseño eficiente y coherente con el enfoque de bajo costo y con las exigencias de operación continua propias de una plataforma IoT destinada al monitoreo remoto de variables meteorológicas.

En relación con los sensores, se seleccionaron dispositivos de bajo consumo energético que, al mismo tiempo, ofrecen una precisión inferior al 5 %, siendo un equilibrio entre eficiencia, exactitud y costo que permite diseñar una estación meteorológica estable y confiable, capaz de registrar las variables de interés sin encarecer innecesariamente la solución, optimizando así, el desempeño del sistema y se reducen los costos operativos.

La alimentación eléctrica de la estación se constituye como componente crítico del diseño, para asegurar su funcionamiento continuo, se propuso un esquema híbrido de energía en el que la fuente principal es un panel solar, encargado de suministrar potencia al sistema y de cargar un banco de baterías destinado a mantener la operación durante los periodos sin radiación solar, como respaldo, la plataforma puede conectarse a la red eléctrica domiciliaria, lo que garantiza la continuidad del servicio aun frente a condiciones climáticas adversas o eventuales interrupciones en la generación fotovoltaica.

Con el propósito de optimizar el diseño y la operación de la plataforma, se contemplaron dos fuentes de alimentación eléctrica, el sistema fotovoltaico con banco de baterías como suministro principal y la red eléctrica domiciliaria como respaldo, reduciendo la complejidad del sistema sin comprometer su continuidad de servicio y, al mismo tiempo, garantizando la energía

necesaria para los módulos de conectividad a internet, componente esencial para asegurar el monitoreo remoto, la transmisión oportuna de los datos meteorológicos y la adecuada integración de la estación con la infraestructura IoT propuesta en esta investigación.

La integración de la Raspberry Pi 3B con los sensores meteorológicos y los módulos de conectividad para la transmisión remota de los datos es el núcleo de la arquitectura general del sistema, además con el propósito de asegurar un suministro eléctrico estable y confiable que permita la operación ininterrumpida de la estación meteorológica se basó el diseño del sistema de energización. Esta estructura facilitó una planificación ordenada del diseño, contribuyendo a garantizar la coherencia técnica de la plataforma IoT.

3.1.1.1 Arquitectura de la Estación Meteorológica Basada en Raspberry Pi 3B

Para el diseño de la estación meteorológica se seleccionó un sistema basado en Raspberry Pi 3B, elección que se sustenta en su bajo consumo energético, permitiendo disponer de la capacidad de procesamiento necesaria para gestionar la adquisición, el tratamiento y el envío de datos, evitando el sobredimensionamiento de recursos y el consiguiente desperdicio de energía, esta decisión se alinea con el propósito central de la investigación, que es implementar una plataforma IoT de bajo costo, eficiente y sostenible para el monitoreo remoto de variables meteorológicas.

La integración de la Raspberry Pi 3B como unidad de procesamiento principal, conectada a un conjunto de sensores destinados a medir temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar brindan un sistema que asegura que

los datos recolectados se registren en una base de datos local (SQLite) y se representen mediante un panel de visualización implementado sobre tecnologías como Flask o Grafana, permitiendo un seguimiento claro y estructurado de las condiciones climáticas, además la comunicación se establece mediante conexión Wi-Fi, a través de la cual la estación envía la información hacia la nube, habilitando el acceso remoto y la integración con otros servicios de la plataforma IoT.

La tabla N° 01, presenta las especificaciones técnicas de los sensores seleccionados para la estación meteorológica de la plataforma IoT de bajo costo, detallándose para cada parámetro ambiental, el dispositivo seleccionado, su rango típico de medición, la precisión asociada y el tipo de interfaz de comunicación, incluyendo el sensor DS18B20 para temperatura, el DHT22 para humedad relativa, el BMP280 para presión atmosférica, así como anemómetro de cazoletas y veleta con potenciómetro para velocidad y dirección del viento, la precipitación se registra mediante pluviómetro de balancín y la radiación solar mediante un piranómetro simple, la tabla muestra una elección de sensores de bajo consumo y precisión adecuadas para aplicaciones de monitoreo climático y compatibles con interfaces digitales, analógicas y protocolos I2C/SPI, facilitando su integración con la Raspberry Pi.

Tabla 1

Sensores seleccionados para la plataforma IoT

Parámetro	Sensor seleccionado	Rango Típico	Precisión	Interfaz
Temperatura	DS18B20	-55°C a 125°C	+/- 0.5°C	1-Write
Humedad	DHT22	0-100%	+/-2-5%	Digital
Presión	BMP280	300-1100 hPa	+/- 1 hPa	I2C/SPI
Velocidad viento	Anemómetro cazoletas	0-50 m/s	+/- 0.5 m/s	Pulsos
Dirección viento	Veleta potenciómetro	0-360°	+/- 5°	Analógicos
Precipitación	Pluviómetro balancín	0-500 mm	+/- 0.2 mm	Pulsos
Radiación Solar	Piranómetro simple	0-2000 W/m2	+/- 10%	Analógicos

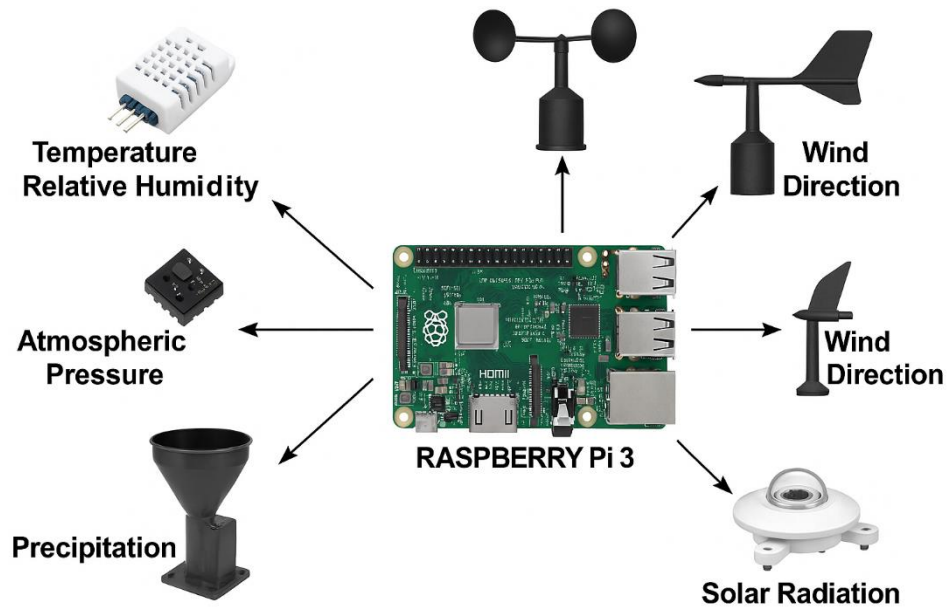
Se establece a la Raspberry Pi 3B como unidad central de adquisición, manejando sus pines GPIO y el bus I2C capaz de integrarse con los distintos sensores meteorológicos, el sensor de temperatura DS18B20 se conecta al GPIO4 mediante el protocolo 1-Wire, mientras que el DHT22, reservado para la medición de temperatura y humedad, emplea el GPIO17 como entrada digital, el sensor de presión atmosférica BMP280 establece su conexión a través del bus I2C, haciendo uso de las líneas SDA y SCL para la transmisión de datos.

El viento y la precipitación se registran mediante conteo de pulsos, el anemómetro se vincula al GPIO23 y el pluviómetro al GPIO24, permitiendo contabilizar los eventos generados por cada giro o basculamiento, la veleta para dirección del viento y el piranómetro para radiación solar se conectan a entradas analógicas a través del convertidor ADC MCP3008, que digitaliza sus señales para su posterior procesamiento en la Raspberry Pi, de esta manera se optimiza el uso de los recursos de hardware y asegura una integración ordenada y eficiente de todos los sensores en la plataforma IoT.

La figura N° 11, muestra la Raspberry Pi 3 como unidad central de la estación meteorológica, a la cual convergen los diferentes sensores encargados de medir las principales variables climáticas, observándose el sensor combinado de temperatura y humedad relativa, el sensor de presión atmosférica, el pluviómetro para registrar la precipitación, el anemómetro para la velocidad del viento, la veleta para la dirección del viento y el piranómetro para la radiación solar, el flujo de datos hacia la plataforma IoT se representan mediante flechas, las cuales conectan cada dispositivo con la Raspberry Pi, donde la información es procesada y posteriormente enviada para su almacenamiento y visualización remota.

Figura 11

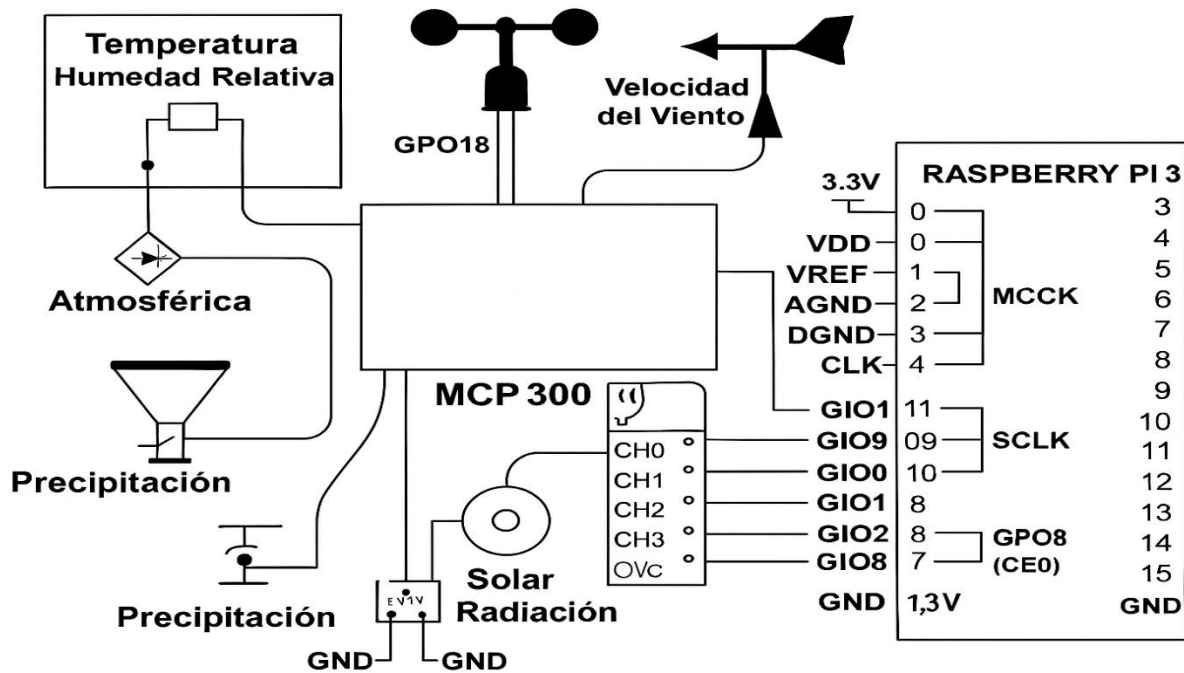
Integración de sensores meteorológicos en la plataforma IoT



La figura N° 12, presenta el diagrama esquemático de conexión entre los sensores meteorológicos, el convertidor analógico–digital MCP300 y la Raspberry Pi 3, en el esquema se integran los módulos de temperatura y humedad relativa, presión atmosférica, precipitación, velocidad del viento y radiación solar, los sensores analógicos se acoplan a las entradas del MCP300, que digitaliza sus señales para ser enviadas a la Raspberry Pi mediante la interfaz SPI, mientras que los sensores de pulsos (como el anemómetro y el pluviómetro) se conectan directamente a pines GPIO específicos, de este modo, el diagrama sintetiza la ruta completa de adquisición de datos, desde los transductores hasta la unidad de procesamiento, y evidencia una arquitectura organizada y consistente con los requerimientos de una plataforma IoT de bajo costo para monitoreo meteorológico.

Figura 12

Arquitectura de adquisición de datos de la estación meteorológica




El sistema de adquisición de datos meteorológicos se estructura en torno a una Raspberry Pi 3, que actúa como plataforma central de procesamiento para la medición de las principales variables atmosféricas, empleando sensores específicos destinados al registro de temperatura y humedad relativa, velocidad del viento, precipitación y radiación solar, los cuales conforman el núcleo de la estación, las señales analógicas generadas por los sensores de temperatura, humedad, precipitación y radiación solar son convertidas en información digital mediante el convertidor analógico - digital MCP3008, que se comunica con la Raspberry Pi a través de la interfaz SPI, la velocidad del viento, en cambio, se obtiene mediante un sensor digital conectado directamente a uno de los puertos GPIO, donde se realiza el conteo de pulsos asociado al giro del anemómetro.


Este sistema, permite una adquisición continua y precisa de los datos ambientales, que posteriormente son procesados, almacenados y utilizados para el análisis de las condiciones meteorológicas, disponiéndose una base de información confiable que respalda el monitoreo integral del clima y la validación de la plataforma IoT de bajo costo propuesta en la presente investigación.


La figura N° 13, muestra el conjunto de módulos de software desarrollados en Python para la plataforma IoT de monitoreo meteorológico, observándose archivos organizados de manera modular, `adc_mcp3008.py` para la lectura del convertidor analógico - digital, `sensores.py` para la gestión de los dispositivos de medición, `database.py` para el registro de datos, `network.py` para la configuración de red y envío de información, y `notificacion.py` para la generación de alertas, el archivo `dashboard.py` implementa la interfaz de visualización de las variables meteorológicas, mientras que `main.py` coordina la ejecución general del sistema, estos scripts estructuran la lógica de adquisición, procesamiento, almacenamiento y presentación de los datos, asegurando un funcionamiento coherente y escalable de la estación meteorológica basada en Raspberry Pi 3.


Figura 13


Estructura modular del software en Python para la plataforma IoT


 `adc_mcp3008.py`


 `dashboard.py`

 `database.py`

 `main.py`

 `network.py`

 `notificacion.py`

 `sensores.py`

La figura N 14, muestra el módulo en Python encargado de la adquisición de las variables meteorológicas en la Raspberry Pi 3, en el código se importan las librerías Adafruit_DHT y adafruit_bmp280 para la lectura de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, así como la función read_channel asociada al convertidor analógico–digital MCP3008, con estas librerías se configuran los sensores (DHT22 y BMP280) y se definen funciones específicas para obtener temperatura y humedad, presión, velocidad del viento, precipitación, dirección del viento y radiación solar, para las magnitudes analógicas, el código convierte el valor leído (0–1023) en unidades físicas (grados y W/m²), devolviendo los resultados redondeados.

Figura 14

Módulo en Python - adquisición de las variables meteorológicas

```
1  import Adafruit_DHT
2  import time
3  import board
4  import busio
5  import adafruit_bmp280
6  from adc_mcp3008 import read_channel
7  DHT_SENSOR = Adafruit_DHT.DHT22
8  DHT_PIN = 4
9  i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA)
10 bmp280 = adafruit_bmp280.Adafruit_BMP280_I2C(i2c)
11 def read_temperature_humidity():
12     humedad, temperatura = Adafruit_DHT.read_retry(DHT_SENSOR, DHT_PIN)
13     return temperatura, humedad
14 def read_presion():
15     return bmp280.presion
16 def read_velocidad_viento():
17     return 3.5
18 def read_precipitacion():
19     return 0.2
20 def read_direccion_viento():
21     value = read_channel(0)
22     angle = (value / 1023.0) * 360
23     return round(angle, 2)
24 def read_radiacion_solar():
25     value = read_channel(1)
26     radiation = (value / 1023.0) * 1200
27     return round(radiation, 2)
28
```

Este módulo constituye la capa de adquisición de datos del software, encapsulando la lectura de los sensores y proporcionando a la plataforma IoT valores ya calibrados y listos para su almacenamiento y visualización.

La implementación del sistema de monitoreo meteorológico se basa en la conexión de un conjunto de sensores a una Raspberry Pi 3, que actúa como unidad central de procesamiento, con el propósito de registrar de manera continua los parámetros ambientales clave como la temperatura, la humedad relativa, la presión atmosférica, la velocidad y la dirección del viento, la precipitación y la radiación solar, para este proceso se emplean librerías especializadas que facilitan la comunicación con cada sensor y permiten la lectura estructurada de sus valores, asegurando una interacción confiable entre el hardware y el software, y proporciona datos consistentes que servirán para el almacenamiento, el análisis y la posterior evaluación del desempeño de la plataforma IoT de bajo costo propuesta en esta investigación.

3.1.1.2 Librerías empleadas para la adquisición de datos meteorológicos

En la capa de software se recurre a un conjunto de librerías especializadas que posibilitan la comunicación directa entre la Raspberry Pi 3 y los distintos sensores meteorológicos, como la librería Adafruit_DHT, que se utiliza para gestionar la lectura conjunta de temperatura y humedad relativa a partir del sensor DHT22, mientras que Adafruit_BMP280 permite obtener la presión atmosférica registrada por el sensor BMP280 mediante la interfaz I²C, para los dispositivos que entregan señales analógicas, se incorpora el módulo adc_mcp3008, encargado de leer y digitalizar los valores provenientes del convertidor MCP3008 antes de su procesamiento, además las librerías board y busio proporcionan las abstracciones necesarias para la configuración de pines y la

implementación de los canales de comunicación, asegurando una integración ordenada y estructurada del hardware con la plataforma de software de la estación meteorológica.

3.1.1.3 Parámetros de conexión de los sensores DHT22 y BMP280

En la fase de configuración se establecen los parámetros necesarios para la correcta operación de los sensores meteorológicos, primero seleccionamos el tipo de dispositivo DHT a emplear y el pin digital específico de la Raspberry Pi 3 al que se conectará, para garantizar una lectura estable de temperatura y humedad relativa, además, se inicializa la interfaz de comunicación I²C destinada al sensor BMP280, responsable de la medición de la presión atmosférica, permitiendo que ambos sensores queden adecuadamente integrados al sistema de adquisición de datos, asegurando una correcta lectura y la posterior interoperabilidad con los módulos de procesamiento y almacenamiento de la plataforma IoT.

3.1.1.4 Funciones de lectura de variables meteorológicas

El módulo de adquisición implementa un conjunto de funciones modulares, cada una asociada a un parámetro meteorológico, lo que ayuda a la claridad del código y su mantenimiento, la función `read_temperature_humidity()` ejecuta la lectura conjunta de temperatura y humedad relativa a través del sensor DHT22 y devuelve ambos valores listos para su posterior procesamiento o almacenamiento, también la función, `read_presion()` obtiene la presión atmosférica registrada por el BMP280 mediante la interfaz I²C, en esta parte del sistema, las funciones `read_velocidad_viento()` y `read_precipitacion()` retornan valores constantes (3.5 m/s y 0.2 mm, respectivamente), constituyendo lecturas simuladas mientras se completa la integración con los sensores físicos correspondientes.

La dirección del viento se calcula en `read_direccion_viento()`, a partir de una señal analógica muestreada por el MCP3008; el valor del ADC (0–1023) se normaliza y se transforma a un ángulo comprendido entre 0° y 360°, además `read_radiacion_solar()` estima la radiación incidente a partir de la lectura analógica del piranómetro, escalando el resultado mediante un factor de conversión para expresarlo en unidades representativas de W/m², estas funciones proporcionan una interfaz para la captura de datos climáticos dentro de la plataforma IoT propuesta.

La figura N° 15, muestra el código en Python encargado de brindar comunicación SPI entre la Raspberry Pi 3 y el convertidor analógico–digital MCP3008, se importa el módulo `spidev`, se crea una instancia del dispositivo SPI y se abre el canal físico (bus 0, dispositivo 0), definiendo una velocidad máxima de transferencia de 1 350,000 Hz, a continuación, se implementa la función `read_channel(channel)`, que envía al MCP3008 la trama de control correspondiente al canal de entrada seleccionado y recibe tres bytes de respuesta, a partir de esta información, el código reconstruye el valor digital entregado por el ADC y lo retorna como dato bruto, listo para ser convertido a unidades físicas por las rutinas de procesamiento de la plataforma IoT, permitiendo a la estación meteorológica leer, de forma eficiente y confiable, las señales analógicas de los sensores conectados.

El código es un componente para la adquisición de señales analógicas, al implementar la comunicación con el convertidor A/D mediante el protocolo SPI, al emplear SPI permite trabajar con velocidades de transferencia elevadas, apropiadas para aplicaciones de monitoreo en tiempo real, y ofrece una comunicación síncrona que reduce errores y pérdidas de información, además, la posibilidad de direccionar distintos canales del ADC facilita la incorporación de múltiples

sensores en una misma interfaz, de este modo, la función desarrollada hace posible integrar, dentro de un sistema digital basado en Raspberry Pi 3, sensores analógicos como el fotodiodo para la medición de radiación solar y el potenciómetro asociado a la dirección del viento, garantizando que las señales capturadas sean convertidas y procesadas correctamente para su posterior almacenamiento, análisis y visualización en la plataforma IoT de bajo costo.

Figura 15

Código de comunicación entre la Raspberry Pi y el ADC MCP3008

```
1  import spidev
2  spi = spidev.SpiDev()
3  spi.open(0, 0)
4  spi.max_speed_hz = 1350000
5  def read_channel(channel):
6      adc = spi.xfer2([1, (8 + channel) << 4, 0])
7      data = ((adc[1] & 3) << 8) + adc[2]
8      return data
9
```

3.1.1.5 Librería spidev para la comunicación SPI con el ADC MCP3008

Al implementar el sistema de adquisición de datos analógicos se recurre a la librería spidev, encargada de habilitar la comunicación mediante el protocolo SPI en sistemas basados en Linux, como la Raspberry Pi 3, el cual establece y controla el enlace entre el dispositivo maestro y periféricos externos, el convertidor analógico - digital MCP3008, gestiona la transferencia de tramas de datos con la velocidad y sincronía requeridas por la aplicación, debido a spidev, la plataforma puede leer de forma eficaz los valores procedentes de los sensores conectados al ADC, integrándolos sin fricciones al flujo de procesamiento y almacenamiento de la estación meteorológica.

3.1.1.6 Parámetros de configuración del bus SPI en la Raspberry Pi 3

La configuración del bus SPI se ejecuta creando, en primer término, una instancia de comunicación mediante `spi = spidev.SpiDev()`, la que actuará como enlace entre la Raspberry Pi 3 y el convertidor analógico - digital MCP3008, después, la instrucción `spi.open(0, 0)` habilita el canal correspondiente al bus 0 y dispositivo 0, en correlación con la disposición física del hardware seleccionada para la estación meteorológica, estableciéndose `spi.max_speed_hz = 1350000`, fijando una velocidad máxima de transferencia de 1,35 MHz., valores que permiten alcanzar una comunicación rápida y estable, adecuada para la adquisición continua de datos analógicos y coherente con los requerimientos de una plataforma IoT de monitoreo meteorológico en tiempo real.

La figura N° 16, muestra el módulo en Python responsable de la gestión de la base de datos local de la estación meteorológica, implementada con SQLite, definiendo el archivo `weather_station.db` y la función `init_db()`, que crea la tabla `measurements`, lugar donde se almacenan las mediciones con un identificador autoincremental, una marca de tiempo y las variables temperatura, humedad, presión, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar, además, se implementa la función `insert_data()`, recibiendo como parámetros los valores registrados por los sensores y los inserta en la tabla mediante una instrucción, garantizando la integridad de los datos, de tal forma que se brinda un repositorio estructurado y ligero para el registro histórico de las condiciones atmosféricas, que facilita el análisis posterior del comportamiento climático y la validación de la plataforma IoT de bajo costo.

Figura 16

Módulo de gestión de la base de datos en la plataforma IoT meteorológica

```
1 import sqlite3
2 DB_NAME = "weather_station.db"
3 def init_db():
4     conn = sqlite3.connect(DB_NAME)
5     cursor = conn.cursor()
6     cursor.execute("""
7         CREATE TABLE IF NOT EXISTS measurements (
8             id INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,
9             timestamp DATETIME DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
10            temperatura REAL,
11            humedad REAL,
12            presion REAL,
13            velocidad_viento REAL,
14            direccion_viento REAL,
15            precipitacion REAL,
16            radiacion_solar REAL
17        )
18    """)
19    conn.commit()
20    conn.close()
21 def insert_data(temp, hum, pres, vel_vien, dir_viento, rain, solar):
22     conn = sqlite3.connect(DB_NAME)
23     cursor = conn.cursor()
24     cursor.execute("""
25         INSERT INTO measurements (temperatura, humedad, presion, velocidad_viento, direccion_viento, precipitacion, radiacion solar)
26         VALUES (?, ?, ?, ?, ?, ?, ?)
27     """, (temp, hum, pres, vel_vien, dir_viento, rain, solar))
28     conn.commit()
29     conn.close()
30
```

Con el fin de garantizar la persistencia y la trazabilidad de la información generada por la estación meteorológica, las mediciones se almacenan en una base de datos estructurada, permitiendo disponer de un historial consultable de las variables registradas, facilitando los análisis estadísticos, la construcción de modelos predictivos y la comparación de patrones climáticos en distintos periodos, la incorporación de claves primarias y marcas de tiempo en cada registro contribuye a asegurar la integridad de los datos y a identificar con precisión el momento en que fue capturada cada observación, aspecto crucial para estudios de tendencia y variabilidad.

3.1.1.7 Librería sqlite3 para la gestión local de datos meteorológicos

El esquema de almacenamiento se ha diseñado de manera escalable, de modo que la incorporación de nuevas variables meteorológicas no exige modificaciones sustantivas en la lógica principal del sistema, usar SQLite es adecuado para la plataforma IoT de bajo costo, dado su reducido consumo de recursos, su facilidad de implementación en sistemas embebidos y su capacidad para integrarse sin dificultad con aplicaciones de visualización y servicios web.

En la implementación del sistema de almacenamiento de datos se emplea la librería estándar sqlite3 de Python, que permite interactuar de manera directa con bases de datos SQLite sin requerir un servidor externo, mediante este módulo es posible crear y gestionar tablas, definir esquemas de registros y ejecutar consultas SQL para insertar, actualizar o recuperar información, brindando una solución ligera, integrada al propio entorno de la Raspberry Pi y adecuada para registrar de forma estructurada las mediciones meteorológicas generadas por la estación.

3.1.1.8 Parámetros y función de inicialización de la base de datos meteorológica

En el módulo de gestión de datos se define el parámetro `DB_NAME = weather_station.db`, el cual especifica el nombre del archivo donde se almacenará la base de datos local de la estación meteorológica, este archivo se crea en el propio sistema y concentra el registro de todas las mediciones realizadas, la función `init_db()` se encarga de inicializar la base de datos y de crear la tabla principal destinada al almacenamiento de la información, incluyendo un campo `id` como identificador único autoincremental, un campo `timestamp` que registra la fecha y hora de cada medición, y una serie de campos de tipo `REAL` para cada variable meteorológica, como temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, precipitación

y radiación solar, estableciéndose una estructura sólida y extensible para la gestión histórica de los datos generados por la plataforma IoT.

3.1.1.9 Integración de Flask y SQLite para la visualización web de datos meteorológicos

En la capa de presentación de la plataforma se emplea el microframework Flask, que permite implementar una aplicación web ligera para la visualización y consulta de las mediciones meteorológicas, a través de rutas definidas con `@app.route`, se habilitan tanto la interfaz principal, que permite renderizar la plantilla HTML `index.html` y actúa como dashboard, siendo un punto de acceso (`/data`) que expone los datos en formato JSON.

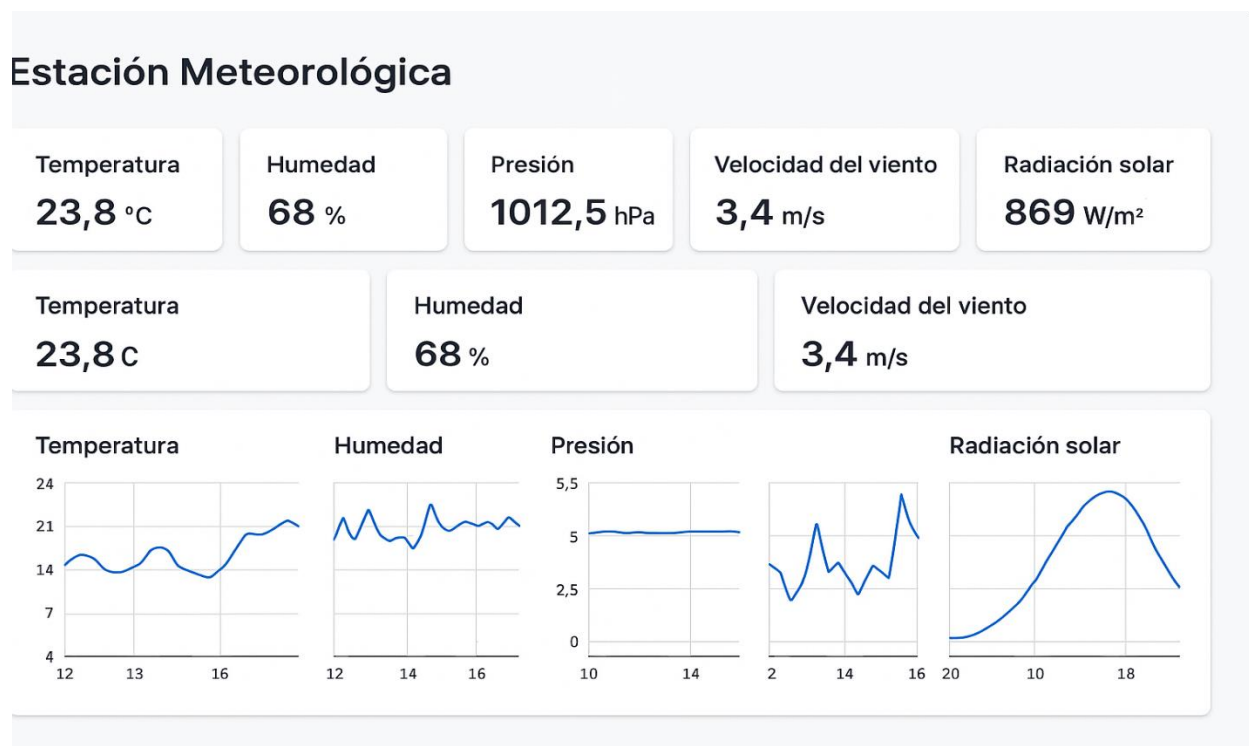
El sistema se conecta al archivo de base de datos `weather_station.db`, desde el cual se recuperan las últimas mediciones (por ejemplo, los 20 registros más recientes), información que se organiza en estructuras tipo diccionario, etiquetando cada serie con su correspondiente variable, la función `jsonify` transforma estos datos desde Python a JSON, facilitando su manejo por el frontend para la generación de gráficos y paneles de seguimiento, la integración de Flask con SQLite nos brinda una solución ligera y vinculado con el enfoque de bajo costo de la plataforma IoT, al tiempo que ofrece una interfaz web clara para la visualización en tiempo real de las condiciones climáticas.

3.1.1.10 Dashboard web de la estación meteorológica implementada sobre la plataforma IoT

La figura N° 17, corresponde al dashboard web de la estación meteorológica, donde se puede visualizar tarjetas de resumen que muestran, en tiempo real, los valores actuales de las principales variables atmosféricas como temperatura (23,8 °C), humedad relativa (68 %), presión atmosférica (1012,5 hPa), velocidad del viento (3,4 m/s) y radiación solar (869 W/m²), en la parte inferior se visualizan gráficos de series temporales para cada una de estas variables, lo que permite seguir su evolución a lo largo del día e identificar tendencias o variaciones significativas, se integra indicadores numéricos y representaciones gráficas en una interfaz clara y compacta, facilitando el monitoreo continuo y la interpretación rápida del comportamiento climático registrado por la estación.

Figura 17

Dashboard web de la plataforma IoT para monitoreo en tiempo real



La figura N° 18, muestra un código en Python encargado de la transmisión de datos meteorológicos mediante el protocolo MQTT, observándose la importación de la librería `paho.mqtt.client`, la definición del broker público (`broker.hivemq.com`) y del tópico `weather/station`, bajo el cual la estación publica sus mensaje, luego, se crea una instancia de cliente MQTT, estableciéndose la conexión al puerto 1883 y se define la función `send_data(payload)`, que envía al broker la carga de datos generada por la estación, constituyendose la capa de telemetría de la plataforma IoT, permitiendo que las mediciones almacenadas localmente puedan ser compartidas con otros servicios o aplicaciones remotas de manera ligera y confiable.

Figura 18

Módulo de telemetría MQTT

```
1 import paho.mqtt.client as mqtt
2 BROKER = "broker.hivemq.com"
3 TOPIC = "weather/station"
4 client = mqtt.Client()
5 client.connect(BROKER, 1883, 60)
6 def send_data(payload):
7     client.publish(TOPIC, payload)
```

3.1.1.11 Uso de la librería Paho MQTT en la plataforma IoT

En la capa de comunicación de la plataforma IoT se emplea la librería Paho MQTT, que habilita el uso del protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), reconocido en el ámbito de Internet de las Cosas por su eficiencia en redes con ancho de banda limitado y su bajo consumo de recursos, mediante esta librería, la estación meteorológica puede establecer una conexión con un broker MQTT, en este caso, `broker.hivemq.com`, y publicar las mediciones en un tópico específico (`weather/station`), cualquier dispositivo o servicio suscrito a dicho tópico recibe

la información en tiempo real, convirtiendo a Paho MQTT en la base para la difusión ligera, confiable y escalable de los datos climáticos generados por la plataforma.

A. Definición del broker y del topic en la comunicación MQTT

En la configuración de la telemetría MQTT, el broker se establece como el servidor encargado de orquestar el intercambio de mensajes entre los distintos clientes de la red, actuando como nodo central de la comunicación, sobre este servidor se define un topic o canal lógico, en el cual la estación meteorológica publica de manera estructurada las mediciones obtenidas, de esta manera, cualquier dispositivo o aplicación suscrita a dicho topic puede recibir los datos en tiempo casi real, facilitando la integración de la plataforma con paneles de visualización, sistemas de análisis o servicios externos de monitoreo climático.

B. Creación del cliente MQTT en la estación meteorológica

La creación del cliente MQTT consiste en crear un objeto que actuará como emisor de las mediciones meteorológicas hacia la red, este cliente se configura para establecer conexión con el broker definido, utilizando el puerto estándar 1883, garantizando la compatibilidad con la mayoría de implementaciones MQTT, a partir de esta conexión, la estación meteorológica puede publicar de forma periódica los datos recogidos por los sensores, habilitando su distribución a otros nodos o aplicaciones suscritas al mismo canal de comunicación.

C. Envío de datos meteorológicos al broker MQTT a través de send_data()

La función `send_data(payload)` se encarga de realizar la publicación de la información en el topic MQTT a través de esta rutina, el dispositivo emisor en este caso la estación meteorológica basada en Raspberry Pi, envía el conjunto de mediciones encapsuladas en payload (temperatura, humedad, presión y demás variables climáticas) hacia el bróker, así los nodos o aplicaciones suscritas al mismo topic pueden recibir las actualizaciones en tiempo real, lo que habilita esquemas de monitoreo distribuido, integración con dashboards remotos y análisis externo de los datos generados por la plataforma IoT.

3.1.1.12 Integración de Flask, SQLite y MQTT para la difusión de datos

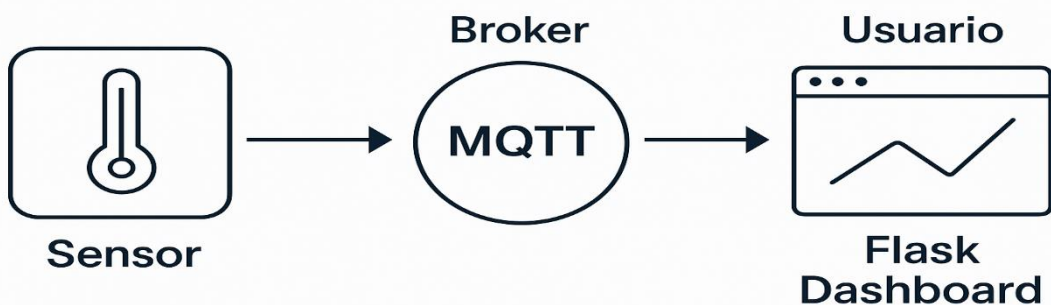
El módulo de comunicación MQTT se integra de manera complementaria con el entorno Flask + SQLite, mientras Flask se encarga de presentar las mediciones almacenadas en la base de datos a través de un dashboard web, MQTT habilita la difusión de esos mismos datos en tiempo real hacia otros sistemas o dispositivos externos, permitiendo que las variables meteorológicas registradas por la estación no solo se visualicen localmente, sino que también puedan ser mostradas por aplicaciones móviles, nodos IoT adicionales o servicios en la nube orientados a análisis avanzado, redundancia de información o integración con otros sistemas de monitoreo ambiental.

La figura N° 19, representa de forma esquemática el flujo de información en la plataforma de monitoreo meteorológico basada en IoT, en primer lugar, el sensor capta la variable ambiental y envía la medición hacia un broker MQTT, que actúa como intermediario en la comunicación, desde este servidor de mensajería, los datos son distribuidos al dashboard desarrollado con Flask,

donde el usuario los visualiza mediante gráficos y paneles en tiempo real, el diagrama representa la interacción entre el subsistema de adquisición, la capa de telemetría y la interfaz web de la estación meteorológica.

Figura 19

Esquema de comunicación de la plataforma IoT hacia la interfaz de usuario



3.1.1.13 Módulo de notificación por correo electrónico en la plataforma IoT

La figura N° 20, muestra el módulo en Python encargado del envío de alertas por correo electrónico dentro de la plataforma de monitoreo meteorológico, se importa la librería `smtplib` y la clase `MIMEText` para construir y transmitir mensajes a través del protocolo SMTP.

Figura 20

Módulo de notificación por correo electrónico en la plataforma IoT

```
1 import smtplib
2 from email.mime.text import MIMEText
3 def send_email_alert(subject, message):
4     sender = "monitoreochiclayo@gmail.com"
5     receiver = "centralmonitoreo@gmail.com"
6     password = "Monitore0_chiclayo*"
7     msg = MIMEText(message)
8     msg['Subject'] = subject
9     msg['From'] = sender
10    msg['To'] = receiver
11    with smtplib.SMTP_SSL('smtp.gmail.com', 465) as server:
12        server.login(sender, password)
13        server.sendmail(sender, receiver, msg.as_string())
```

La función `send_email_alert(subject, message)` define la cuenta emisora, el destinatario y la contraseña asociada, genera el cuerpo del mensaje con el asunto correspondiente y, mediante una conexión segura SMTP_SSL al servidor de Gmail (puerto 465), realiza el proceso de autenticación y envío, este componente permite que la estación genere notificaciones automáticas cuando se detectan condiciones meteorológicas críticas, fortaleciendo el carácter preventivo y operativo del sistema de monitoreo.

A. Uso de `smtplib` y `MIMEText` para la generación de notificaciones automáticas

En el módulo de notificaciones se emplean las librerías `smtplib` y `email.mime.text.MIMEText`, que permiten construir y enviar mensajes de correo electrónico a través de un servidor SMTP, la función `send_email_alert(subject, message)` define la cuenta emisora y el destinatario, configura las credenciales del remitente y genera un mensaje en formato MIME con el asunto, el origen y el destino claramente establecidos, luego, se establece una conexión segura con el servidor SMTP de Gmail (puerto 465), se realiza el proceso de autenticación y se envía el correo, logrando habilitar el disparo automático de alertas, de modo que la estación meteorológica pueda informar oportunamente sobre condiciones críticas o eventos relevantes detectados en las mediciones.

B. Sistema de alertas críticas automatizadas en la estación meteorológica

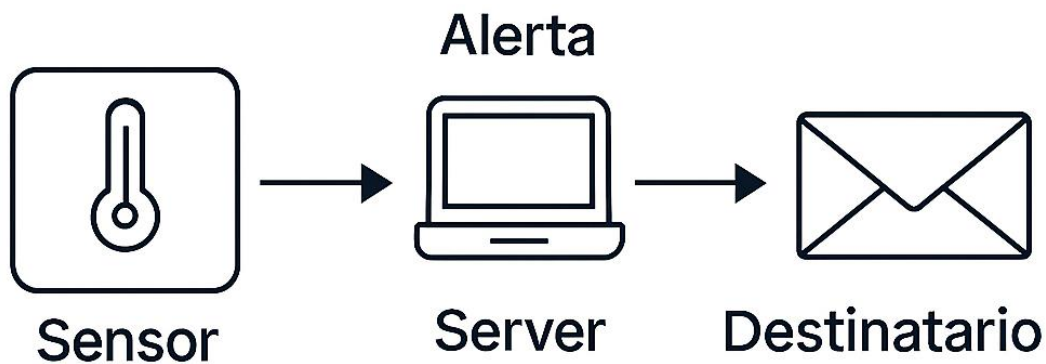
En el diseño de la plataforma se incorpora un sistema de alertas críticas que se activa cuando la estación meteorológica registra condiciones extremas, como incrementos inusuales de temperatura, episodios de lluvia intensa u otros eventos relevantes para la operación, ante estas situaciones, se genera automáticamente un correo electrónico dirigido a la central de

monitoreo, lo que permite una reacción oportuna frente a posibles riesgos, este mecanismo se encuentra completamente automatizado, de modo que el sistema puede notificar en tiempo casi real sin requerir intervención humana, reforzando así la capacidad de vigilancia continua y la toma de decisiones informada a partir de las mediciones climáticas.

La figura N° 21, muestra el proceso de una alerta generada por la estación meteorológica, se inicia cuando el sensor registra una condición crítica, como una temperatura extrema o una lluvia intensa y envía esta información al servidor, allí, el sistema procesa el evento, lo clasifica como alerta y desencadena el envío de una notificación por correo electrónico al destinatario responsable del monitoreo.

Figura 21

Proceso de generación y envío de alertas críticas en la plataforma IoT



3.1.1.14 Script principal de adquisición, almacenamiento y envío de datos

La figura N° 22, muestra el script principal en Python que coordina el funcionamiento de la plataforma IoT de la estación meteorológica, se inicial importando los módulos responsables de la lectura de sensores, la gestión de la base de datos y la transmisión de datos vía MQTT, además de la librería time para controlar los intervalos de muestreo, después de ejecutar `init_db()` para

asegurar la inicialización de la base de datos, el programa entra en un bucle infinito en el que, cada ciclo, se leen las variables meteorológicas (temperatura, humedad, presión, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar), mostrándose en la consola con un formato legible, se registran en la base de datos mediante `insert_data()` y se empaquetan en una cadena payload, este paquete de datos se envía a través de la función `send_data()` y el sistema espera 10 segundos antes de repetir el proceso, este proceso sintetiza la lógica de adquisición continua, almacenamiento y telemetría que se basa la operación de la estación.

Figura 22

Script principal de adquisición, almacenamiento y envío de datos meteorológicos

```
1 import time
2 from sensores import read_temperatura_humedad, read_presion, read_velocidad_viento, read_direccion_viento, read_precipitacion, read_radiacion_solar
3 from database import init_db, insert_data
4 from network import send_data
5 init_db()
6 while True:
7     temp, hum = read_temperatura_humedad()
8     pres = read_presion()
9     wind_spd = read_velocidad_viento()
10    wind_dir = read_direccion_viento()
11    rain = read_precipitacion()
12    solar = read_radiacion_solar()
13    print(f"T: {temp:.2f}°C | H: {hum:.2f}% | P: {pres:.2f} hPa | Viento: {wind_spd} m/s | Dir: {wind_dir}° | Lluvia: {rain} mm | Solar: {solar} W/m²")
14    insert_data(temp, hum, pres, wind_spd, wind_dir, rain, solar)
15    payload = f"{temp},{hum},{pres},{wind_spd},{wind_dir},{rain},{solar}"
16    send_data(payload)
17    time.sleep(10)
18
```

A. Integración de adquisición, almacenamiento y transmisión

En el programa principal se importan diversos módulos que articulan el funcionamiento integral de la plataforma, el módulo `time` se utiliza para regular los intervalos de ejecución del bucle de adquisición, definiendo la frecuencia con la que se registran las mediciones, el módulo `sensores` agrupa las funciones encargadas de leer las variables meteorológicas de interés, como temperatura, humedad relativa, presión

atmosférica, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar, el módulo database gestiona la inicialización de la base de datos y el almacenamiento estructurado de cada registro, garantizando la persistencia y trazabilidad de la información, el módulo network habilita el envío de los datos hacia otros sistemas, previsiblemente mediante el protocolo MQTT, permitiendo integrar la estación con servicios externos de monitoreo y visualización en tiempo real.

B. Rutina de inicialización de la base de datos

La fase de inicialización del sistema incluye la ejecución de la función `init_db()`, encargada de preparar la base de datos que almacenará las mediciones meteorológicas esta rutina verifica la existencia del archivo y de la tabla de registros; en caso contrario, los crea con la estructura definida para cada variable (temperatura, humedad, presión, viento, precipitación y radiación solar), garantizando que, antes de iniciar el ciclo de adquisición, el entorno de almacenamiento se encuentre correctamente configurado y listo para recibir datos de manera ordenada y trazable.

C. Secuencia de adquisición, almacenamiento y transmisión en el programa principal

El funcionamiento continuo de la estación meteorológica se organiza en un bucle principal `while True`, que articula todas las tareas del sistema, en cada iteración se realiza la lectura secuencial de los sensores, obteniendo los valores actualizados de las variables meteorológicas registradas, estos datos se muestran en consola con un formato legible, lo que facilita la verificación inmediata del estado de la estación durante las pruebas, después,

las mediciones se almacenan en la base de datos, generando un historial que servirá para análisis posteriores y contrastes estadísticos.

A la vez, los valores se empaquetan en una cadena payload preparada para su transmisión en red y se envían mediante la función `send_data(payload)`, que remite la información al sistema remoto de monitoreo típicamente un broker MQTT, después, el programa entra en una pausa de 10 segundos antes de repetir el ciclo, intervalo que define la frecuencia de muestreo y establece un comportamiento adecuado y uso eficiente de recursos en la plataforma IoT.

D. Bloque de integración y flujo de datos en la plataforma IoT

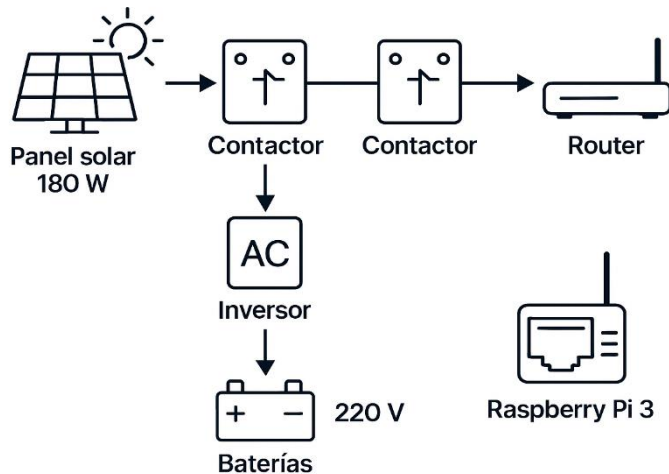
Este bloque de código constituye el núcleo del sistema, donde se integran la captura de datos desde los sensores, su registro en la base de datos local, la transmisión a través de la capa de comunicación y su visualización en el dashboard web, asegurando que las mediciones meteorológicas sean capturadas, almacenadas y difundidas con una latencia mínima, permitiendo un seguimiento en tiempo real de las condiciones ambientales, además, la estructura del bloque ha sido diseñada con criterios de escalabilidad, siendo posible incorporar nuevos sensores o modificar el mecanismo de envío de información sin alterar la lógica central del programa, otorgando flexibilidad para futuras ampliaciones y adaptaciones de la estación meteorológica a otros escenarios de monitoreo.

3.1.1.15 Esquema de alimentación híbrida de la estación meteorológica

La figura N° 23, representa el esquema de energización de la plataforma IoT de la estación meteorológica, un panel solar de 180 W constituye la fuente principal de energía y alimenta, a través de un sistema de contactores, al router encargado de la conectividad, a la par, la energía proveniente del panel se dirige a un banco de baterías que almacena carga para asegurar la continuidad del servicio, que mediante un inversor, la energía acumulada se convierte a 220 V en corriente alterna, permitiendo abastecer de manera estable tanto al router como a la Raspberry Pi 3B, además el diagrama sintetiza así una solución de alimentación híbrida, orientada a garantizar autonomía y operación ininterrumpida del sistema de monitoreo meteorológico.

Figura 23

Diagrama de energización



Para mantener la energía se establece lo siguiente:

➤ **Raspberry Pi 3B**

- Consumo típico: $5V / 2.5A \rightarrow \approx 12.5 W$.
- Si funciona 24 horas:

$$12.5 W \times 24 h = 300 Wh/día$$

➤ **Router (Fibra, Microondas o Starlink)**

- **Router doméstico:** ~10 W.
- **Enlace microondas:** puede variar entre 15 W y 30 W.
- **Starlink:** ~50 W (promedio).

Tomemos el caso más exigente (Starlink):

$$50 \text{ W} \times 24 \text{ h} = 1200 \text{ Wh/día}$$

➤ **Consumo total diario**

- Raspberry Pi: **300 Wh/día**
- Router Starlink: **1200 Wh/día**

Total: 1500 Wh/día (1.5 kWh/día)

➤ **Dimensionamiento del sistema**

➤ **Panel solar de 180 W:**

Si recibe 5 horas solares efectivas:

$$180 \text{ W} \times 5 \text{ h} = 900 \text{ Wh/día}$$

➤ **Baterías comerciales:**

Para 1.5 kWh/día y autonomía de 1 día:

$$1500 \text{ Wh}/12 \text{ V} \approx 125\text{Ah}$$

➤ **Inversor:**

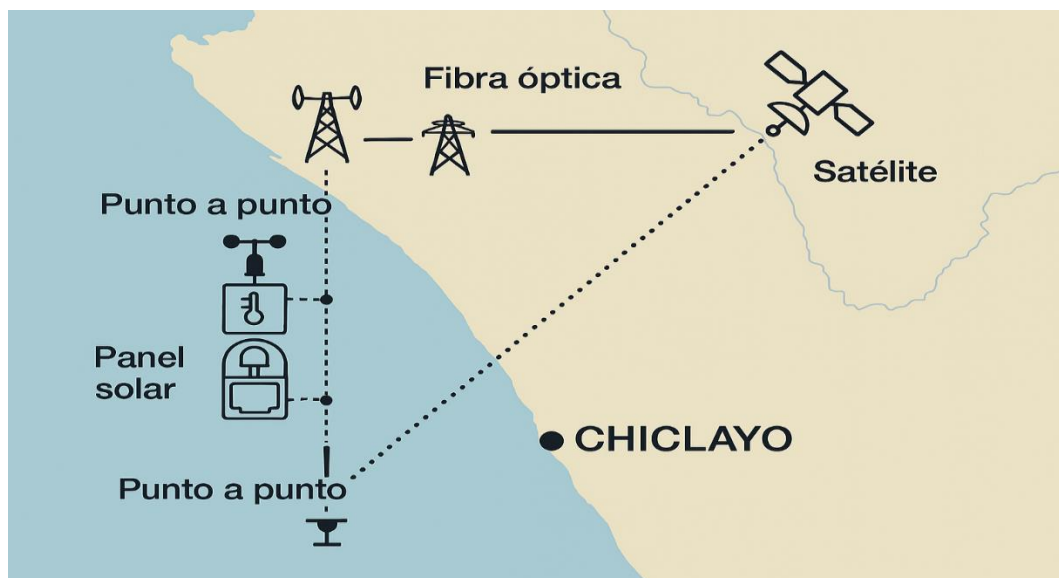
Debe entregar **220V AC** y soportar al menos **150 W continuos** (300 W para margen).

3.1.2 Plataforma de telemetría IoT para el monitoreo meteorológico

La figura N° 24, presenta un esquema de infraestructura de comunicaciones diseñado para la telemetría IoT de una estación meteorológica, la estación transmite sus datos a través de un enlace inalámbrico punto a punto, la información es transportada por una red de mayor capacidad que puede basarse en dos alternativas tecnológicas: un backhaul terrestre mediante fibra óptica o un segmento satelital que garantiza cobertura aun en escenarios de baja disponibilidad de redes convencionales, integrando, energía solar, radioenlaces dedicados y medios troncales de alta capacidad, configurando una arquitectura de comunicaciones robusta, escalable y adecuada para el monitoreo meteorológico continuo en una plataforma IoT de bajo costo.

Figura 24

Diseño de la infraestructura de telecomunicaciones de la plataforma IoT meteorológica



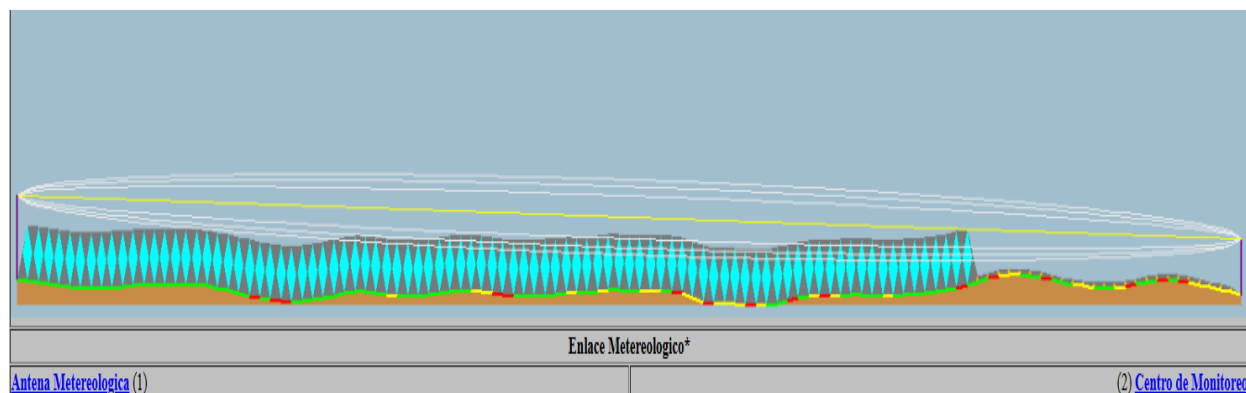
3.1.2.1 Enlace Punto a Punto mediante Radioenlace

La figura N° 25, muestra el perfil radioeléctrico del enlace meteorológico entre la estación y el centro de monitoreo, sobre el relieve del terreno figuran las zonas de Fresnel y el

lóbulo principal del haz de radio, la áreas de color celeste indican las celdas de propagación analizadas a lo largo del trayecto, a pesar de las variaciones de altura del terreno y a la presencia de pequeñas irregularidades, el enlace conserva un despeje adecuado dentro de la primera zona de Fresnel, con tramos de mayor proximidad al suelo que son considerados en el cálculo del margen de enlace, esta evaluación nos permitió comprobar que la infraestructura inalámbrica que proponemos ofrece condiciones favorables de propagación, asegurando la transmisión continua de los datos meteorológicos.

Figura 25

Enlace meteorológico entre la estación y el centro de monitoreo



La figura N° 26, muestra una torre de comunicaciones destinada a la transmisión y recepción de señales de radio, brinda la elevación necesaria para superar obstáculos locales y optimizar la línea de vista hacia los enlaces punto a punto y otros nodos de la red, en la figura N° 27, se observa una antena receptora de la estación meteorológica, asegurando la alineación mecánica y la estabilidad frente a condiciones ambientales adversas, manteniendo la calidad del enlace de telemetría y garantizar la recepción continua de los datos transmitidos desde la antena emisora.

Figura 26

Torre de comunicaciones para el sistema de telemetría meteorológica



Figura 27

Antena receptora del enlace de telemetría meteorológica



La figura N° 28, muestra el enlace inalámbrico punto a punto, que conecta directamente la antena de la estación meteorológica con el centro de monitoreo, la línea azul representa el trayecto del haz de radio entre ambos nodos, se observa un enlace dedicado asegurando que las mediciones

captadas en la estación se transporten de forma directa, con baja latencia y sin depender de infraestructuras intermedias.

Figura 28

Enlace punto a punto entre la estación meteorológica y el centro de monitoreo



La ciudad de Chiclayo presenta una morfología de terreno relativamente uniforme, el enlace de comunicaciones permite asegurar una conexión estable y confiable para la transmisión de datos, es importante ponderar la relación costo - beneficio, proponiendo un esquema de comunicaciones simple y eficiente, dimensionado específicamente para sostener la operación continua de la estación y no para brindar servicio a una cobertura mayor, como sería el caso de una comunidad, garantizando que la plataforma pueda enviar información meteorológica de manera permanente sin introducir sobrecostos ni elementos de ingeniería innecesarios para los objetivos de la investigación.

La tabla N° 02, presenta los parámetros del enlace de comunicaciones, sus coordenadas geográficas (latitud -6.774973° y longitud -79.814412°), la elevación del terreno (34,1 m) y la altura de instalación de la antena sobre el nivel del suelo (15,0 m), además, el azimut de

apuntamiento del enlace, con $148,84^\circ$ respecto al norte verdadero y $150,53^\circ$ respecto al norte magnético, junto con una ligera inclinación negativa de $-0,39^\circ$, que limita la pendiente del haz, estos parámetros son fundamental para calcular el perfil radioeléctrico y la alineación del enlace punto a punto de la estación meteorológica.

Tabla 2

Coordenadas, altura y azimut de la antena de la estación meteorológica

Antena Meteorologica (1)	
Latitud	-6.774973°
Longitud	-79.814412°
Elevación del terreno	34.1 m
Altura de la antena	15.0 m
Azimuth	148.84 TN 150.53 MG $^\circ$
Inclinación	-0.39°

La tabla N° 03, muestra los parámetros geoespaciales y de orientación de la antena instalada en el centro de monitoreo del enlace de comunicaciones, registrando una la latitud de -6.738891° , y una longitud de -79.808982° , la elevación del terreno es de 31,3 m y la altura de la antena fue de 10,0 m, además se tiene un azimut de apuntamiento del enlace de $328,84^\circ$ respecto al norte verdadero y $330,53^\circ$ respecto al norte magnético, junto con una ligera inclinación positiva de $0,38^\circ$, con estos valores se aseguró la telemetría entre la estación meteorológica y el centro de monitoreo.

Tabla 3

Parámetros espaciales de la antena en el centro de monitoreo

(2) Centro de Monitoreo	
Latitud	-6.783891°
Longitud	-79.808982°
Elevación del terreno	31.3 m
Altura de la antena	10.0 m
Azimuth	328.84 TN 330.53 MG $^\circ$
Inclinación	0.38°

La tabla N° 03, muestra la configuración básica del sistema de radio, estableciendo una potencia de transmisión de 30,00 dBm, con pérdidas en el cable de TX y RX de solo 0,50 dB cada una, además, la antena transmisora como la receptora presentan una ganancia de 34,00 dBi, apropiada para enlaces de larga distancia, también, se consideró una sensibilidad de recepción de -64,99 dBm.

Tabla 4

Parámetros del sistema de comunicación de la estación meteorológica

Sistema de radio	
Potencia TX	30.00 dBm
Pérdida en cable TX	0.50 dB
Ganancia de antena TX	34.00 dBi
Ganancia de antena RX	34.00 dBi
Pérdida en cable RX	0.50 dB
Sensibilidad RX	-64.99 dBm

La tabla N° 05, presenta las pérdidas de propagación en el enlace inalámbrico, observándose que, la atenuación dominante corresponde a la pérdida en espacio libre, con 108,99 dB, sumándose una pérdida estadística de 51,24 dB, asociada al margen frente a desvanecimientos y variaciones del canal, no se ha registrado pérdidas adicionales por bosque, por lo que solo se considera 1,00 dB por efectos de urbanización, el valor de pérdida por obstrucción se muestra levemente negativo con -2,23 dB, en total, se obtiene una pérdida total de 159,00 dB, valor que se utilizará en el balance de enlace para confirmar que la potencia recibida sea suficiente para garantizar la continuidad del servicio de monitoreo.

Tabla 5

Atenuaciones del canal radioeléctrico para el enlace meteorológico

	Propagation
Pérdida en espacio libre	108.99 dB
Pérdida por obstrucción	-2.23 dB
Pérdida por bosque	0.00 dB
Pérdida por urbanización	1.00 dB
Pérdida estadística	51.24 dB
Pérdida total	159.00 dB

La tabla N° 06, presenta los parámetros de desempeño del enlace de la estación meteorológica, se observa que tiene una longitud de 1,159 km, con una precisión de localización de 10 m, operando en la banda de 5825 MHz, con una potencia de radiación isotrópica equivalente de 2238,721 W, una ganancia de 161,99 dB, una fiabilidad de 99,990 %, estimando una señal recibida de -62,00 dBm (177,89 μ V), y un margen de escucha de 3,00 dB, cumpliendo las condiciones mínimas de nivel de señal y disponibilidad necesarias para asegurar la transmisión continua de los datos meteorológicos.

Tabla 6

Parámetros de desempeño del enlace de la estación meteorológica

Performance	
Distance	1.159 km
Precisión	10.0 m
Frecuencia	5825.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente	2238.721 W
Ganancia del sistema	161.99 dB
Fiabilidad requerida	99.990 %
Señ recibida	-62.00 dBm
Señ recibida	177.89 μ V
Márgen de escucha	3.00 dB

La tabla N°07, presenta parámetros del enlace inalámbrico de la estación meteorológica, muestra una distancia de 1,159 km, una frecuencia de operación de 5825 MHz, una Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP) de aproximadamente 63,5 dBm y una ganancia total del sistema de 161,99 dB, muestra una fiabilidad del 99,990 %, se obtuvo un nivel de señal recibida de -62 dBm, precisamente en el umbral de sensibilidad del receptor, se ha obtenido un margen de escucha (fade margin) de +3 dB, suficiente para asegurar la transmisión de los datos meteorológicos.

Tabla 7*Parámetros de operación del enlace de la estación meteorológica*

Parámetro	Valor
Distancia del enlace:	1.159 km
Frecuencia de operación:	5825 MHz
Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP):	≈ 63.5 dBm
Ganancia del sistema:	161.99 dB
Fiabilidad requerida:	99.990 %
Nivel de señal recibida:	-62 dBm
Sensibilidad del receptor:	-62 dBm
Margen de escucha (fade margin):	+3 dB

En un enlace inalámbrico, la capacidad efectiva de transmisión está restringida por el esquema de modulación que el sistema es capaz de mantener sin tomar en cuenta errores significativos en la información transmitida, modulaciones como QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, demandan diferentes niveles mínimos de relación señal - ruido para operar de manera confiable, al aumentar la complejidad de la modulación igualmente sube la tasa de bits posible, y además se incrementa, los requerimiento sobre la potencia y calidad de la señal recibida, la tabla N° 08, muestra a diferentes esquemas de modulación digital con el nivel mínimo de señal recibida y requerida para su funcionamiento óptimo, QPSK opera con señales del orden de -75 dBm, 16-QAM demanda aproximadamente de -70 dBm y 64-QAM alrededor de -65 dBm, los requerimientos se incrementan para modulaciones de mayor orden, como 256-QAM y 1024-QAM, demandando -60 dBm y -52 dBm, respectivamente.

Tabla 8*Relación entre modulación y sensibilidad mínima*

Modulación	Señal mínima típica
QPSK	-75 dBm
16-QAM	-70 dBm
64-QAM	-65 dBm
256-QAM	-60 dBm
1024-QAM	-52 dBm

Debido a que el enlace muestra un nivel de señal recibida de -62 dBm, éste se ubica entre los umbrales para operar con 64-QAM (\approx -65 dBm) y 256-QAM (\approx -60 dBm), pero al disponer solo de un margen de escucha alrededor de 3 dB, la operación se mantiene con 256-QAM resultando poco confiable frente a desvanecimientos y variaciones del canal, pero, el enlace puede mantenerse con mayor seguridad en una modulación 64-QAM de alto rendimiento, incluso alcanzar 256-QAM en condiciones favorables.

Ecuación general:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{Tx} + G_{Rx} - L_{Rx} - FSPL$$

Donde:

P_{Rx} = Potencia recibida (dBm)

P_{Tx} = Potencia de transmisión (dBm)

G_{Tx} / G_{Rx} = Ganancias de antena (dBi)

L_{Tx} / L_{Rx} = Pérdidas de línea (dB)

FSPL = Pérdida de espacio libre (Free Space Path Loss)

Pérdida de espacio libre (FSPL)

Para frecuencia en MHz y distancia en km:

$$FSPL(dB) = 32.44 + 20 \log_{10}(d \text{ km}) + 20 \log_{10}(f \text{ MHz})$$

Para tu enlace:

$d = 1.159 \text{ km}$

$f = 5825 \text{ MHz}$

$FSPL = 32.44 + 20 \log(1.159) + 20 \log(5825)$

$FSPL = 32.44 + 1.28 + 155.30 = 188.98 \text{ dB}$

Margen de desvanecimiento (Fade Margin)

Indica +3 dB, lo cual corresponde a correcciones internas como ganancia del sistema total: FM=3 dB

Cálculo de la capacidad (Mbps)

La fórmula fundamental es:

(1) Capacidad OFDM:

$$C = N_{sub} \cdot R_{sym} \cdot b \cdot CR$$

Donde:

Nsub = Número de subportadoras útiles

Rsym = Tasa de símbolos

b = Bits por símbolo según modulación

CR = Coding Rate

Ejemplo realista para radios de 80 MHz

Parámetros típicos:

Subportadoras útiles ≈ 234 (802.11ac Wave 2)

Ancho de banda: 80 MHz

Espaciado entre subportadoras: 312.5 kHz

Tasa de símbolos:

$$R_{sym} = 1/T_{sym} = 1/(3.6\mu s) \approx 277\text{ksps}$$

Cálculo para 256-QAM

Bits por símbolo = 8

Coding Rate típico = 3/4

$C = 234 \cdot 277000 \cdot 8 \cdot 0.75$

$C = 234 \cdot 277000 \cdot 6$

$C \approx 388\text{Mbps}$

$C_{\text{real}} = 300 \text{ a } 450\text{Mbps}$

3.1.2.2 Enlace Punto a Punto mediante Fibra Óptica

Para el diseño de la infraestructura de comunicaciones para el monitoreo remoto de la estación meteorológica se considera, además del radioenlace inalámbrico, un enlace punto a punto mediante fibra óptica como alternativa de alta capacidad y elevada confiabilidad, ya que brinda transportar el tráfico con muy bajas pérdidas, inmunidad al ruido electromagnético y amplia capacidad para futuras ampliaciones del sistema, el enlace será dedicado entre la estación de concentración de datos y el nodo de red más cercana.

La figura N° 29, muestra, recorrido propuesto para el enlace, este se ubica en el sector Chosica del Norte, cerca de las urbanizaciones Las Brisas y La Unión, adyacente a la carretera a Pomalca, el punto de inicio del recorrido, considerado como NAP, se localiza en las inmediaciones de la Gallera El Gallo López y de la metalmecánica Aceros Llontop, a escasa distancia de la vía principal donde se encuentra el grifo Petrocaña, esta propuesta permite establecer un enlace punto a punto eficiente, con un trazo directo y con mínimas interferencias físicas para el tendido de la fibra óptica.

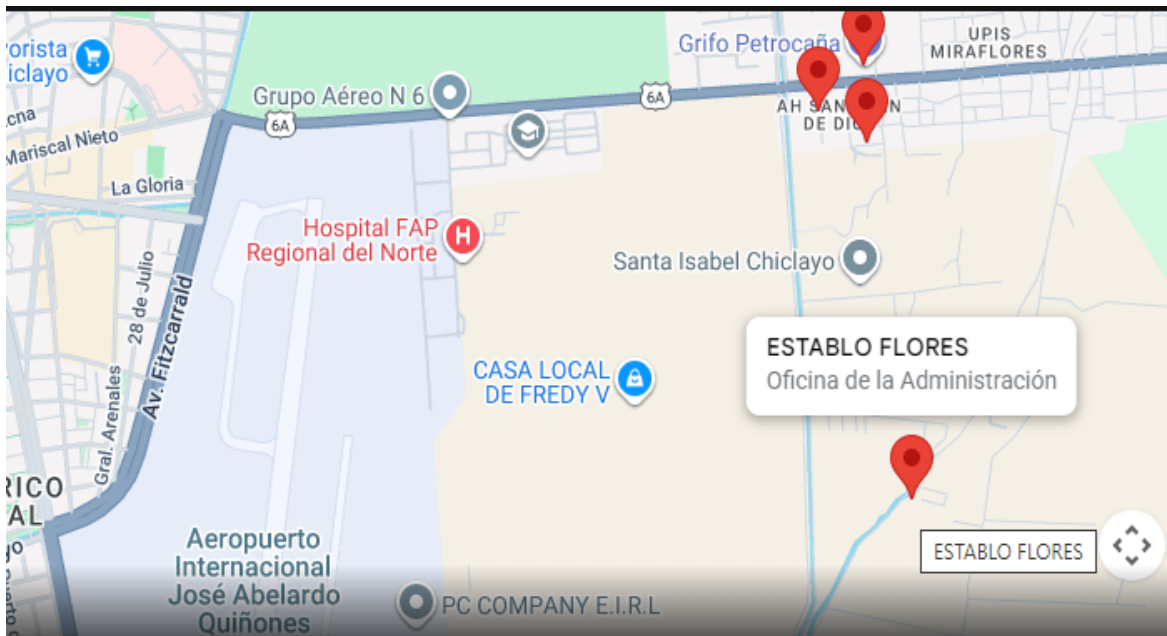
Figura 29

Trazado del enlace de fibra óptica entre el NAP y el centro de monitoreo



Figura 30

Enlace propuesto (Google Masp)



La tabla N° 09, muestra los componentes principales del enlace punto a punto mediante fibra óptica, se especifica el uso de fibra monomodo OS2, con una la longitud de onda de 1310 nm, como medio físico se plantea un cable aéreo autoportante (ADSS) de 2 a 4 hilos, suficiente para atender la demanda actual del sistema y reservar pares para ampliaciones posteriores.

Tabla 9

Componentes del enlace de fibra óptica

Componente	Descripción
Tipo de Fibra	Monomodo (SM) OS2 (Estándar para largas distancias, ideal para capacidad futura).
Longitud de Onda	1310 nm (Ventana de baja atenuación, común para enlaces cortos).
Cable	Aéreo autoportante (ADSS) de 2 a 4 hilos (el mínimo indispensable).
Equipamiento de Conexión	Conversores de Medios (Media Converters) o Transceptores SFP gigabit.

La tabla N° 10, detalla el cálculo de la pérdida óptica en el enlace de fibra propuesto a conectar el centro de monitoreo con la red troncal, considerando la pérdida de la fibra en 0,35 dB/km para una longitud de 1,574 km a 1310 nm, equivalente a 0,55 dB, las pérdidas introducidas por dos pares de conectores de 1,00 dB en total y las asociadas a dos empalmes de fusión en 0,10 dB, también se incorporó un margen de reserva del 10 % (0,12 dB) para contemplar posibles curvaturas, envejecimiento del cable o eventuales daños menores. Arrojando una pérdida óptica total de 1,77 dB.

La tabla N° 11, muestra el balance de potencia del enlace de fibra, a partir de una potencia de transmisión del láser de -5 dBm y de una sensibilidad mínima del receptor de -20 dBm, descontamos la pérdida óptica total del enlace, estimada en 1,77 dB, obtenemos una potencia de

recepción aproximada de -6,77 dBm en el extremo receptor el enlace óptico dispone de un margen suficiente para garantizar la continuidad del servicio.

Tabla 10

Pérdida total de potencia en el enlace óptico

Fuente de Pérdida	Cálculo	Valor de Pérdida (dB)
Atenuación de la Fibra	0.35 dB/km x 1.574 km (a 1310 nm)	0.55 dB
Pérdida por Conectores	2 pares x 0.5 dB	1.00 dB
Pérdida por Empalmes	2 empalmes x 0.05 dB/empalme	0.10 dB
Pérdida de Reserva	10% de reserva para curvas o daño	0.12 dB
TOTAL (POT)	Suma de todos los valores	1.77 dB

Tabla 11

Potencia transmitida y recibida en el enlace óptico

Parámetro	Valor
Potencia de Transmisión del Láser (P_{TX})	-5 dBm
Sensibilidad del Receptor (P_{RX})	-20 dBm
Pérdida Óptica Total (POT)	1.77 dB
Potencia de Recepción Estimada (P_{RX})	$P_{TX} - POT = -5 \text{ dBm} - 1.77 \text{ dB}$
Margen de Seguridad (MS)	$P_{RX} - P_{RX_min} = -6.77 \text{ dBm} - (-20 \text{ dBm})$

El margen de seguridad obtenido es de 13,65 dB, evidenciando una holgura en el balance de potencia, proyectando un enlace óptico adecuado, confiable y con elevada tolerancia frente a fallas o degradaciones futuras del medio.

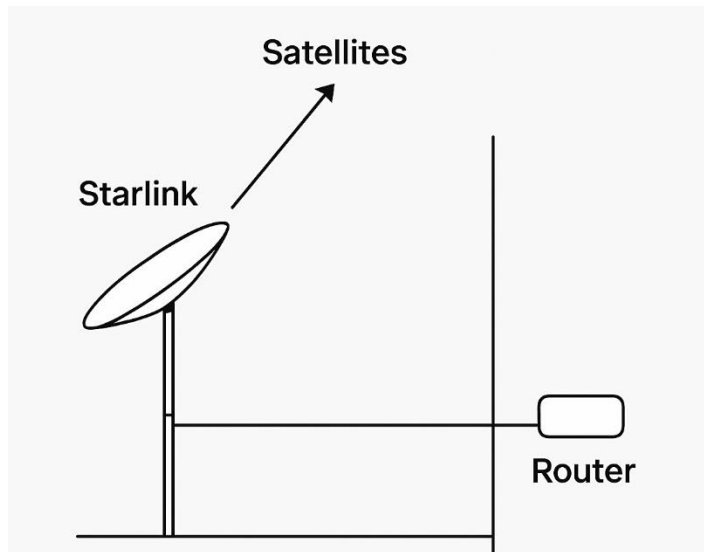
3.1.2.3 Enlace Satelital

Para la propuesta de diseño de la infraestructura de comunicaciones para el monitoreo remoto de la estación meteorológica se presenta como alternativa de backhaul, un enlace satelital encaminado a asegurar la continuidad del servicio aun en escenarios de falla o indisponibilidad de los medios terrestres.

La figura N° 1, muestra una conexión satelital mediante un terminal Starlink como alternativa de backhaul, la antena parabólica orientada hacia la constelación de satélites de órbita baja establece el enlace de subida y bajada, además que, a través de un router local, reparte la conectividad IP hacia la plataforma de monitoreo.

Figura 31

Integración de Starlink como enlace satelital



La figura N° 32, muestra la interfaz de configuración para la simulación y ajuste de un enlace satelital, en el Demodulator se definen la frecuencia de trabajo en 10,700 MHz, el ancho de banda en 150 MHz, el tipo de modulación es QPSK y la razón de corrección de errores FEC (3/4).

En la Tx Antenna configuramos la antena transmisora, detallando la ganancia, la potencia del amplificador de alta potencia (HPA) y la frecuencia del BUC, y en el panel Satellite Antenna se fija la ganancia de la antena a bordo, la frecuencia de traslación y la polarización (horizontal).

Figura 32

Panel de simulación del demodulador y antenas en el sistema satelital

The image shows a simulation control panel divided into three main sections:

- Demodulator (Green background):**
 - Frequency: 10700 MHz
 - Bandwidth: 150 MHz
 - Mod Type: QPSK (with an 'Enable' checkbox)
 - FEC: 3/4
 - Buttons: Update
- Tx Antenna (Light Blue background):**
 - HPA Enable:
 - Antenna Gain (dB): 35 and 42
 - HPA (dB): 42 and 52
 - BUC Freq (MHz): 14000 and 10700
 - Buttons: Update, Peak
- Satellite Antenna (Grey background):**
 - Share Satellite: | Join Satellite:
 - Antenna Gain (dB): 44
 - HPA (dB): [] | LNA: []
 - TTF (MHz): 2300 and 14000
 - Polarity: Horizontal (with Rx 10 deg and 100 deg options)
 - Buttons: Update, Tx 10, Tx 100 deg

At the bottom left, there is a black display area with a vertical line and two buttons: PLAY and PAUSE.

i. Demodulador:

- Frecuencia: 10,700 MHz, correspondiente al rango de recepción en banda Ku.
- Ancho de banda: 150 MHz, suficiente para soportar una tasa de datos de 150 Mbps.
- Modulación: QPSK permite transmitir dos bits por símbolo, optimiza el uso espectro.
- FEC (Forward Error Correction): 3/4, lo que implica que el 75% de la información transmitida es útil y el 25% se destina a corrección de errores, garantizando robustez frente a interferencias.

ii. Antena de Transmisión (Tx):

- Ganancia: 35 dB, adecuada para terminales de usuario con antenas compactas.
- HPA (High Power Amplifier): 42 dB, para asegurar la potencia necesaria en el enlace ascendente.
- Frecuencia BUC: 14,000 MHz, típica para el uplink en banda Ku.

iii. Antena de Recepción (Rx):

- Ganancia: 42 dB, optimizada para captar señales de baja potencia desde el satélite.
- Frecuencia BDC: 10,700 MHz, correspondiente al downlink.

iv. Antena Satelital:

- Ganancia: 44 dB, representativa de antenas en satélites LEO.
- Polaridad: Horizontal, común en enlaces de datos.

v. Justificación Técnica

La elección de QPSK y un FEC de 3/4 permite un equilibrio entre eficiencia espectral y robustez, con un ancho de banda de 150 MHz y modulación QPSK, la capacidad teórica del enlace se aproxima a:

$$\text{Capacidad} \approx \text{BW} \times \text{bits/simbolo} \times \text{FEC} = 150 \text{ MHz} \times 2 \times 0.75 \approx 225 \text{ Mbps}$$

La tabla N° 12, sintetiza la comparación de tres alternativas de enlace, para la plataforma de monitoreo meteorológico, radioenlace inalámbrico en 5,8 GHz, fibra óptica y Starlink, para

cada escenario se presentan la velocidad esperada, la latencia típica, el costo mensual estimado, el nivel de disponibilidad y sus principales ventajas y desventajas.

Tabla 12

Comparativa de escenarios de conectividad

Escenario	Velocidad esperada	Latencia	Costo mensual	Disponibilidad	Ventajas	Desventajas
Enlace inalámbrico 5.8 GHz	150 – 600 Mbps	2 – 5 ms	S/ 150 – 250	Alta	Instalación rápida, buen rendimiento, económico	Dependencia de línea de vista, interferencias
Fibra óptica	1 – 10 Gbps	<1 ms	S/ 150 – 300	Muy alta	Máxima estabilidad, escalabilidad, baja latencia	Mayor inversión inicial, requiere obra civil
Starlink	50 – 250 Mbps	25 – 50 ms	S/ 220 – 250	Alta	Ideal para zonas sin infraestructura, fácil instalación	Latencia mayor, costo mensual fijo

3.2 Discusión

La integración de la Raspberry Pi 3B con sensores especializados, la base de datos SQLite y el dashboard web en Flask demuestra que es posible registrar y visualizar en tiempo real las variables críticas del clima, a través de una plataforma IoT de bajo costo.

El análisis del estado del arte reveló que muchas propuestas se limitan a pocas variables o a una única forma de conectividad. esta investigación amplía el alcance al incorporar un conjunto completo de variables meteorológicas y, sobre todo, compara tres alternativas de backhaul (radioenlace 5,8 GHz, fibra óptica y enlace satelital) y aporta una mirada más integral al incluir desde el diseño la dimensión energética y la resiliencia de la comunicación.

Los resultados muestran que la plataforma no sólo captura datos, sino que los convierte en datos útil a través del dashboard, las alertas por correo y la posibilidad de escalar la conectividad, abriendo puertas a redes de estaciones meteorológicas de bajo costo para soporte a la gestión de riesgos y la planificación agrícola.

Entre las limitaciones se encuentra el carácter descriptivo y no experimental del estudio, aun así, la investigación se fortalece por su enfoque sistémico, el uso de tecnologías abiertas, la comparación de escenarios de conectividad.

4 CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El análisis del estado del arte demostró que las plataformas IoT de bajo costo y basadas en plataformas inteligentes como Raspberry Pi, adicionando el uso de lenguajes de programación de alto nivel como Python, trabajando con protocolos ligeros de comunicación (HTTP/MQTT) y bases de datos embebidas crean la solución más adecuada para sistemas de monitoreo meteorológico remoto.

Se diseñó la arquitectura de hardware, integrando sensores de temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar, una Raspberry Pi 3B como etapa controladora de procesamiento, el convertidor ADC y el subsistema de alimentación solar, como baterías, demostró ser adecuado, funcional y coherente con los requerimientos de bajo costo y operación continua, se expuso, que el sistema es capaz de adquirir, digitalizar, almacenar en SQLite y visualizar mediante un dashboard web las variables meteorológicas en tiempo real, además de generar alertas automáticas.

La plataforma que proponemos es modular y que además puede integrarse a distintos escenarios de red, los análisis de rendimiento demostraron que el radioenlace punto a punto en 5,8 GHz proporciona un margen de conectividad adecuado para distancias importantes; que la fibra óptica ofrece la mayor capacidad y estabilidad para consolidar un centro de monitoreo con tráfico intenso; y que el enlace satelital resulta una alternativa viable en ausencia de infraestructura

terrestre, en todos los casos, la plataforma IoT mantiene su integridad funcional al incorporar nodos adicionales, lo que corrobora su potencial de escalabilidad para desplegar redes de estaciones meteorológicas distribuidas.

4.2 Recomendaciones

Se sugiere implementar un prototipo en campo que trabaje de modo continuo durante un tiempo prolongado, con propósito de validar empíricamente el desempeño de los sensores, la estabilidad del software y la operación adecuada de los enlaces de comunicación ante variaciones climáticas reales.

Se recomienda ahondar en el dimensionamiento del sistema de alimentación fotovoltaica y del banco de baterías, concentrando mediciones reales de radiación solar, registros diarios de consumo y degradación de los acumuladores a lo largo del tiempo, con el propósito de optimizar el diseño energético, especialmente en ante enlaces de mayor consumo, como terminales satelitales, sin comprometer la autonomía de la estación.

Se recomienda plantear el desarrollo de una red de estaciones meteorológicas distribuidas, basadas en la arquitectura IoT, enlazadas a través de tecnologías de bajo consumo como, LoRaWAN o enlaces punto a multipunto, hacia un concentrador con salida vía fibra, radio o satélite.

Desde la perspectiva del desarrollo de software, se recomienda incorporar procesos avanzados de gestión de errores, registro (logging) y actualización remota de los módulos en Python, de forma que el mantenimiento del sistema se realice con mínima intervención en el sitio.

5 REFERENCIAS

- Abusabah, A. T., Rahman, M. A., Oliveira, R., & Flizikowski, A. (2022). The Importance of Repetitions in Ultra-Dense NB-IoT Networks. *IEEE Communications Letters*, 26(5), 1199-1203. Scopus. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3151324>
- Agarwal, K., Agarwal, K., Jha, A. K., & Joshi, I. (2022). Intelligence and Internet of Things with 5G Technology: Application and Development. *Proc. Int. Conf. Electron. Renew. Syst., ICEARS*, 762-766. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ICEARS53579.2022.9752190>
- Ahmed, S., Yong, J., & Shrestha, A. (2023). The Integral Role of Intelligent IoT System, Cloud Computing, Artificial Intelligence, and 5G in the User-Level Self-Monitoring of COVID-19. *Electronics (Switzerland)*, 12(8). Scopus. <https://doi.org/10.3390/electronics12081912>
- Ahrend, U., Aleksy, M., Berning, M., Gebhardt, J., Mendoza, F., & Schulz, D. (2021). Sensors as the Basis for Digitalization: New Approaches in Instrumentation, IoT-concepts, and 5G. *Internet of Things (Netherlands)*, 15. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100406>
- Almudayni, Z., Soh, B., & Li, A. (2022). A Comprehensive Study on the Energy Efficiency of IoT from Four Angles: Clustering and Routing in WSNs, Smart Grid, Fog Computing and MQTT & CoAP Application Protocols. En Hussain W. & Jan M.A. (Eds.), *Lect. Notes Inst. Comput. Sci. Soc. Informatics Telecommun. Eng.: Vol. 421 LNICST* (pp. 54-70). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95987-6_4

- Angulo, K. (2023). *Ecosistema de internet de las cosas orientado a la adquisición automática de datos ambientales y de calidad del aire*. [Tesis de grado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Arteaga, J. (2024). *Diseño e implementación de un prototipo de estación meteorológica para monitorear parámetros ambientales en cultivos de cebolla utilizando internet de las cosas* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
<https://hdl.handle.net/20.500.12773/19310>
- Betancur, E. (2021). *Desarrollo de estación meteorológica con IOT, redundante a fallos y para condiciones ambientales de alta montaña* [Tesis de grado, Universidad EIA].
<https://repository.eia.edu.co/entities/publication/daa0845e-9e83-4fd6-a54a-9fadd6488cd2>
- Carranza, H. J. S., Wong, P. W., Alvarado, K. E. R., & Cordero, M. J. H. (2024). Implementación de un Sistema Meteorológico Educativo Usando IoT y Raspberry PI. *INGENIO*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.29166/ingenio.v7i2.5265>
- Castro, V. G. A., & Ramírez, D. C. P. (2024). Análisis de variables agrícolas implementando un gemelo digital. *Revista Metalnova*, 7(1), Article 1.
- Cerdan, J. R., & Andrade, L. (2022). Design of a Weather Station with IoT in the Wetlands of the District of Ventanilla – Callao. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12(9), 30-40. Scopus. https://doi.org/10.46338/ijetae0922_04
- Chamba, J. (2022). *Diseño de una estación meteorológica de bajo coste orientada al internet de las cosas* [Tesis de grado]. Universidad de Zaragoza.
- Chen, J., Wu, H., Wang, X., Wang, S., Cheng, G., & Hu, X. (2025). IEA-DMS: An Interpretable feature-driven, Efficient and Accurate Detection Method for Slow HTTP DoS in high-

- speed networks. *Computers and Security*, 150. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.104291>
- Guillen, I. (2021). *Modelo de implementación para el monitoreo y control de condiciones ambientales basados con tecnologías de Arduino y Raspberry* [Tesis de grado].
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Hampe, M., Muller, T., & Stieler, A. (2021). Single Pair Ethernet for the Industrial Internet of Things: Accurate Line Measurements. *Jt. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. Signal Power Integr., EMC Europe, EMC/SI/PI/EMC Europe*, 505-508. Scopus.
<https://doi.org/10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559358>
- Ioannou, K., Karampatzakis, D., Amanatidis, P., Aggelopoulos, V., & Karmiris, I. (2021). Low-cost automatic weather stations in the internet of things. *Information (Switzerland)*, 12(4). Scopus. <https://doi.org/10.3390/info12040146>
- Lema, A., & Cabrera, A. (2023). *Estación meteorológica aplicando internet de las cosas con soporte en LoRaWAN para la agricultura inteligente* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/58474>
- Mukadam, D. A., & Hirikude, S. M. (2023). Review of feasibility of IoT Protocols for 5G Industrial & Mobile Applications. *IEEE Eng. Informatics, EI. 2023 IEEE Engineering Informatics, EI 2023*. Scopus. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF58110.2023.10520399>
- Rennane, A., Benmahmoud, F., Djoudi, A., Dali, A., & Cherif, A. T. (2024). IoT Weather Station Optimized for Energy Efficiency. *Journal of Renewable Energies*, 1(1 Special Issue), 229-234. Scopus. <https://doi.org/10.54966/jreen.v1i1.1264>

- Rubiños, S., Cuzcano, A., Tejada, A., Mendoza, F., Grados, J., & Nieves, C. (2023). *Estación meteorológica automática de bajo costo y el acondicionamiento de señales*. Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador. <https://doi.org/10.33996/cide.ecuador.EM2636379>
- Solano, G. (2021). *Diseño e implementación de una estación meteorológica con acceso a internet para lugares remotos* [Tesis de grado, Universidad de Ingeniería y Tecnología]. <http://repositorio.utec.edu.pe/handle/20.500.12815/227>
- Tolosa, A. F. R., López, J. M. R., Ferreira, J. R., Pinto, G. A. O., Hernández, I., Suárez, A. O., & Zuluaga, J. G. (2023). Sistema IIoT para la monitorización de variables atmosféricas como caso de estudio para una plataforma educativa. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*. <https://doi.org/10.26507/paper.2944>
- Wang, J. (2022). Application of 5G Internet of Things Technology in the Design of Physical Education Platform. *Computational Intelligence and Neuroscience, 2022*. Scopus. <https://doi.org/10.1155/2022/9382048>
- Woo, W., Richards, W., Selker, J., & Udell, C. (2023). WeatherChimes: An Open IoT Weather Station and Data Sonification System. *HardwareX, 13*. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00402>

ANEXOS

Anexo 01: Tablero eléctrico de respaldo automático de energía, alojado en un gabinete metálico

Para asegurar la continuidad del suministro para la Raspberry Pi, el router y los demás componentes de la plataforma IoT de la estación meteorológica.

Figura 33

Sistema de respaldo de energía automática



Anexo 02: Presupuesto estimado para implementación con Radioenlace PTP

Nivel	Componente	Cantidad	Subtotal (S/)
Básico / Económico	Radio	2	1,580
	Antena	2	420
	Cableado y accesorios	1 set	250
	Mano de obra / alineación	1	300
	Total estimado		≈ 2,550
Media Gama / Estándar	Radio	2	5,598
	Antena	2	1,600
	Cableado y accesorios	1 set	400
	Mano de obra / alineación	1	600
	Total estimado		≈ 8,198
Robusto / Profesional	Radio	2	6,400
	Antena	2	2,400
	Torre / Mástil	1	1,000
	Cableado y accesorios	1 set	700
	Mano de obra especializada	1	1,000
Total estimado		≈ 11,500	

Anexo 03: Presupuesto estimado para enlace de fibra óptica PTP

Concepto	Valor
Distancia del enlace	1.574 km
Tipo de fibra	Monomodo (SMF)
Pérdida por fibra	0.11 dB
Pérdida por conectores	1.00 dB
Pérdida total	1.11 dB
Velocidad soportada	1G / 10G / 25G
Costo fibra (1574 m)	S/ 3,000 – 3,500
Costo conectores y cajas	S/ 200 – 300
Costo transceptores (2 SFP+)	S/ 800 – 1,200
Costo switches (2)	S/ 2,400 – 4,000
Mano de obra	S/ 500 – 800
Costo total estimado	S/ 6,000 – 8,000

Anexo 04: Presupuesto estimado para enlace satelital

Categoría	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Costo Total
1.	Kit Starlink Estándar	Unidad	1	1,750 - 1,900	1,750 - 1,900
2.	Cable de Red Ethernet	Unidad	1	50 - 80	50 - 80
3.	Adaptador Ethernet	Unidad	1	120 - 150	120 - 150
4.	Costo de Servicio Mensual	Mes	1	140 - 210	140 - 210
Total					2,060 - 2,340

Anexo 05: Comparación de costos

Enlace	Costo Inicial	Costo Operativo	Costo Total
1. Enlace Inalámbrico	S/ 2,400 - S/ 3,950	S/ 1,200 - S/ 1,800 (Plan Internet local)	S/ 3,600 - S/ 5,750
2. Fibra Óptica	S/ 7,800 - S/ 9,800	S/ 1,200 - S/ 1,800 (Plan Internet local)	S/ 4,080 - S/ 6,670
3. Starlink Estándar	S/ 2,060 - S/ 2,340	S/ 1,680 - S/ 2,520 (Starlink)	S/ 3,740 - S/ 4,860