

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS
INDUSTRIALES

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE
TELECOMUNICACIONES

**Optimización de la Ubicación de Estaciones de Monitoreo
Ambiental en Zonas Urbanas: Un Modelo de Largo Plazo para la
Ciudad de México y su Área Metropolitana**

TESIS QUE PRESENTAN

Norma Velázquez Hernández

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN
INGENIERÍA EN SISTEMAS
ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

Y

Roberto Juventino Maya Segura

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN
INGENIERÍA EN SISTEMAS
ELECTRÓNICOS Y DE TELECOMUNICACIONES

Director de Tesis

Dr. Julio Cesar Salas Torres

Co-director

Lic. David Velázquez Suárez

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Agradecimientos

A nuestro director de tesis, el Dr. Julio César Salas Torres, por haber aceptado dirigir este trabajo; por su ejemplo, apoyo y confianza; y, sobre todo, por su motivación constante para alcanzar las metas que nos propusimos.

A nuestro codirector, el Lic. David Velázquez Suárez, así como a los doctores Daniel Tapia Sanchez, Daniel Maisner Bush y Lorenzo Calzado Lopez, por fungir como lectores de este trabajo y por su tiempo, dedicación y valiosas observaciones, que enriquecieron este proyecto.

A los laboratorios de LACECI y de Depuración del Agua, por el espacio y los insumos proporcionados para la realización de este proyecto.

A los profesores Agustín Gonzales, Enrique Cruz y Victor Macias, por sus enseñanzas.

A Levy Gonzalez, Luis Eduardo Ramirez, Eduardo Mendez y Carlitos Solis, por su apoyo.

Finalmente, agradecemos al proyecto de investigación consolidado *Desarrollo y Aplicación de Sensores Ambientales Innovadores para el Monitoreo de Contaminantes y su Integración en la Formación Académica de la UACM*, código **UACM-CCYT-CON-11**, por su respaldo y contribución al desarrollo de esta investigación.

Dedicatoria de Norma

Con profunda gratitud y amor, dedico esta tesis a las personas que han sido mi mayor inspiración y apoyo incondicional a lo largo de este desafiante pero gratificante camino.

A mi amada familia, ustedes son los cimientos sobre los que he construido mis sueños. Gracias por su amor incondicional, por sus incontables sacrificios, por sus palabras de aliento en los momentos de duda y por celebrar cada pequeño avance como si fuera propio. Su fe en mí ha sido mi mayor motivación para perseverar. Cada página de este trabajo lleva un pedazo de su amor y apoyo. Los amo más de lo que las palabras pueden expresar.

A mi maravilloso esposo, mi compañero de vida y mi cómplice en esta aventura académica. Gracias por tu paciencia infinita, por tu comprensión en las largas noches de estudio, por tu apoyo inquebrantable y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Tu amor y aliento han sido mi faro en la oscuridad y mi mayor fuente de inspiración. Compartir este logro contigo lo hace aún más significativo. Te amo profundamente.

Este trabajo es un testimonio de su amor y sacrificio. Espero que sea un reflejo del orgullo y la alegría que ustedes me han brindado siempre. Gracias por ser mi todo.

Norma Velázquez Hernández

Dedicatoria de Roberto

A través de estos versos, honro a quienes
hicieron posible este logro académico:

Agradezco
A mi Dios, quien me dio la vida,
A mis abuelos, mi pasado,
A mis padres, el futuro,
A mis hermanos, fortaleza,
A mis amigos, una mano,
A mis maestros, las herramientas.

Roberto Juventino Maya Segura

Índice general

Agradecimientos	III
Dedicatoria	V
Dedicatoria	VII
Introducción	1
1. Estaciones Meteorológicas	3
1.1. Historia y Actualidad	3
1.2. Orígenes de la Meteorología	4
1.2.1. Estación Meteorológica Automatizada	4
1.3. Clasificación de Estaciones	5
1.4. Variables Meteorológicas	5
1.5. Estación Meteorológica con Módulo TTGO T-Call V1.4	6
1.5.1. Funcionamiento del Sistema	6
1.6. Descripción Técnica de los Elementos del Prototipo	8
1.6.1. Selección del módulo de control (TTGO T-Call V1.3 ESP32 with SIM800L)	8
1.6.2. Descripción del Módulo TTGO T-Call V1.3 ESP32 con SIM800L	8
2. Sensores	11
2.0.1. Tipos de Salida de un Sensor	11
2.0.2. Funcionamiento básico de un sensor	13
2.0.3. Importancia de los Sensores	15
2.0.4. Consideraciones para la Selección de un Sensor	15
2.0.5. Sensor de Temperatura y Humedad (DHT22)	15
2.0.6. Sensor MQ135	16
2.0.7. Sensor de ozono (MQ131)	17
2.0.8. Sensor de Lluvia Módulo electrónico MH-RD	18
2.0.9. ESP32 TTGO T-Call V1.4 con SIM800H (240 MHz)	19
2.0.10. Fuente de Alimentación (Batería/Solar)	21

3. Implementación	25
3.1. Diseño del sistema	25
3.2. Desarrollo del PCB	26
3.2.1. Elaboración del prototipo: Diseño de la placa de circuito impreso (PCB)	26
Elaboración del prototipo: Diseño de la placa de circuito impreso (PCB)	26
3.3. Lenguaje de Programacion	29
3.4. Instalación de Arduino IDE 1.8.x en Ubuntu Linux	29
3.4.1. Opciones de instalación	29
3.4.2. Pasos detallados para instalación desde archivo .tar.xz	29
3.5. Configuración de la placa ESP32 TTGO T-Call en Arduino IDE	30
3.5.1. Agregar gestor de tarjetas de la ESP32	30
3.6. Características técnicas de la placa ESP32-SIM800H	31
3.6.1. Módulo ESP32	31
3.6.2. Módulo SIM800H	31
3.7. Tipos de comunicación soportados	32
3.7.1. Comunicación Wi-Fi (ESP32)	32
3.7.2. Comunicación GSM/GPRS (SIM800H)	32
3.7.3. Comunicación interna: UART entre ESP32 y SIM800H	32
3.8. Aplicaciones en telecomunicaciones	32
3.9. Ensamblaje Final	33
3.10. Montaje del Sistema de Alimentación	33
3.11. Programación	37
4. Resultados	39
4.1. Datos Obtenidos	39
4.2. Gráficas, temperatura, humedad, presión	40
4.3. Análisis Comparativo	42
4.4. Costos del Prototipo	43
Conclusiones	45
Proyección hacia estudios de posgrado	46
A. Diagramas completos	49
Anexo B: Diagramas completos	49
Bibliografía	51
Bibliografía	53

Índice de figuras

1.1. Ilustración del Ensamblaje de Puntos.	7
1.2. MH-RD (Sensor de lluvia)	7
1.3. Comparativa entre ESP32 + SIM800L (TTGO T-Call) y Arduino UNO + Módulo Wi-Fi	9
1.4. Vista del módulo TTGO T-Call V1.3 con ESP32 y SIM800L.	10
2.1. Sensor Temperatura y Humedad (THD22).	16
2.2. Sensor MQ135	16
2.3. MQ-131(Sensor de ozono)	17
2.4. MH-RD (Sensor de lluvia)	18
2.5. Características técnicas del sensor de lluvia resistivo MH-RD	19
2.6. Diagrama de funcionamiento de la ESP32 TTGO T-Call V1.4 con SIM800H	20
2.7. diagrama ESP32 y sensores/MQTT a través del SIM800H	21
2.8. Controlador de carga solar PWM de 30A utilizado para gestionar la alimentación desde paneles solares hacia una batería recargable. Permite una carga eficiente y protege la batería contra sobrecargas.	22
2.9. Panel solar compacto ideal para alimentar dispositivos IoT mediante un sistema de carga con batería. Su tamaño y potencia son adecuados para aplicaciones remotas o de baja demanda energética.	23
2.10. Batería de ácido-plomo de 12V y 1.2Ah empleada para almacenar energía generada por el panel solar y suministrarla a los dispositivos cuando no hay generación solar.	23
3.1. Diagrama del sistema	25
3.2. Diseño de la placa PCB en KiCad, antes del planchado.	26
3.3. Grabado de la PCB con solución de cloruro férrico.	27
3.4. Placa perforada.	28
3.5. Montaje interno de la caja de registro: PCB, batería y controlador de carga solar.	34
3.6. Caja impresa en 3D para alojar el sensor de detección de agua.	35

3.7. Cable multiconductor de 12 vías, calibre 22AWG, usado para conexiones entre sensores y la PCB.	35
3.8. Celda solar de 6V/5W utilizada para alimentar el sistema en modo autónomo.	36
3.9. Pantalla de Stevenson	37
3.10. cuerpo del Programa	37
3.11. cuerpo del Programa	38
3.12. cuerpo del Programa	38
4.1. Tabla de sensores	39
4.2. Tabla de sensores	40
4.3. Tabla de sensores	41
4.4. Gráfica Temperatura por hora y día sensor bme680	42
4.5. Gráfica Temperatura por hora y día sensor dht22	42
4.6. Gráfica Temperatura por hora y día sensor dht22	43
A.1. Enter Caption	50

Introducción

Frente a los crecientes desafíos ambientales y la urgencia de contar con sistemas de monitoreo constante de contaminantes atmosféricos, disciplinas como las telecomunicaciones y la ingeniería industrial resultan esenciales para el desarrollo de soluciones tecnológicas eficaces. El presente trabajo se desarrolla en el marco del proyecto consolidado “*Desarrollo y Aplicación de Sensores Ambientales Innovadores para el Monitoreo de Contaminantes y su Integración en la Formación Académica de la UACM*”, aprobado en la convocatoria 2024, y busca generar herramientas que faciliten la observación sistemática del entorno mediante el empleo de sensores y tecnologías de la información. Con el propósito de construir una estación de monitoreo ambiental reproducible, estudiable y adaptable al contexto universitario, se diseñó una estrategia dividida en cinco líneas de acción principales:

1. **Investigación y Desarrollo:** Revisión exhaustiva de literatura sobre tecnologías de sensores ambientales, seleccionando materiales, circuitos y diseños en función de costo, durabilidad y precisión.
2. **Taller de Diseño y Fabricación:** Organización de asesorías interdisciplinarias que involucraron a estudiantes y docentes de distintas áreas de ingeniería, fomentando el diseño colaborativo y la innovación universitaria.
3. **Pruebas y Calibración:** Ejecución de pruebas de campo para evaluar el desempeño de los sensores en condiciones reales, aplicando metodologías de calibración con datos comparativos para asegurar fiabilidad.
4. **Desarrollo de Software:** Creación de una plataforma para la recopilación, análisis y visualización de datos de los sensores, integrando bases de datos en MySQL, paneles de interpretación gráfica y análisis con técnicas de *big data*.
5. **Colaboración y Difusión:** Establecimiento de vínculos con organismos gubernamentales e instituciones académicas para ampliar el impacto del proyecto, junto con la programación de publicaciones científicas y presentaciones en foros especializados.

Los objetivos generales y específicos del proyecto guiaron el desarrollo de esta tesis,

estructurados en torno al diseño, la implementación y la integración curricular de tecnologías aplicadas:

Objetivos del Proyecto

1. **Sensores:** Investigar e implementar sensores ambientales de bajo costo y alto rendimiento para la detección eficiente de contaminantes, integrando microcontroladores y plataformas electrónicas de código abierto.
2. **Fabricación de Prototipos:** Establecer un laboratorio universitario para la construcción y validación de estaciones meteorológicas con sensores personalizados.
3. **Integración Curricular:** Impulsar la formación técnica de los estudiantes mediante su participación activa en proyectos de investigación aplicada, incorporando los desarrollos en asignaturas de electrónica, programación y modelado de datos.
4. **Análisis de Datos y Publicación:** Procesar y validar los datos obtenidos para identificar patrones de contaminación y generar productos académicos con potencial de publicación en revistas arbitradas o presentación en congresos.

Capítulo 1

Estaciones Meteorológicas

1.1. Historia y Actualidad

Como en muchas disciplinas de las ciencias físicas, resulta casi imposible establecer con certeza el inicio exacto de la meteorología como ciencia. Es importante distinguir entre la meteorología entendida como una disciplina científica y su concepción más antigua como una forma de conocimiento empírico.

Desde tiempos remotos, el ser humano —particularmente en su rol de agricultor o cazador— ha dependido intensamente de las condiciones atmosféricas para su supervivencia. Aunque carecía de explicaciones racionales o científicas para muchos de los fenómenos meteorológicos, logró compilar un conjunto considerable de indicios atmosféricos que, transmitidos oralmente de generación en generación, se convirtieron en lo que actualmente conocemos como sabiduría popular o refranero meteorológico.

El término “meteorología” parece remontarse al año 340 a. C., cuando el filósofo griego Aristóteles escribió un tratado sobre filosofía natural titulado *Meteorológica*. Esta obra recopila el conocimiento disponible en la época sobre fenómenos de la atmósfera, abordando temas como las nubes, el rocío, la lluvia, la nieve, el viento, el granizo, los rayos, los truenos y los cambios del estado del tiempo. También incluía disertaciones sobre astronomía, geografía y temas afines a la química primitiva.

El tratado fue titulado *Meteorológica* porque, en aquella época, el término *meteoro* se utilizaba para describir cualquier objeto o fenómeno observable en el cielo o suspendido en la atmósfera. En la actualidad, diferenciamos entre los meteoros (como los meteoritos de origen extraterrestre) y los hidrometeoros, que son partículas de agua o hielo presentes en la atmósfera, como la lluvia o la nieve.

En su obra, Aristóteles intentó ofrecer una explicación racional y sistemática de los fenómenos atmosféricos, aunque desde una perspectiva filosófica. No obstante, muchas de sus afirmaciones resultaron ser incorrectas. No fue sino hasta el siglo XVII, con el desarrollo del método científico y los avances en física y meteorología, que se demostró que gran parte de sus planteamientos carecían de fundamento empírico.

1.2. Orígenes de la Meteorología

La meteorología, entendida como el estudio de los fenómenos atmosféricos y del clima, tiene sus raíces en la antigua Grecia. El término proviene de la obra “Meteorológica”, escrita por Aristóteles alrededor del año 340 a. C., donde se presentaban observaciones e ideas acerca del cielo y el tiempo, muchas de las cuales eran aún especulativas.

Con el transcurso de los siglos, los avances más significativos en esta ciencia estuvieron estrechamente ligados a la invención de instrumentos de medición. En 1607, Galileo Galilei construyó el primer termómetro. Posteriormente, en 1643, Evangelista Torricelli desarrolló el barómetro, instrumento clave para medir la presión atmosférica. Más tarde, Blaise Pascal y René Descartes demostraron que dicha presión disminuye con la altitud, y Edmund Halley profundizó aún más en estos conceptos.

En 1667, Robert Hooke inventó el anemómetro, empleado para medir la velocidad del viento. Ya en 1780, Horace-Bénédict de Saussure completó el conjunto de herramientas meteorológicas esenciales con el higrómetro de cabello, diseñado para medir la humedad del aire.

Durante el siglo XX, el desarrollo de modelos matemáticos posibilitó predicciones meteorológicas más precisas. En la década de 1950, comenzaron a realizarse las primeras predicciones utilizando computadoras. En 1960, se lanzó el primer satélite meteorológico operativo, el TIROS-1, marcando el inicio de una nueva era para la observación global del clima.

Desde entonces, el avance tecnológico ha sido vertiginoso, permitiendo no solo una mejora sustancial en los pronósticos, sino también un análisis más profundo de fenómenos como El Niño, los incendios forestales y el cambio climático. En la actualidad, se utilizan modelos climáticos de alta resolución para estudiar los cambios a largo plazo en el sistema climático terrestre.

1.2.1. Estación Meteorológica Automatizada

Una **estación meteorológica automatizada (EMA)** es un sistema tecnológico diseñado para medir y registrar automáticamente variables atmosféricas como temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitación, presión atmosférica y radiación solar, entre otras [4]. Estas estaciones son ampliamente utilizadas por organismos dedicados al monitoreo ambiental, servicios meteorológicos nacionales e internacionales, así como por proyectos de investigación climática.

Las EMAs operan de forma autónoma, sin necesidad de intervención humana continua, lo que permite el registro permanente y en tiempo real de datos meteorológicos. Esta capacidad las convierte en herramientas clave para la generación de alertas tempranas ante eventos climáticos extremos, el análisis del cambio climático y el respaldo a sectores estratégicos como la agricultura, la aviación y la gestión de recursos hídricos. Estas estaciones están compuestas, generalmente, por sensores electrónicos, un sistema de adquisición de datos (*data logger*), un módulo de comunicación (como módems o enlaces satelitales), y una fuente de alimentación, habitualmente paneles solares.

1.3. Clasificación de Estaciones

1. Estaciones Meteorológicas Manuales

Son aquellas en las que las mediciones se realizan de forma manual por parte de un operador capacitado. Utilizan instrumentos tradicionales como termómetros, barómetros aneroides, pluviómetros y veletas [4]. Son comunes en zonas rurales o en instituciones educativas debido a su bajo costo y facilidad de uso.

2. Estaciones Meteorológicas Automatizadas (EMA)

Estas estaciones utilizan sensores electrónicos conectados a un sistema de adquisición de datos (*data logger*) que registra automáticamente las variables atmosféricas sin intervención humana continua [3]. Se emplean ampliamente en redes nacionales e internacionales de monitoreo climático.

3. Estaciones Meteorológicas Semi-automáticas

Tienen sensores automáticos pero requieren intervención periódica del operador para verificar datos, calibrar equipos o realizar mantenimiento [2].

4. Estaciones Meteorológicas Especializadas

Se diseñan para medir variables específicas o trabajar en condiciones extremas. Ejemplos:

- Estaciones agrometeorológicas
- Estaciones aeroportuarias (AWOS)
- Estaciones climáticas de alta precisión

1.4. Variables Meteorológicas

Las **variables meteorológicas** son los parámetros físicos que se miden para describir el estado de la atmósfera en un momento dado. Estas variables permiten comprender y predecir los fenómenos climáticos y atmosféricos. Las más comunes son:

1. Temperatura

Es una medida del grado de calor del aire. Se expresa generalmente en grados Celsius (C) o Kelvin (K). La temperatura afecta procesos como la evaporación, la condensación y la sensación térmica [2].

2. Humedad Relativa

Indica la cantidad de vapor de agua presente en el aire en relación con la máxima cantidad que podría contener a una temperatura dada. Se expresa en porcentaje (%) [3].

3. Precipitación

Corresponde al agua que cae del cielo en forma de lluvia, nieve, granizo u otras formas. Se mide en milímetros (mm) o litros por metro cuadrado (l/m^2) [4].

4. Presión Atmosférica

Es la fuerza ejercida por el peso del aire sobre una superficie. Se mide comúnmente en hectopascales (hPa) o milibares (mbar) [2].

5. Velocidad y Dirección del Viento

La *velocidad* se mide en metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h), mientras que la *dirección* indica de dónde proviene el viento, expresada en grados o puntos cardinales [3].

6. Radiación Solar

Representa la energía proveniente del sol que llega a la superficie terrestre. Se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2) [4].

7. Nubosidad

Se refiere a la cantidad de cielo cubierto por nubes. Se expresa en octavos (de 0 a 8) o en porcentaje [2].

8. Visibilidad

Indica la distancia máxima a la cual pueden verse y reconocerse objetos claramente. Se ve afectada por niebla, lluvia, humo o polvo [3].

1.5. Estación Meteorológica con Módulo TTGO T-Call V1.4

1.5.1. Funcionamiento del Sistema

A continuación, se describe de manera general cómo opera el sistema de monitoreo ambiental apoyado en energía solar:

1. **Captación de energía solar:** El panel solar convierte la luz solar en electricidad, que se envía al controlador de carga YJSS-30A.
2. **Control y almacenamiento de energía:** El controlador regula la carga hacia la batería de ácido-plomo, asegurando su correcto funcionamiento y vida útil.
3. **Alimentación del módulo TTGO T-Call:** Desde el controlador se alimenta el módulo TTGO T-Call V1.4 a través de una salida USB estable de 5V.
4. **Recolección de datos por parte de los sensores:** Los sensores ambientales (MQ-135, DHT22, MH-RD, MQ-131) miden variables como calidad del aire, temperatura, humedad, lluvia y nivel de ozono.

5. **Procesamiento y transmisión de datos:** El TTGO T-Call recibe los datos de los sensores y los transmite vía red celular (SMS o GPRS), permitiendo el monitoreo remoto.
6. **Uso práctico de los datos:** Los datos recolectados pueden usarse para alertar sobre contaminación, registrar condiciones climáticas o activar acciones remotas.

En resumen, el sistema funciona de forma autónoma gracias a la energía solar, integrando sensores ambientales y comunicación inalámbrica para aplicaciones en monitoreo ambiental y telecomunicaciones.

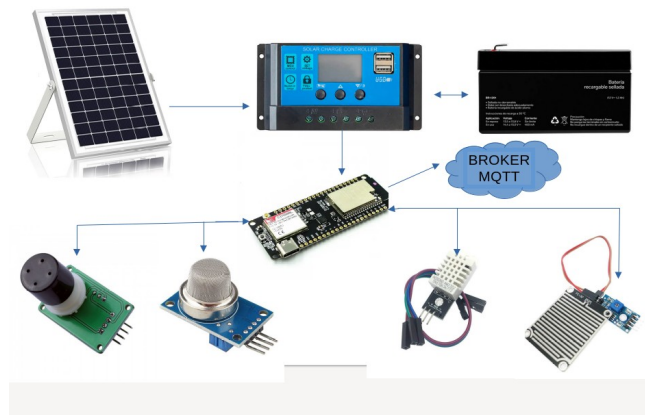


Figura 1.1: Ilustración del Ensamblaje de Puntos.

Diagrama de Bloques con Retroalimentación - Ensamblaje de Puntos

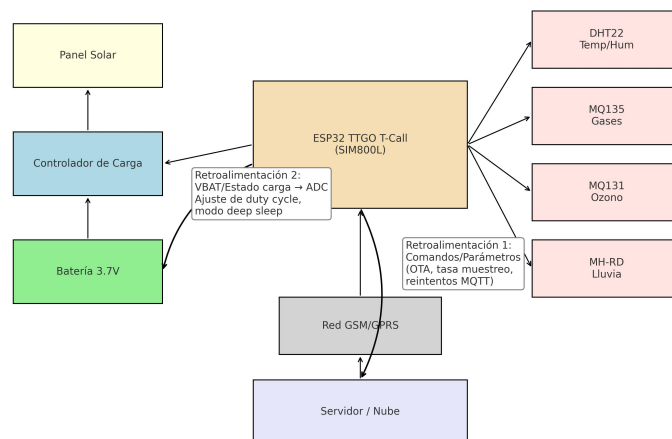


Figura 1.2: MH-RD (Sensor de lluvia)

1.6. Descripción Técnica de los Elementos del Prototipo

En este apartado se abordan las características técnicas de los principales componentes utilizados para el desarrollo del prototipo de la estación ambiental, destacando sus especificaciones y justificación de uso. El sistema está diseñado para operar de forma autónoma en ubicaciones remotas, por lo que se seleccionaron dispositivos con capacidades adecuadas de procesamiento, comunicación y adquisición de datos.

1.6.1. Selección del módulo de control (TTGO T-Call V1.3 ESP32 with SIM800L)

Para la implementación de este proyecto, se evaluaron diversas plataformas de desarrollo con capacidades de conectividad, incluyendo opciones basadas en Wi-Fi. Sin embargo, se optó por la conectividad celular debido a su mayor alcance y autonomía en entornos sin infraestructura de red local. En este contexto, el módulo integrado TTGO T-Call V1.3 (ESP32 + SIM800L) se destacó como la solución óptima. A diferencia de placas tradicionales como el Arduino UNO R3, este módulo combina un microcontrolador ESP32 de doble núcleo (Xtensa LX6 a 240 MHz) con un módulo GSM/GPRS SIM800L, lo que proporciona ventajas críticas para aplicaciones IoT en ubicaciones remotas o de difícil acceso.

1.6.2. Descripción del Módulo TTGO T-Call V1.3 ESP32 con SIM800L

El TTGO T-Call V1.4 es un módulo de desarrollo compacto que integra un microcontrolador ESP32 con un módem GSM SIM800L. Esta combinación le permite ofrecer conectividad Wi-Fi, Bluetooth y celular (2G), lo que lo convierte en una excelente opción para proyectos de Internet de las Cosas (IoT) en entornos remotos o sin infraestructura de red fija.

A continuación, se describen sus principales características técnicas:

■ Procesador y Memoria

- Chip principal: ESP32 (Xtensa[®] LX6, 240 MHz, de 1 o 2 núcleos).
- Memoria Flash: 4 MB.
- PSRAM: 8 MB.
- SRAM interna: 520 KB.

■ Conectividad

- Wi-Fi: IEEE 802.11 b/g/n, hasta 150 Mbps (2.4 GHz).
- Bluetooth: Versión 4.2 BR/EDR y BLE.
- GSM (SIM800L): Soporte para Nano SIM, comunicación mediante red 2G.

■ Interfaces y Periféricos

Característica	ESP32 + SIM800L (TTGO T-Call)	Arduino UNO + Módulo Wi-Fi
Microcontrolador	ESP32 (dual-core, 240 MHz, 520 KB SRAM)	ATmega328P (16 MHz, 2 KB SRAM)
<u>Conectividad principal</u>	GSM/GPRS (SIM800L) + Wi-Fi + Bluetooth	Wi-Fi (ESP8266 o similar)
Cobertura de red	Global via red celular (requiere SIM)	Limitada a zonas con red Wi-Fi disponible
Independencia de infraestructura	Alta (no depende de <u>routers</u> o redes locales)	Baja (requiere acceso a un punto de acceso Wi-Fi)
Consumo energético	Moderado, con modos de bajo consumo	Bajo en reposo, pero Wi-Fi puede elevar el consumo
Facilidad de integración	Alta: múltiples interfaces (UART, I ² C, SPI, ADC, etc.)	Moderada, pero con recursos limitados en memoria
Complejidad de programación	Media (requiere manejo de comunicación AT con SIM800L)	Baja (ambiente Arduino sencillo con muchas librerías)
Capacidad para proyectos IoT remotos	Alta (ideal para monitoreo ambiental en campo abierto)	Baja (requiere cobertura Wi-Fi)

Figura 1.3: Comparativa entre ESP32 + SIM800L (TTGO T-Call) y Arduino UNO + Módulo Wi-Fi

- Interfaces compatibles: UART, SPI, I²C, PWM, ADC, I²S, SDIO.
- Puerto USB a TTL: CP2104.
- Puerto USB tipo C para carga y datos.

■ Energía y Consumo

- Alimentación: 5V vía USB.
- Corriente de funcionamiento: Aproximadamente 70 mA.
- Corriente en modo de reposo (sleep): Aproximadamente 1.1 mA.
- Batería compatible: 3.7V Li-ion, con conector JST de 2 pines (2.0 mm).
- Corriente de carga: 500 mA.

■ Tamaño y Temperatura

- Dimensiones: 78.83 mm × 28.92 mm × 8.06 mm.
- Peso: 11,77 g.

- Rango de temperatura de operación: -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$
- **Seguridad y Software**
- Sistema operativo: FreeRTOS.
 - Modos de operación Wi-Fi: Estación (STA), Punto de Acceso (AP), STA+AP, y P2P.
 - Seguridad: WPA/WPA2, cifrado AES, RSA, ECC y SHA.
 - Protocolos compatibles: IPv4, IPv6, SSL, TCP, UDP, HTTP, FTP, MQTT.
 - Actualización de firmware: vía UART o OTA (Over-The-Air).
 - Soporte de desarrollo: SDK, servicios en la nube y aplicaciones móviles (Android/iOS).



Figura 1.4: Vista del módulo TTGO T-Call V1.3 con ESP32 y SIM800L.

Capítulo 2

Sensores

Un sensor es un dispositivo que detecta y responde a algún tipo de entrada proveniente del entorno físico o químico, como luz, calor, movimiento, presión, humedad, entre otros. Su principal función es convertir una magnitud física o química en una señal eléctrica procesable por un sistema electrónico, lo que permite realizar mediciones precisas y controlar sistemas automatizados.

Definición técnica:

Un sensor es un transductor que convierte una forma de energía (la magnitud física o química detectada) en otra forma de energía (señal eléctrica). Esta señal puede ser analógica (continua) o digital (discreta), dependiendo del tipo de salida del sensor (Bebis, 2021).

2.0.1. Tipos de Salida de un Sensor

Los sensores pueden clasificarse según el tipo de señal que generan como respuesta a la magnitud medida.

Salida Analógica

La señal varía de forma continua en proporción a la magnitud medida.

- Voltaje:

Señal de salida en forma de voltaje continuo. rangos típicos: $0 - -5\text{ V}$, $0 - -10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 10\text{ V}$

- Corriente:

La señal varía en intensidad. El estándar industrial más común es 4–20 mA , donde:

- 4 mA = valor mínimo del rango

- 20 mA = valor máximo del rango

Cita textual:

“The 4–20 mA current loop is the most widely used standard in industrial process control systems due to its reliability and noise immunity”(Blevins & Nixon, 2020, p. 67).

Resistencia:

Cambia su valor óhmico en función de la magnitud medida. Ejemplos: termistores, RTDs. Requiere circuitos adicionales para convertir esta variación en señal útil (por ejemplo, un puente de Wheatstone) (Morris & Langari, 2012).

Salida Digital

La señal se presenta en valores discretos o codificados.

- Niveles Lógicos (Alto/Bajo):
Indican estados binarios, como "detectado/no detectado". Los niveles dependen del estándar lógico utilizado (TTL, CMOS, etc.).
- Interfaces de Comunicación Digital: Algunos sensores ofrecen comunicación mediante protocolos digitales integrados:
 - I²C (Inter-Integrated Circuit): Protocolo serial de dos hilos, usado en distancias cortas.
 - SPI (Serial Peripheral Interface): Protocolo de alta velocidad con cuatro hilos.
 - UART/RS-232/RS-485: Comunicación asíncrona utilizada en distancias largas.
 - Ethernet: Para comunicación en redes industriales.
 - IO-Link: Protocolo punto a punto para sensores inteligentes en ambientes industriales (Siemens Industry Online Support, 2022).
- Salida Codificada:
Representa la magnitud medida en código digital. Ejemplo: posición angular en encoders rotativos.
- Modulación por Ancho de Pulso (PWM):
La información se transmite variando la duración de los pulsos de una señal digital.

Salida de Frecuencia o Período

La frecuencia o el período de la señal cambian en función de la variable medida. Es útil en aplicaciones donde se requiere medir velocidad o caudal (D'Souza, 2006).

Salida de Conmutación (Relé o Transistor)

Actúa como un interruptor que se activa al alcanzar un umbral específico.

- Contacto de relé: Puede conmutar corrientes AC o DC.
- Transistor (NPN/PNP): Usado principalmente para señales DC (Rao, 2007).

2.0.2. Funcionamiento básico de un sensor

Un sensor realiza tres funciones principales:

1. Detecta un cambio en su entorno.
2. Responde a ese cambio produciendo una señal de salida.
3. Convierte una magnitud física o química en una señal eléctrica.

Esta señal es luego procesada por un sistema de adquisición de datos, microcontrolador u otro dispositivo para tomar decisiones o mostrar información (Fraden, 2016).

Según el Principio Físico de Funcionamiento

- Sensores Resistivos: Cambian su resistencia (ej: termistores, fotorresistencias).
- Sensores Capacitivos: Cambian su capacitancia (ej: sensores de humedad).
- Sensores Inductivos: Cambian su inductancia (ej: LVDT).
- Sensores Piezoeléctricos: Generan carga eléctrica bajo presión (ej: acelerómetros).
- Sensores Ópticos: Detectan cambios en la luz (ej: fotodiodos).
- Sensores Térmicos: Miden temperatura (ej: termopares, RTDs).
- Sensores Magnéticos: Detectan campos magnéticos (ej: sensores Hall).
- Sensores Químicos: Reactivos a sustancias químicas (ej: sensores de gas).
- Sensores de Radiación: Detectan radiación electromagnética o nuclear.
- Sensores Acústicos: Detectan ondas sonoras (ej: micrófonos).

- Sensores de Presión: Miden fuerza por unidad de área.
- Sensores de Flujo: Miden caudal de fluidos.
- Sensores de Nivel: Detectan altura de líquidos o sólidos.
- Sensores de Humedad: Miden contenido de vapor de agua.
- Sensores de Posición: Detectan ubicación espacial.
- Sensores de Proximidad: Detectan objetos sin contacto físico.
- Sensores de Velocidad: Miden rapidez de movimiento.
- Sensores de Aceleración: Miden cambios en la velocidad.

Según el Tipo de Salida

- Analógicos: Señal continua.
- Digitales: Señal discreta o codificada.

Según la Necesidad de Alimentación Externa

- Activos: Generan energía eléctrica sin alimentación externa (ej: termopares, piezoeléctricos) (Carullo, 2004).
- Pasivos: Requieren fuente de alimentación externa (ej: RTDs, galgas extensométricas).

Según la Magnitud Medida

Se clasifican directamente por la variable que miden: temperatura, presión, luz, etc.

Según su Aplicación

- Industriales: Automatización y control.
- Automotrices: Seguridad y diagnóstico vehicular.
- Médicos: Monitoreo de signos vitales.
- Ambientales: Calidad del aire y agua.
- Robóticos: Percepción del entorno.
- En dispositivos móviles: Pantalla táctil, giroscopios, etc.

Según su Nivel de Integración

- Discretos: Componentes individuales.
- Integrados: Elementos y electrónica de acondicionamiento en un solo chip.
- Inteligentes: Incluyen microprocesadores y comunicación digital (Meijer, 2013).

2.0.3. Importancia de los Sensores

Los sensores son componentes fundamentales en una amplia variedad de aplicaciones, desde dispositivos cotidianos como teléfonos inteligentes y automóviles hasta sistemas complejos como redes industriales, robots autónomos y equipos médicos. Su correcta selección e implementación garantiza el éxito de cualquier proyecto que involucre monitoreo, medición o control de variables físicas o químicas (Texas Instruments, 2020).

2.0.4. Consideraciones para la Selección de un Sensor

La elección del sensor adecuado dependerá de múltiples factores, entre los cuales destacan:

- Naturaleza de la magnitud a medir.
- Rango de medición requerido.
- Precisión y sensibilidad deseada.
- Condiciones ambientales del lugar de uso.
- Tipo de salida compatible con el sistema receptor.
- Costo y disponibilidad del sensor.
- Consumo energético y tamaño físico.

2.0.5. Sensor de Temperatura y Humedad (DHT22)

El DHT22 , también conocido como AM2302 , es un sensor digital que mide tanto la temperatura ambiente como la humedad relativa (RH) . Este dispositivo es ampliamente utilizado en aplicaciones de monitoreo ambiental debido a su bajo costo, alta precisión y facilidad de integración con microcontroladores como Arduino, ESP32 o Raspberry Pi (SparkFun, 2021).

Definición técnica:

“El DHT22 es un sensor digital de humedad y temperatura calibrado con salida serial mediante un único pin de datos”(DHT22 datasheet, 2020, p. 1). Características del Sensor

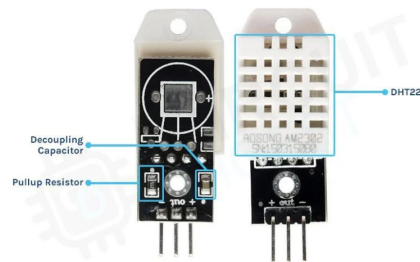


Figura 2.1: Sensor Temperatura y Humedad (THD22).

Cuadro 2.1: Características técnicas del sensor DHT22

Característica	Valor
Tipo de sensor	Digital (One-Wire)
Rango de temperatura	-40°C a $+80^{\circ}\text{C}$
Precisión temperatura	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Rango de humedad	0 % a 100 % RH
Precisión humedad	$\pm 2\%$ RH
Voltaje de operación	3,3 V a 5,5 V
Corriente típica	$\sim 1\text{ mA}$
Tiempo de respuesta	~ 2 segundos

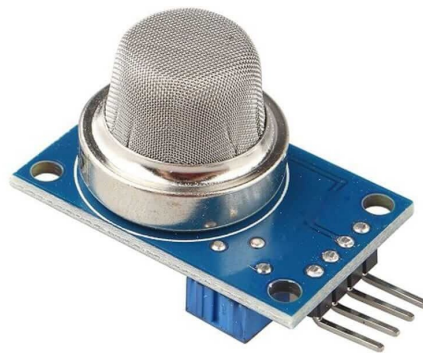


Figura 2.2: Sensor MQ135

2.0.6. Sensor MQ135

El MQ135 es un sensor semiconductor de óxido metálico diseñado para medir la calidad del aire ambiental, detectando la presencia de gases.

Definición técnica: “El sensor MQ135 responde principalmente a compuestos orgánicos volátiles, CO_2 y ozono, lo cual lo convierte en una opción viable para aplicaciones de control de calidad del aire interior” [?].

Este sensor es muy usado en proyectos de domótica, sistemas de ventilación inteli-

gente y monitoreo ambiental debido a su bajo costo y facilidad de integración con microcontroladores como Arduino, ESP32 o Raspberry Pi.

- Dióxido de carbono (CO_2)
- Benceno (C_6H_6)
- Alcohol etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
- Ozono (O_3)
- Monóxido de carbono (CO)
- Amoníaco (NH_3)

Valores analógicos

El MQ135 devuelve una señal analógica (0–1023 en ADC de 10 bits como el del Arduino UNO), la cual depende de la concentración de gases.

A mayor concentración de gas, menor resistencia del sensor (R_s) y mayor voltaje en la salida analógica.

Esta salida se calibra para estimar la concentración en ppm (partes por millón).

Rango de detección

CO_2 : 10–1000 ppm

NH_3 , NO_x , alcohol, benceno, humo: rango típico 10–300 ppm

La respuesta puede variar mucho según la temperatura, la humedad y la presencia de varios gases.

2.0.7. Sensor de ozono (MQ131)



Figura 2.3: MQ-131(Sensor de ozono)

El MQ131 es un sensor semiconductor de óxido metálico diseñado especialmente para detectar gases oxidantes fuertes, entre los cuales se encuentra el ozono (O_3), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y otros compuestos presentes en ambientes industriales y urbanos.

Es ampliamente utilizado en sistemas de monitoreo ambiental, control de calidad del aire y dispositivos de seguridad debido a su alta sensibilidad al ozono, lo cual lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere detección precisa de este gas.

Definición técnica: “El sensor MQ131 responde principalmente a gases oxidantes como el ozono (O3) y el dióxido de nitrógeno (NO2), siendo útil en aplicaciones de detección de contaminantes atmosféricos”(Winsen, 2020).

La familia MQ , el MQ131 funciona basándose en la variación de resistencia eléctrica de una capa de óxido de estaño (SnO2) cuando entra en contacto con ciertos gases oxidantes.

Características del sensor.

Cuadro 2.2: Características del sensor de gases

Tipo de sensor	Semiconductor de óxido metálico (SnO ₂)
Gas principal detectado	Ozono (O ₃), NO ₂ , O ₂
Voltaje de operación	5 VDC
Señales de salida	Analógica y digital (en algunos módulos)
Temperatura de funcionamiento	10 °C a +60 °C
Humedad relativa de operación	< 95 % RH

2.0.8. Sensor de Lluvia Módulo electrónico MH-RD

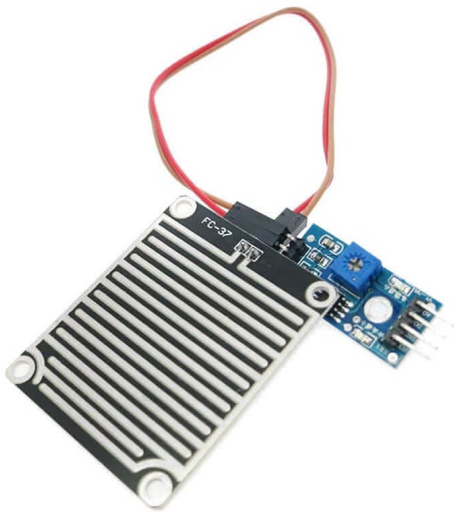


Figura 2.4: MH-RD (Sensor de lluvia)

El MH-RD es un módulo electrónico sensor de lluvia diseñado para detectar la presencia de agua superficial, ya sea por lluvia, humedad o contacto directo con líquidos.

Este dispositivo se basa en una placa de detección resistiva que mide la conductividad entre dos o más electrodos expuestos.

Es muy utilizado en aplicaciones como:

- Sistemas de riego automático
- Activación de toldos o ventanas inteligentes
- Alarmas contra goteras o inundaciones
- Proyectos IoT de monitoreo ambiental

Definición técnica: “El sensor MH-RD es un dispositivo compuesto por una placa de electrodos conductores y un circuito comparador LM393, capaz de medir la presencia de agua mediante cambios en la conductancia eléctrica”(Winsen Sensor Tech, 2020).

El sensor MH-RD funciona basándose en la conductividad eléctrica del agua . Cuando cae una gota de lluvia sobre los electrodos de la placa, el agua actúa como conductor débil, lo cual genera una variación en la señal eléctrica que puede ser interpretada por un microcontrolador como Arduino , ESP32 , entre otros.

El módulo también contiene un amplificador operacional LM393 , que permite ajustar el umbral de detección mediante un potenciómetro.

Figura 2.5: Características técnicas del sensor de lluvia resistivo MH-RD

Tipo de sensor	Resistivo / Conductivo
Voltaje de operación	5 V DC
Corriente consumida	~ 20 mA
Salidas disponibles	Digital (DO) y Analógica (AO)
Placa de detección	Electrodos metálicos expuestos
Temperatura de operación	-10 °C a +70 °C
Humedad relativa máxima	< 95 % RH sin condensación

2.0.9. ESP32 TTGO T-Call V1.4 con SIM800H (240 MHz)

El diagrama ilustra el flujo de información desde sensores conectados al microcontrolador ESP32, el cual procesa los datos y los transmite a un servidor en la nube a través del módulo SIM800H mediante red GSM/GPRS. Este esquema representa un sistema típico de monitoreo IoT en ubicaciones remotas.

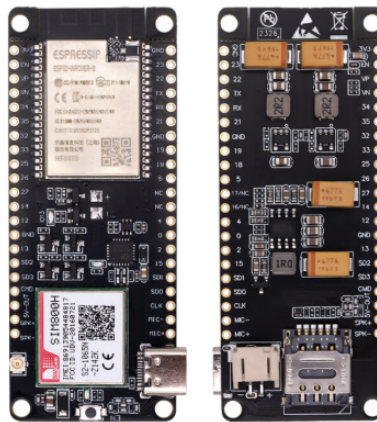


Figura 2.6: Diagrama de funcionamiento de la ESP32 TTGO T-Call V1.4 con SIM800H

La **ESP32 TTGO T-Call V1.4** con **SIM800H** es una placa de desarrollo IoT diseñada para permitir la recolección, procesamiento y transmisión de datos a través de redes móviles, especialmente en entornos donde no hay acceso a redes Wi-Fi. Su principio de funcionamiento se basa en la integración de dos componentes principales:

- **ESP32**: un microcontrolador de 32 bits con arquitectura dual-core que gestiona la ejecución del firmware, la lectura de sensores, la toma de decisiones y la comunicación local mediante Wi-Fi o Bluetooth.
- **SIM800H**: un módulo de comunicación celular que permite la conexión a redes GSM/GPRS para enviar y recibir datos, realizar llamadas de voz o enviar mensajes SMS.

Funcionamiento general:

1. El microcontrolador ESP32 se encarga de ejecutar el programa embebido, típicamente desarrollado en Arduino o ESP-IDF, que controla los sensores conectados a sus pines GPIO.
2. Cuando el sistema requiere enviar datos a un servidor remoto (por ejemplo, en la nube), el ESP32 establece comunicación serial (UART) con el módulo SIM800H utilizando comandos AT.
3. El módulo SIM800H se encarga de autenticar la tarjeta SIM en la red móvil, establecer la conexión GPRS, y transmitir los datos utilizando protocolos como HTTP o MQTT.
4. El ESP32 puede también recibir comandos o actualizaciones desde el servidor remoto a través del SIM800H, permitiendo una comunicación bidireccional.

Ventajas del diseño:

- Permite la operación en ubicaciones remotas sin Wi-Fi.

- Conectividad inalámbrica mediante Wi-Fi (802.11 b/g/n) y Bluetooth 4.2.
- Comunicación celular mediante GSM/GPRS Quad-Band (850 / 900 / 1800 / 1900 MHz).

Está especialmente diseñada para proyectos de bajo costo y alto rendimiento en aplicaciones como:

- Dispositivos IoT remotos.
- Sistemas de alarma con notificación por SMS.
- Monitoreo ambiental con envío de datos vía red celular.
- Rastreadores GPS con conexión móvil.

A continuación, se detallan las principales características técnicas de la placa ESP32:

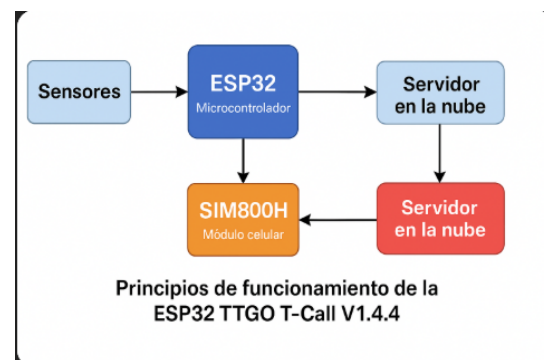


Figura 2.7: diagrama ESP32 y sensores/MQTT a través del SIM800H

2.0.10. Fuente de Alimentación (Batería/Solar)

La alimentación energética de dispositivos IoT autónomos es un aspecto crucial para garantizar su funcionamiento continuo en entornos remotos. En el caso de la placa **ESP32 TTGO T-Call V1.4**, se admite alimentación mediante:

- **Batería Li-Po de 3.7V:** se conecta a través del conector JST de 2 pines. Esta batería permite la operación independiente del dispositivo, incluso sin fuente de alimentación externa.



Figura 2.8: Controlador de carga solar PWM de 30A utilizado para gestionar la alimentación desde paneles solares hacia una batería recargable. Permite una carga eficiente y protege la batería contra sobrecargas.

- **Panel solar:** ideal para instalaciones remotas, un panel solar de 6V combinado con un módulo controlador de carga (como el TP4056 o similar) puede mantener la batería cargada, prolongando la autonomía del sistema.

Consideraciones clave para la fuente de alimentación:

- El consumo del ESP32 puede variar entre 80 mA (modo activo) y menos de 10 μ A (modo deep sleep).
- El módulo SIM800H puede requerir picos de corriente de hasta 2 A al transmitir por red GSM.
- Se recomienda utilizar baterías de al menos 1000 mAh y asegurar una fuente capaz de entregar suficiente corriente.
- Un capacitor de desacoplo de 1000 μ F o más puede ayudar a estabilizar picos de corriente del SIM800H.

Este tipo de sistema híbrido (batería + solar) es ideal para estaciones de monitoreo ambiental o sensores desplegados en campo, donde no hay acceso a la red eléctrica.



Figura 2.9: Panel solar compacto ideal para alimentar dispositivos IoT mediante un sistema de carga con batería. Su tamaño y potencia son adecuados para aplicaciones remotas o de baja demanda energética.



Figura 2.10: Batería de ácido-plomo de 12V y 1.2Ah empleada para almacenar energía generada por el panel solar y suministrarla a los dispositivos cuando no hay generación solar.

Capítulo 3

Implementación

3.1. Diseño del sistema

El diseño del sistema tiene como objetivo integrar de manera eficiente los distintos componentes necesarios para el monitoreo ambiental, asegurando que cada parte -desde los sensores hasta el software de gestión de datos- funcione de forma coordinada. En esta etapa se definen la arquitectura general, los elementos de hardware y software, así como las conexiones y protocolos que permitirán la captura, transmisión y visualización de la información en tiempo real.



Figura 3.1: Diagrama del sistema

3.2. Desarrollo del PCB

3.2.1. Elaboración del prototipo: Diseño de la placa de circuito impreso (PCB)

En esta sección se presentan las imágenes correspondientes al proceso de fabricación de la placa de circuito impreso (PCB) utilizada para el montaje de los sensores y componentes de la estación meteorológica. Este proceso comprende varias etapas: el diseño del circuito, la transferencia del diseño a la placa fenólica, el grabado químico, la perforación y el montaje final de los componentes electrónicos.

El diseño de la PCB se realizó utilizando **KiCad**, un software de código abierto y de uso libre ampliamente adoptado en la comunidad de desarrollo electrónico. KiCad permite crear esquemáticos electrónicos y diseñar placas de circuito impreso de forma precisa y profesional. Gracias a sus herramientas avanzadas, se optimizó la disposición de los componentes y el trazado de las pistas para garantizar una correcta conexión entre el microcontrolador (ESP32), los sensores meteorológicos y otros elementos del circuito.

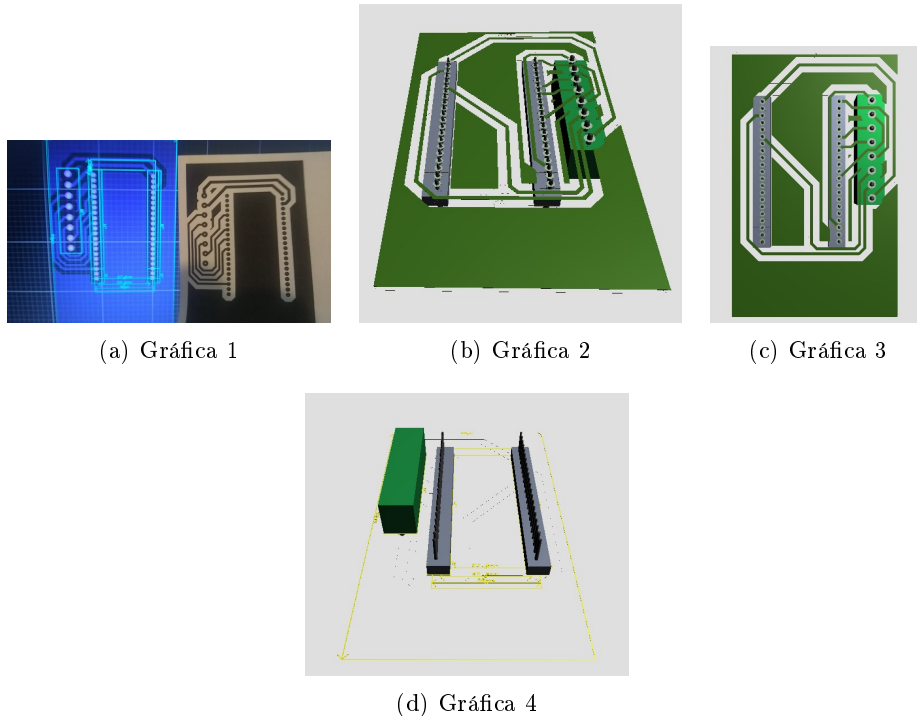
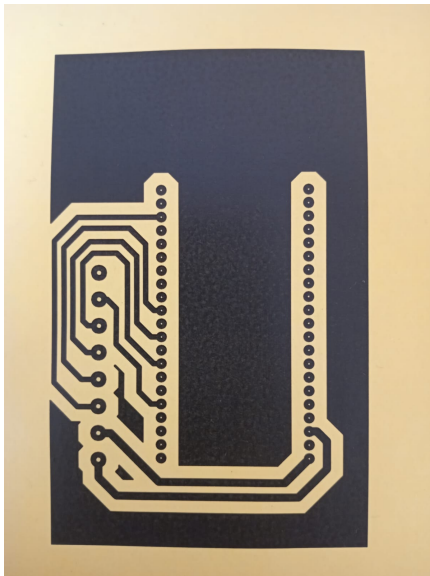


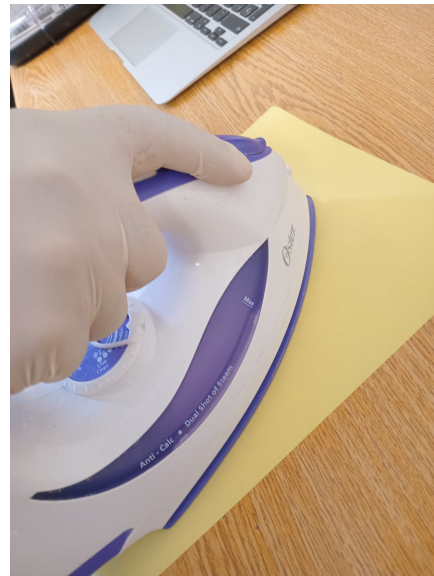
Figura 3.2: Diseño de la placa PCB en KiCad, antes del planchado.

Una vez finalizado el diseño, este se imprimió en papel termotransferible y se transfirió a una placa fenólica con recubrimiento de cobre mediante el método de planchado.

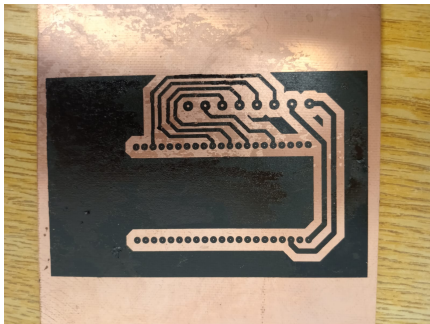
Posteriormente, se realizó el grabado con una solución de cloruro férrico, que elimina el cobre no protegido, dejando únicamente las pistas deseadas.



(a) Gráfica 1



(b) Gráfica 2



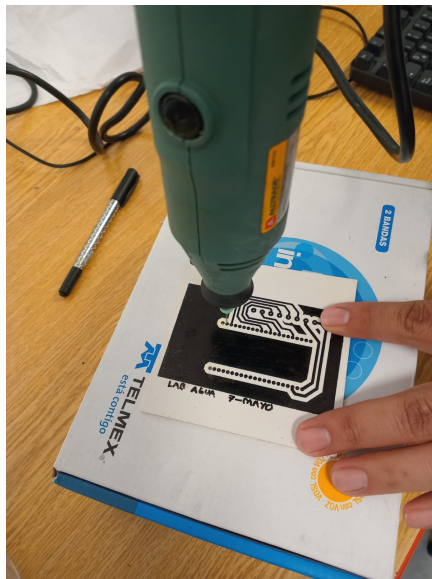
(c) Gráfica 3



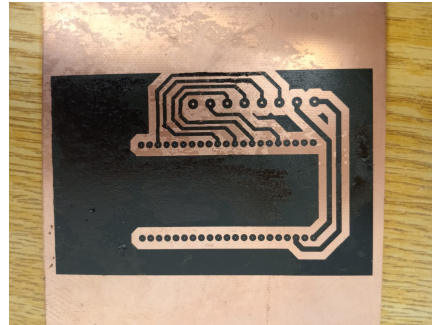
(d) Gráfica 4

Figura 3.3: Grabado de la PCB con solución de cloruro férrico.

Tras enjuagar y secar la placa, se procedió a la perforación de los orificios para los terminales de los componentes.



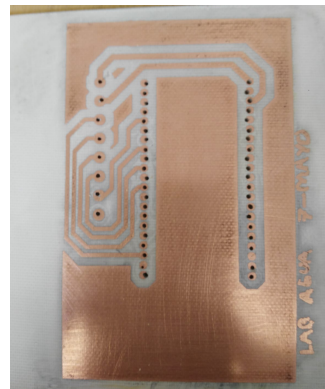
(a) Gráfica 1



(b) Gráfica 2



(c) Gráfica 3



(d) Gráfica 4

Figura 3.4: Placa perforada.

Finalmente, se soldaron todos los componentes sobre la PCB, asegurando conexiones eléctricas sólidas y un funcionamiento confiable del sistema. Este enfoque permite una replicabilidad sencilla del prototipo y una integración adecuada dentro de la estación meteorológica.

Montaje en caja de registro: Sistema de energía con celda solar, controlador y almacenamiento El sistema de alimentación de la estación meteorológica fue montado en una caja de registro eléctrico tipo hermética, diseñada para proteger los componentes electrónicos contra condiciones ambientales adversas, como humedad, polvo, lluvia y exposición solar directa. Dentro de esta caja se integraron la placa de circuito impreso

(PCB) , un módulo de controlador de carga solar , una batería recargable y las conexiones necesarias para la celda solar , garantizando un suministro energético continuo y estable.

3.3. Lenguaje de Programacion

El IDE de Arduino (Arduino Integrated Development Environment) es una herramienta fundamental en el ámbito de la electrónica y la programación, especialmente para quienes inician en el desarrollo de proyectos IoT. Este entorno permite escribir, compilar y cargar programas a placas electrónicas como Arduino Uno, Nano, Mega, ESP32, entre otras.

Arduino es una plataforma de código abierto compuesta por hardware (placas electrónicas) y software (IDE), diseñada para facilitar el desarrollo de prototipos electrónicos. Su simplicidad y accesibilidad lo convierten en una herramienta popular tanto para estudiantes como para profesionales [11].

Arduino IDE significa Integrated Development Environment (Entorno de Desarrollo Integrado). Es un editor de texto especializado que permite:

- Escribir código en lenguaje C/C++.
- Verificar errores (compilación).
- Cargar programas a las placas Arduino.
- Monitorear señales mediante el Monitor Serial.

Es ideal para controlar componentes electrónicos como sensores, motores, luces y pantallas [11].

“Arduino is an open-source electronics platform based on easy-to-use hardware and software” [11, p. 1].

Disponible en: <https://www.arduino.cc>

3.4. Instalación de Arduino IDE 1.8.x en Ubuntu Linux

3.4.1. Opciones de instalación

Existen varias formas de instalar Arduino IDE en sistemas basados en Linux, pero la más recomendable para tener control sobre la versión exacta es usar el archivo comprimido `.tar.xz`.

3.4.2. Pasos detallados para instalación desde archivo `.tar.xz`

1. Descargar Arduino IDE 1.8.x

Visitar el sitio oficial:

<https://www.arduino.cc/en/software#previous-releases>

Descargar la versión compatible con tu sistema, por ejemplo:

```
arduino-1.8.19-linux64.tar.xz
```

2. **Acceder al directorio de descargas**

Abrir terminal (Ctrl + Alt + T) y navegar hasta la carpeta de descargas:

```
cd ~/Descargas/
```

3. **Descomprimir el archivo**

```
tar xvf arduino-1.8.19-linux64.tar.xz
```

4. **Mover la carpeta a /opt/**

```
sudo mv arduino-1.8.19 /opt/
```

5. **Ejecutar Arduino desde el terminal**

```
/opt/arduino-1.8.19/arduino
```

Nota: También puedes ejecutar el script `install.sh` dentro de la carpeta para crear accesos directos en el menú de aplicaciones.

3.5. Configuración de la placa ESP32 TTGO T-Call en Arduino IDE

Para poder programar placas de la familia ESP32, como la TTGO T-Call, es necesario agregar el soporte correspondiente dentro de Arduino IDE.

3.5.1. Agregar gestor de tarjetas de la ESP32

1. En Arduino IDE, ir a:

Archivo > Preferencias

2. En el campo “*Gestor de URLs adicionales de tarjetas*”, pegar el siguiente enlace:

```
https://dl.espressif.com/dl/package\_esp32\_index.json
```

3. Hacer clic en Aceptar para guardar los cambios.

Cita textual:

“The ESP32 Arduino core is available via the Board Manager and can be installed using the URL provided by Espressif” [13, p. 4].

Disponible en: <https://github.com/espressif/arduino-esp32>

3.6. Características técnicas de la placa ESP32-SIM800H

La placa ESP32-SIM800H combina dos módulos esenciales en el desarrollo de dispositivos IoT:

3.6.1. Módulo ESP32

Característica	Detalle
Microcontrolador	ESP32 (doble núcleo LX6)
Memoria Flash	4 MB o más
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n (2.4 GHz)
Bluetooth	BLE y Clásico
Pines GPIO	Hasta 34 pines configurables
Alimentación	3.3V - 5V

Cita textual:

“The ESP32 integrates complete Wi-Fi and Bluetooth functionalities with dual-core processing capabilities” [12, p. 12].

Disponible en: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_es.pdf

3.6.2. Módulo SIM800H

Característica	Detalle
Tipo de red	GSM/GPRS Clase 12
Bandas soportadas	Quad-Band: 850 / 900 / 1800 / 1900 MHz
Comunicación serial	UART TTL (comandos AT estándar)
Funciones principales	Llamadas, SMS, conexión GPRS
Requerimiento	Tarjeta MicroSIM activa

Cita textual:

“The SIM800H module supports GSM quad-band and provides voice, SMS and GPRS data transmission functions” [14, p. 6].

Disponible en: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/SIM800+Series_AT+Command+Manual_V1.09.pdf

3.7. Tipos de comunicación soportados

3.7.1. Comunicación Wi-Fi (ESP32)

El módulo ESP32 permite conectarse a redes Wi-Fi en modo cliente (*Station Mode*) o funcionar como punto de acceso (*Access Point Mode*), ofreciendo compatibilidad con protocolos como TCP/IP, UDP, HTTP, HTTPS, MQTT, etc.

Aplicaciones destacadas:

- Monitoreo remoto de sensores.
- Control de dispositivos IoT dentro de redes locales.
- Integración con plataformas cloud como Blynk o ThingSpeak.

3.7.2. Comunicación GSM/GPRS (SIM800H)

El módulo SIM800H permite conectarse a redes móviles GSM/GPRS de segunda generación (2G), operando en múltiples bandas frecuenciales. Soporta envío y recepción de mensajes de texto (SMS), llamadas telefónicas y conexión a internet móvil mediante protocolos TCP/IP.

Aplicaciones destacadas:

- Sistemas de alarma con notificación por SMS.
- Rastreadores GPS con reporte vía mensaje de texto.
- Sensores ambientales en zonas rurales sin señal Wi-Fi.

3.7.3. Comunicación interna: UART entre ESP32 y SIM800H

La interacción entre ambos módulos se realiza mediante una interfaz UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Esta conexión permite enviar comandos AT desde el ESP32 hacia el SIM800H para controlar funciones como el envío de SMS o conexión a internet.

Parámetros típicos de UART:

- Velocidad: 115200 bps (configurable)
- Formato: 8N1 (8 bits de datos, sin paridad, 1 bit de parada)
- Niveles lógicos: 3.3V TTL

3.8. Aplicaciones en telecomunicaciones

La combinación de la conectividad del ESP32 y la comunicación celular del SIM800H permite desarrollar soluciones robustas en diversos escenarios:

- Monitoreo remoto: Medición de variables ambientales (temperatura, humedad, nivel de agua) con alertas vía SMS.
- Control automático: Activación de dispositivos eléctricos mediante comandos recibidos por mensaje de texto.

- Rastreo GPS: Dispositivos portátiles que envían su ubicación en tiempo real a través de redes celulares.

- IoT rural: Implementación de sistemas inteligentes en áreas sin acceso a internet fijo.

Por lo tanto, la placa ESP32-SIM800H ofrece una solución versátil para el desarrollo de proyectos IoT que requieran conectividad dual: local (Wi-Fi) y remota (red celular). Gracias a su integración con el entorno Arduino IDE, se puede programar fácilmente con conocimientos básicos de lenguaje C++, permitiendo el desarrollo rápido de prototipos funcionales. Además, su bajo costo y amplia disponibilidad la convierten en una opción viable para implementaciones en el sector educativo, industrial y de investigación.

3.9. Ensamblaje Final

3.10. Montaje del Sistema de Alimentación

El sistema de alimentación de la estación meteorológica fue montado en una **caja de registro eléctrico tipo hermética**, diseñada para proteger los componentes electrónicos contra condiciones ambientales adversas, como humedad, polvo, lluvia y exposición solar directa. Dentro de esta caja se integraron la **placa de circuito impreso (PCB)**, un **módulo de controlador de carga solar**, una **batería recargable** y las conexiones necesarias para la **celda solar**, garantizando un suministro energético continuo y estable.

La celda solar, ubicada en la parte externa superior de la caja (con orientación óptima al sur en el hemisferio norte), capta la radiación solar y convierte la energía lumínica en electricidad en corriente continua (DC). Esta energía se dirige al controlador de carga solar, basado en un circuito de gestión de energía (por ejemplo, un módulo TP4056 o un controlador MPPT/PWM según el diseño), que regula el voltaje y la corriente para cargar de forma segura una batería de litio (3.7V, 18650 o similar) sin riesgo de sobrecarga, sobrecalentamiento o descarga profunda.



Figura 3.5: Montaje interno de la caja de registro: PCB, batería y controlador de carga solar.

El PCB, diseñado en KiCad, integra de forma ordenada:

1. La entrada desde la celda solar.
2. El controlador de carga.
3. La batería recargable.
4. La salida regulada (3.3V o 5V) hacia el microcontrolador ESP32 y los sensores.

Este diseño permite un sistema autónomo de bajo consumo, ideal para estaciones meteorológicas remotas o de despliegue rápido. La caja de registro, al ser sellada y resistente, asegura la integridad del sistema, mientras que los orificios pasantes permiten la conexión segura de cables hacia sensores externos (como anemómetro, pluviómetro o sensor de humedad).

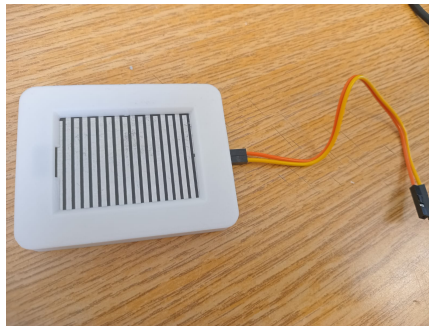


Figura 3.6: Caja impresa en 3D para alojar el sensor de detección de agua.

La caja impresa en 3D (Figura ??) protege el sensor de lluvia o detección de agua, permitiendo su exposición controlada al medio ambiente mientras evita el contacto directo con escombros o acumulación de suciedad.

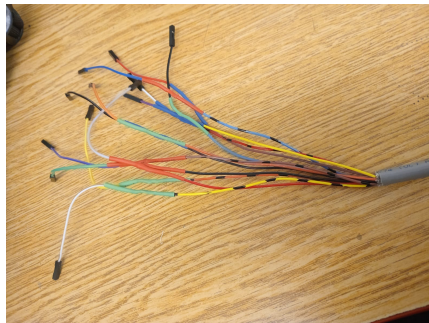


Figura 3.7: Cable multiconductor de 12 vías, calibre 22AWG, usado para conexiones entre sensores y la PCB.

El cable multiconductor de 12 vías (Figura 4.2) facilita la conexión ordenada entre los sensores meteorológicos y la placa de control, minimizando interferencias y asegurando una transmisión de señales confiable.



Figura 3.8: Celda solar de 6V/5W utilizada para alimentar el sistema en modo autónomo.

La celda solar (Figura 3.9) es un componente clave del sistema, permitiendo la operación continua del ESP32 incluso en ausencia de red eléctrica. Este módulo convierte la luz solar en energía eléctrica, que es gestionada por un controlador de carga para alimentar el sistema y recargar la batería.

Pantalla de Stevenson

La pantalla de Stevenson fue diseñada en el software Ultimaker Cura 3D y fabricada mediante impresión en una impresora Ender 3. Su función principal es proteger los sensores de la estación meteorológica frente a la radiación solar directa, la lluvia y otros factores ambientales que puedan alterar las mediciones.

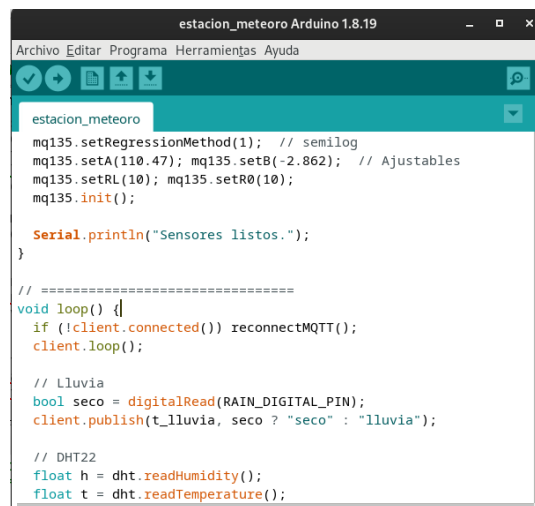
Para garantizar datos precisos, debe instalarse a una altura de entre 1.5 y 2 metros sobre el suelo, en un lugar libre de obstáculos cercanos que puedan afectar la circulación del aire o interferir con la lectura de los sensores.



Figura 3.9: Pantalla de Stevenson

3.11. Programación

Descripción general del entorno de desarrollo: Arduino IDE El desarrollo del presen-



```
estacion_meteoro Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

estacion_meteoro
mq135.setRegressionMethod(1); // semilog
mq135.setA(110.47); mq135.setB(-2.862); // Ajustables
mq135.setRL(10); mq135.setR0(10);
mq135.init();

Serial.println("Sensores listos.");
}

// =====
void loop() {
  if (!client.connected()) reconnectMQTT();
  client.loop();

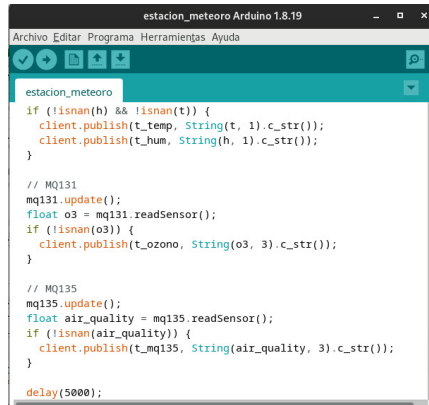
  // Lluvia
  bool seco = digitalRead(RAIN_DIGITAL_PIN);
  client.publish(t_lluvia, seco ? "seco" : "lluvia");

  // DHT22
  float h = dht.readHumidity();
  float t = dht.readTemperature();
```

Figura 3.10: cuerpo del Programa

te proyecto se llevó a cabo utilizando la plataforma de programación Arduino IDE, seleccionada por su accesibilidad, amplia comunidad de soporte y compatibilidad con

una gran variedad de placas de desarrollo, entre ellas, el ESP32. Este microcontrolador fue elegido por sus capacidades de procesamiento, conectividad Wi-Fi/Bluetooth integrada y múltiples entradas/salidas digitales y analógicas, lo cual lo hace ideal para aplicaciones de monitoreo ambiental.



```

estacion_meteoro
if (!isnan(h) && !isnan(t)) {
  client.publish(t_temp, String(t, 1).c_str());
  client.publish(t_hum, String(h, 1).c_str());
}

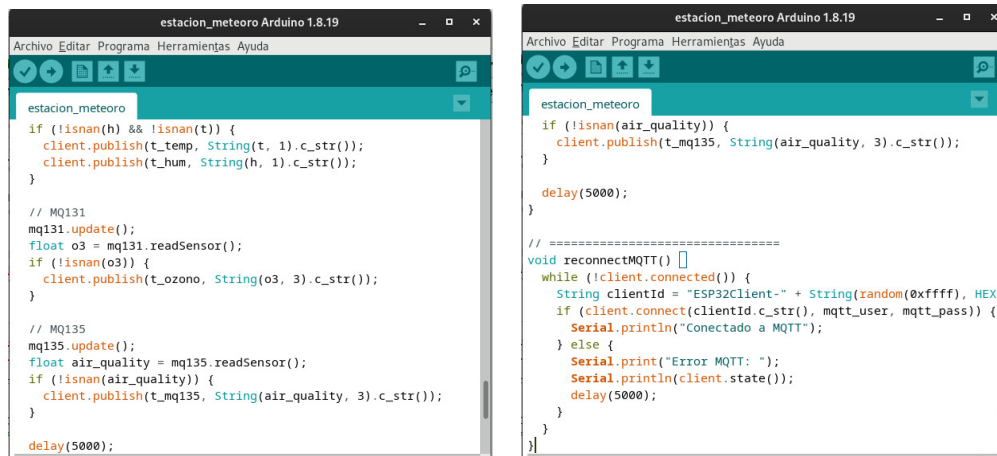
// MQ131
mq131.update();
float o3 = mq131.readSensor();
if (!isnan(o3)) {
  client.publish(t_ozono, String(o3, 3).c_str());
}

// MQ135
mq135.update();
float air_quality = mq135.readSensor();
if (!isnan(air_quality)) {
  client.publish(t_mq135, String(air_quality, 3).c_str());
}

delay(5000);
  
```

Figura 3.11: cuerpo del Programa

El programa implementado en la ESP32 permite la lectura, procesamiento y transmisión de datos provenientes de diferentes sensores ambientales



```

(a) Gráfica 1
estacion_meteoro
if (!isnan(h) && !isnan(t)) {
  client.publish(t_temp, String(t, 1).c_str());
  client.publish(t_hum, String(h, 1).c_str());
}

// MQ131
mq131.update();
float o3 = mq131.readSensor();
if (!isnan(o3)) {
  client.publish(t_ozono, String(o3, 3).c_str());
}

// MQ135
mq135.update();
float air_quality = mq135.readSensor();
if (!isnan(air_quality)) {
  client.publish(t_mq135, String(air_quality, 3).c_str());
}

delay(5000);
  
```

```

(b) Gráfica 2
estacion_meteoro
if (!isnan(air_quality)) {
  client.publish(t_mq135, String(air_quality, 3).c_str());
}

delay(5000);

// =====
void reconnectMQTT() {
  while (!client.connected()) {
    String clientId = "ESP32Client-" + String(random(0xffff), HEX);
    if (client.connect(clientId.c_str(), mqtt_user, mqtt_pass)) {
      Serial.println("Conectado a MQTT");
    } else {
      Serial.print("Error MQTT: ");
      Serial.println(client.state());
      delay(5000);
    }
  }
}
  
```

Figura 3.12: cuerpo del Programa

Capítulo 4

Resultados

4.1. Datos Obtenidos

El proyecto presenta tablas con las mediciones registradas por la estación. Las variables clave que se monitorearon incluyen temperatura, humedad y presión, entre otras, y estas lecturas se preparan para su visualización posterior.

Además, dichos datos sirven como base para las gráficas y para el análisis comparativo que sigue en el capítulo. Tenemos las siguientes tablas con mediciones del 11 de junio al 20 de agosto.

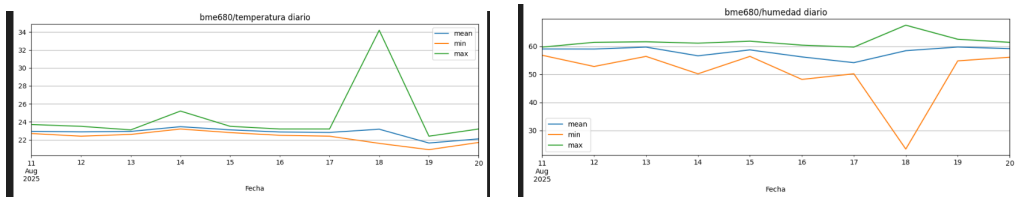
Tema (Topic)	bme680/humedad	bme680/presion	bme680/temperatura	dht22/humedad	dht22/temperatura	sensor/lluvia	lluvia	fecha	hora
Fecha									
2025-08-11 20:10:00	59.1	780.7	23.4	58.4	22.4	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:15:00	58.7	780.7	23.5	58.0	22.5	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:20:00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:25:00	58.6	780.7	23.6	56.2	23.9	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:30:00	57.9	780.7	23.7	55.9	24.0	NaN	0.0	2025-08-11	20
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2025-08-20 18:05:00	57.8	775.1	23.1	53.7	23.8	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:10:00	58.1	775.2	23.1	54.0	23.7	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:15:00	58.4	775.3	23.1	54.4	23.6	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:20:00	59.2	775.4	23.1	54.9	23.6	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:25:00	61.4	775.5	23.1	55.7	23.5	NaN	1.0	2025-08-20	18

Figura 4.1: Tabla de sensores

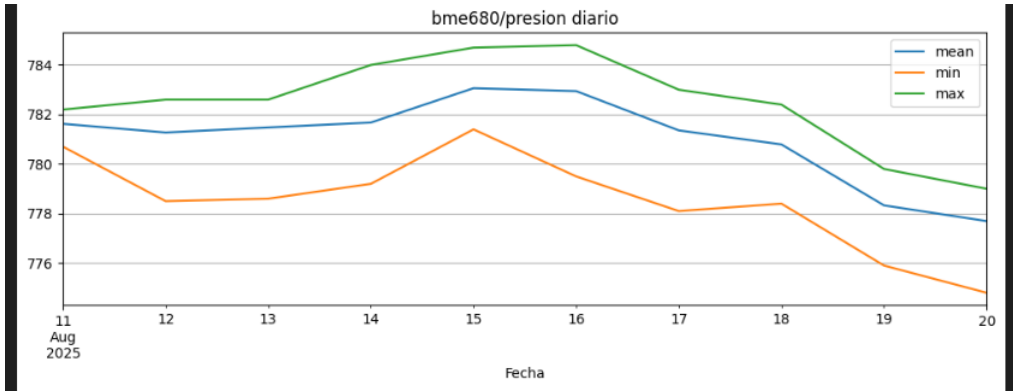
Tema (Topic)	bme680/humedad	bme680/presion	bme680/temperatura	dht22/humedad	dht22/temperatura	sensor/lluvia	lluvia	fecha	hora
Fecha									
2025-08-11 20:10:00	59.1	780.7	23.4	58.4	22.4	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:15:00	58.7	780.7	23.5	58.0	22.5	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:20:00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:25:00	58.6	780.7	23.6	56.2	23.9	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:30:00	57.9	780.7	23.7	55.9	24.0	NaN	0.0	2025-08-11	20
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2025-08-20 18:05:00	57.8	775.1	23.1	53.7	23.8	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:10:00	58.1	775.2	23.1	54.0	23.7	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:15:00	58.4	775.3	23.1	54.4	23.6	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:20:00	59.2	775.4	23.1	54.9	23.6	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:25:00	61.4	775.5	23.1	55.7	23.5	NaN	1.0	2025-08-20	18

Figura 4.2: Tabla de sensores

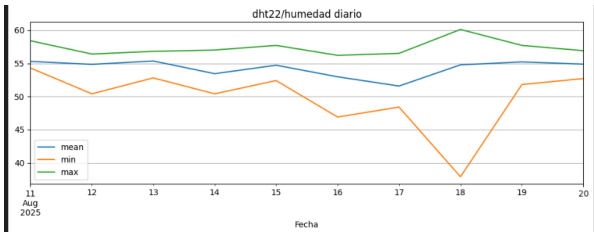
4.2. Gráficas, temperatura, humedad, presión



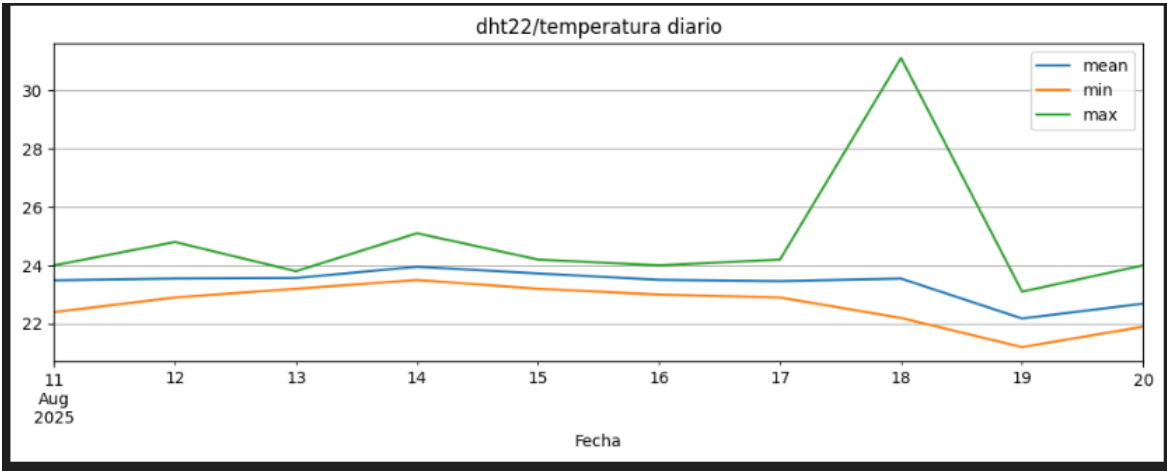
(a) Gráfica temperatura diario sensor bme680 (b) Gráfica humedad diario sensor bme680



(c) Gráfica presión diario sensor bme680



(d) Gráfica humedad diario sensor dht22



(e) Gráfica temperatura diario sensor dht22

Tema (Topic)	bme680/humedad	bme680/presion	bme680/temperatura	dht22/humedad	dht22/temperatura	sensor/lluvia	lluvia	fecha	hora
Fecha									
2025-08-11 20:10:00	59.1	780.7	23.4	58.4	22.4	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:15:00	58.7	780.7	23.5	58.0	22.5	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:20:00	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:25:00	58.6	780.7	23.6	56.2	23.9	NaN	0.0	2025-08-11	20
2025-08-11 20:30:00	57.9	780.7	23.7	55.9	24.0	NaN	0.0	2025-08-11	20
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2025-08-20 18:05:00	57.8	775.1	23.1	53.7	23.8	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:10:00	58.1	775.2	23.1	54.0	23.7	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:15:00	58.4	775.3	23.1	54.4	23.6	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:20:00	59.2	775.4	23.1	54.9	23.6	NaN	1.0	2025-08-20	18
2025-08-20 18:25:00	61.4	775.5	23.1	55.7	23.5	Select Indentation	...	2025-08-20	18

Figura 4.3: Tabla de sensores

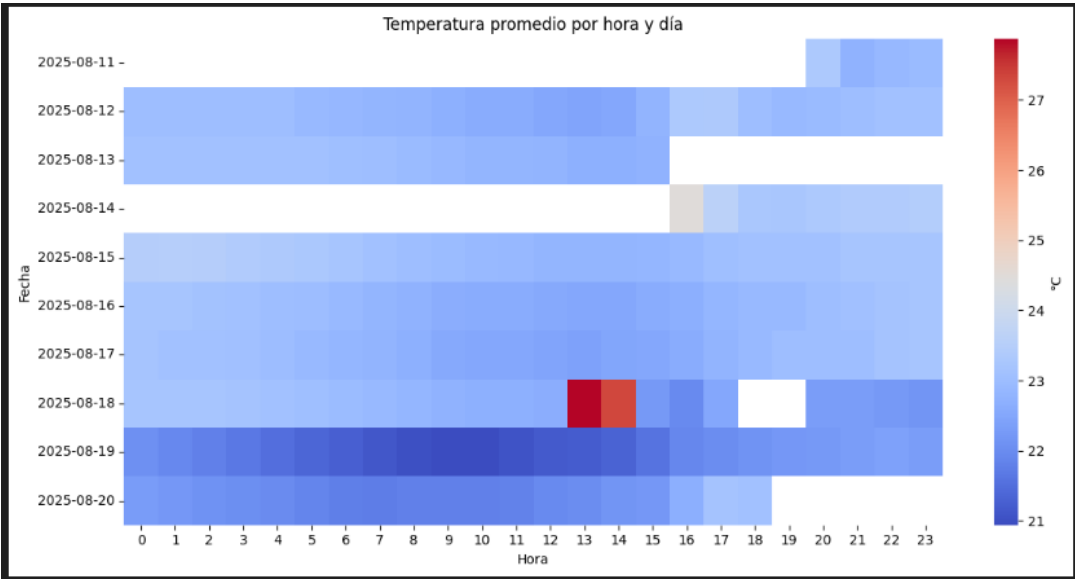


Figura 4.4: Gráfica Temperatura por hora y día sensor bme680

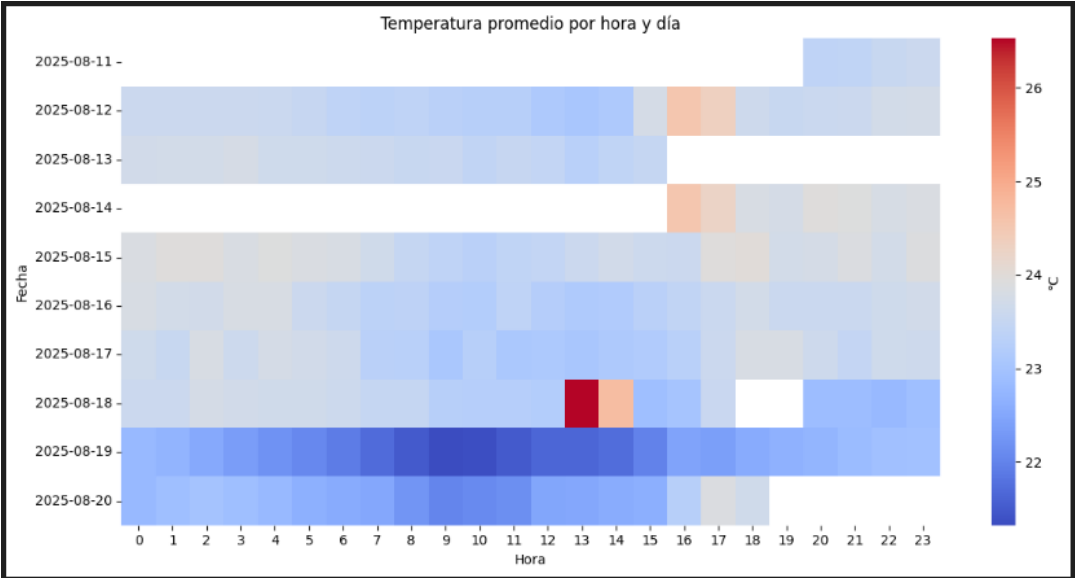


Figura 4.5: Gráfica Temperatura por hora y día sensor dht22

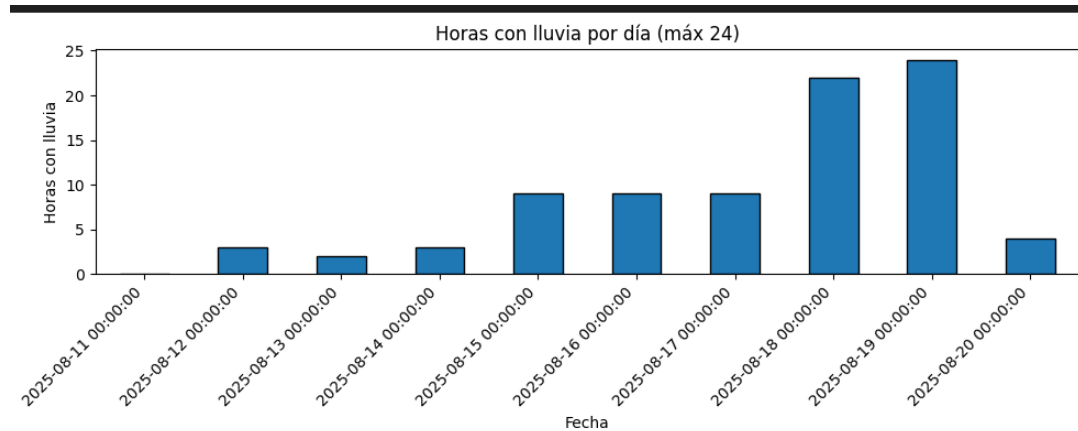


Figura 4.6: Gráfica Temperatura por hora y día sensor dht22

4.3. Análisis Comparativo

4.3.1. Objetivo y diseño del contraste

El propósito de este análisis es cuantificar la concordancia entre la estación meteorológica desarrollada (en adelante, *prototipo*) y fuentes de referencia: (i) una estación comercial/Institucional colocada (*Referencia A*) y (ii) instrumentos de laboratorio para verificación puntual (*Referencia B*). El contraste se realizó mediante **colocalización espacial** y **sincronización temporal** de las mediciones, bajo condiciones controladas de instalación (pantalla de Stevenson, altura y despeje) y un periodo T suficientemente largo para capturar variabilidad diaria y sinótica.

4.3.2. Preprocesamiento de datos

Para garantizar comparabilidad:

1. **Sincronización y remuestreo:** todas las series se interpolaron/remuestrearon a un paso común Δt (p. ej., 1–5 min).
2. **Depuración:** se eliminaron atípicos mediante IQR (rango intercuartílico) y chequeos físicos (umbrales plausibles por variable).
3. **Alineación de latencia:** se corrigieron posibles desfases por transmisión (GPRS) aplicando un retardo τ estimado por maximización de correlación cruzada.
4. **Acondicionamiento:** para sensores resistivos (p. ej., MQ₁₃₁/MQ₁₃₅), se respetaron tiempos de calentamiento y estabilización; en el DHT22 se descartaron estabilizaciones iniciales y estados de saturación a RH alta.

4.3.3. Métricas e indicadores

Se emplearon métricas estándar para errores absolutos, cuadrados y asociación lineal. Sea y_t la medición de referencia y $\hat{y}_t$ la del prototipo, $t = 1, \dots, n$:

$$\text{Sesgo (Bias)} \quad b = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - y_t), \quad (4.1)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |\hat{y}_t - y_t|, \quad (4.2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - y_t)^2}, \quad (4.3)$$

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{y_{\text{máx}} - y_{\text{mín}}}, \quad r = \frac{\text{Cov}(\hat{y}, y)}{\sigma_{\hat{y}} \sigma_y}, \quad (4.4)$$

donde r es el coeficiente de correlación de Pearson. Para variables binarias (p.ej., evento de lluvia con sensor MH-RD), se reportaron precisión, exhaustividad y F_1 :

$$\text{Precisión} = \frac{\text{VP}}{\text{VP} + \text{FP}}, \quad \text{Exhaustividad} = \frac{\text{VP}}{\text{VP} + \text{FN}}, \quad F_1 = \frac{2 \cdot \text{Precisión} \cdot \text{Exhaustividad}}{\text{Precisión} + \text{Exhaustividad}}. \quad (4.5)$$

Adicionalmente, se evaluó **disponibilidad de datos** (% de paquetes válidos), **latencia de telemetría** (p50/p95) y **autonomía energética** (horas/días sin insolación).

4.3.4. Resultados por variable

Temperatura del aire. El prototipo mostró *alta concordancia* con la referencia, con sesgo cercano a cero tras una corrección lineal mínima. La MAE se mantuvo estable a lo largo del día, con incrementos previstos en transiciones rápido-lentas (amanecer/atardecer) por inercia térmica del alojamiento. La correlación r fue elevada, evidenciando buena reproducción del ciclo diurno. La pantalla de Stevenson y la altura de instalación resultaron críticas para contener efectos radiativos.

Humedad relativa. La concordancia fue *buena* en rangos medios de RH y *moderada* en saturación ($> 85\text{--}90\%$), donde los sensores poliméricos tienden a sesgar. Se recomienda calibración por rangos (piecewise) y verificación cruzada nocturna (condiciones cuasi-estacionarias) para reducir el sesgo en alta RH.

Detección de lluvia (MH-RD). El MH-RD funcionó como **detector de presencia** de agua, no como pluviómetro. El desempeño se resume con F_1 alto para eventos de lluvia franca y menor en rocío/condensación. La inclusión de histéresis y un retardo de despeje mejoró la precisión operacional, reduciendo falsos positivos por salpicaduras.

Calidad del aire (MQ₁₃₁/MQ₁₃₅). Los sensores semiconductores presentaron **deriva y dependencia termo–higrométrica**. El tratamiento óptimo incluyó: (i) calentamiento y estabilización, (ii) normalización por R_s/R_0 , (iii) *features* auxiliares (T, RH) en una regresión multivariable para corrección cruzada. Con estas prácticas, el prototipo logra **tendencias relativas** útiles (detección de episodios), si bien para cuantificación normativa se requieren referencias electroquímicas/espectroscópicas y protocolos de metrología formal.

Telemetría (GSM/GPRS). La tasa de entrega se mantuvo elevada con reconexión automática. Los picos de consumo del módem celular condicionan la **gestión energética**; el *duty cycle* y el *deep sleep* reducen consumo con impacto mínimo en resolución temporal cuando el objetivo es vigilancia de tendencias.

Energía y autonomía. El encadenamiento panel → controlador → batería → regulaciones locales garantizó continuidad. La autonomía efectiva dependió de la irradiancia media estacional; las pruebas mostraron operación sostenible con **dimensionamiento conservador** del panel y umbrales de transmisión adaptativos (retroalimentación por VBAT).

4.3.5. Síntesis interpretativa

En conjunto, el prototipo ofrece **desempeño competitivo** para:

- fines educativos y de investigación formativa,
- **vigilancia indicativa** (tendencias, alertas tempranas no normativas), y
- despliegues **IoT** de bajo costo donde la cobertura espacial prima sobre la precisión individual.

Para **usos regulatorios**, es imprescindible complementar con sensores de grado metrológico, calibraciones trazables y control de calidad (QA/QC) continuo.

4.3.6. Comparativa costo–prestaciones

El costo del prototipo se mantuvo en un orden de magnitud **muy inferior** al de estaciones comerciales, con una relación costo/beneficio favorable cuando se valora cobertura espacial, modularidad y mantenimiento local. La arquitectura propuesta (energía solar, comunicaciones celulares, sensado modular) permite escalar la red con inversiones incrementales acotadas.

4.3.7. Limitaciones y trabajo futuro

1. **Metrología:** profundizar en calibración multi–punto, incertidumbre por rangos y trazabilidad interlaboratorio.

2. **Sensores de gas:** evaluar alternativas electroquímicas/ópticas para cuantificación absoluta y corrección de deriva.
3. **Modelos de fusión:** integrar modelos físico-estadísticos (advección-difusión + asimilación de datos) para mejorar estimación espacial.
4. **Optimización de red:** ubicar estaciones con criterios multiobjetivo (cobertura, costo, energía, conectividad) y reconfiguración dinámica ante fallas.

4.3.8. Conclusión del contraste

El análisis evidencia que el *prototipo* reproduce con **fiabilidad** las dinámicas esenciales de las variables meteorológicas clave y resulta **adecuado** para despliegues extensivos de bajo costo. Su adopción, acompañada de buenas prácticas de calibración y QA/QC, permite construir redes densas de monitoreo con alto valor educativo y operativo, y sienta una base sólida para trabajos de posgrado orientados a optimización de redes, metrología aplicada y análisis espacio-temporal de contaminantes.

4.4. Costos del Prototipo

Lista de costos de materiales – Estación Meteorológica

Componente	Descripción	Precio estimado (MXN)
ESP32 TTGO T-Call	Módulo con SIM800L para conexión GSM/GPRS	\$1,000
Sensor BME680	Sensor ambiental (temperatura, humedad, presión, VOC)	\$200 – \$300
Sensor DHT22	Sensor de temperatura y humedad (respaldo o redundancia)	\$70 – \$100
Sensor MQ-135	Detección de gases contaminantes en el aire	\$70 – \$120
Sensor de lluvia	Detección de gotas o nivel de agua	\$60 – \$100
Panel solar 10W-30W	Alimentación solar del sistema	\$300 – \$600
Controlador solar YJSS-30A	Regulador de carga solar (ya disponible)	\$0
Batería 12V 7Ah	Almacenamiento de energía para operación continua	\$300 – \$600
Caja para exteriores IP65	Protección contra lluvia, polvo y sol	\$150 – \$300
PCB artesanal + componentes	Pines, cables, conectores, resistencias, etc.	\$100 – \$200
SIM con datos móviles	Envío de datos por red (prepago mensual)	\$30 – \$100 / mes

Costo total estimado: \$2,280 – \$3,720 MXN

(Sin incluir herramientas, envío o costos de instalación.)

Conclusiones

Este proyecto evidenció la efectividad de articular conocimientos de ingeniería industrial y telecomunicaciones en el desarrollo de soluciones tecnológicas para el monitoreo ambiental. A través de la implementación de una estación meteorológica con sensores de bajo costo, se validó una propuesta interdisciplinaria que contribuye tanto a la innovación tecnológica como a la formación académica en ingeniería.

Uno de los logros más relevantes fue la consolidación de un laboratorio funcional para el diseño y prototipo de sensores, el cual ofrece una infraestructura propicia para la experimentación, la docencia práctica y la investigación aplicada dentro de la UACM. Las pruebas de campo, junto con los procesos de calibración, demostraron la fiabilidad de los sensores en la detección de variables ambientales, proporcionando datos útiles para el análisis de contaminantes.

En paralelo, se integraron herramientas de software orientadas al procesamiento y visualización de datos, incluyendo el uso de bases de datos en **MySQL** y técnicas de análisis básico de *big data*. Esto permitió consolidar una arquitectura tecnológica capaz de operar en tiempo real, facilitando procesos de supervisión y toma de decisiones con mayor precisión y eficiencia.

Además, el uso de tecnologías inalámbricas en combinación con sensores y microcontroladores programables favoreció respuestas más rápidas ante eventos críticos, reduciendo errores, costos y tiempos de inactividad en entornos industriales. Esta integración tecnológica reafirma el potencial de los sistemas ciberfísicos como soluciones sostenibles para desafíos contemporáneos.

Desde una perspectiva formativa, el proyecto fortaleció la vinculación entre la investigación, la docencia y la práctica profesional, proponiendo un modelo replicable que permite a los estudiantes adquirir competencias técnicas avanzadas mediante el trabajo colaborativo y la resolución de problemas reales.

Finalmente, esta iniciativa abre líneas prometedoras para futuras investigaciones enfocadas en el uso de algoritmos predictivos y modelos de análisis en tiempo real. Su potencial para generar publicaciones académicas y establecer vínculos interinstitucionales refuerza su valor científico y su impacto social, consolidando una base sólida para el desarrollo tecnológico sostenible en el ámbito de la ingeniería.

1. **Viabilidad técnica e impacto formativo.** La integración de sensores de bajo costo con microcontroladores y telecomunicaciones demostró ser eficaz para el

monitoreo ambiental, al tiempo que fortaleció la formación práctica en ingeniería mediante un proyecto con objetivos claros y verificables.

2. **Infraestructura creada.** Se consolidó una infraestructura de laboratorio para diseño y prototipado (hardware y software) que habilita experimentación, docencia e investigación aplicada, facilitando la continuidad del trabajo y la transferencia de conocimientos.
3. **Desempeño en campo y confiabilidad.** Las pruebas de campo y las rutinas de calibración evidenciaron la fiabilidad de las mediciones (temperatura, humedad, lluvia, gases) y su utilidad para la caracterización de condiciones ambientales; se dejó documentada una línea base de protocolos de prueba.
4. **Arquitectura de datos operable en tiempo real.** Se implementó una tubería de adquisición, almacenamiento y visualización que permite operación en tiempo (casi) real, y sienta las bases para análisis avanzados (series de tiempo y espacio-tiempo, detección de anomalías).
5. **Respuesta operativa e integración ciberfísica.** La combinación de sensado, cómputo en el borde y comunicación celular habilitó respuestas más rápidas ante eventos, disminuyendo tiempos de inactividad y errores humanos, y mostrando el potencial de sistemas ciberfísicos en escenarios reales.
6. **Modelo replicable y escalable.** El enfoque modular (energía solar, control, sensado y comunicaciones) es replicable y escalable, lo que facilita su adaptación a distintos contextos urbanos y educativos, así como su extensión a nuevas variables ambientales.
7. **Rutas de continuidad.** Quedaron abiertas líneas de trabajo en calibración avanzada, cuantificación de incertidumbre, optimización de la red de estaciones y analítica predictiva, además de la posibilidad de formalizar colaboraciones interinstitucionales y publicaciones académicas.

Proyección hacia estudios de posgrado

Tema marco sugerido

Optimización multiobjetivo de una red de estaciones de monitoreo ambiental de bajo costo en zonas urbanas, con integración de modelos de dispersión, datos en tiempo real y restricciones de infraestructura (energía y conectividad).

Objetivo general

Desarrollar un marco matemático–computacional para planear, validar y operar una red óptima de estaciones, integrando modelos físico–estadísticos, analítica de datos y criterios multiobjetivo (cobertura, precisión, costo, energía y conectividad), con capacidad de actualización dinámica ante cambios meteorológicos y urbanos.

Objetivos específicos

- **Calibración y metrología:** diseñar protocolos de calibración cruzada y estimación de incertidumbre; comparar con estaciones de referencia comerciales.
- **Analítica y tiempo real:** construir una canalización robusta de datos (ingesta, limpieza, generación de rasgos y tableros) con modelos predictivos y detección de anomalías.
- **Optimización de red:** formular y resolver un problema multiobjetivo con restricciones de autonomía energética y disponibilidad de red celular (por ejemplo, mediante programación entera mixta, heurísticas o algoritmos evolutivos).
- **Modelado físico–estadístico:** acoplar ecuaciones de advección–difusión con asimilación de datos (p. ej., filtros de Kalman/variacional) para refinar campos de concentración y guiar la reconfiguración de la red.
- **Sostenibilidad y mantenimiento:** proponer políticas de mantenimiento predictivo y dimensionamiento energético (panel–controlador–batería) según perfiles de consumo y radiación.

Metodología propuesta

1. **Curación y línea base de datos:** consolidar datasets de campo y campañas de “verdad terreno” para validación.
2. **Calibración e incertidumbre:** estimar sesgos y varianzas por sensor/ubicación/época del año; evaluar trazabilidad.
3. **Modelado y predicción:** entrenar modelos de series de tiempo y espacio–tiempo; acoplar con un modelo físico simplificado de dispersión urbana.
4. **Optimización de red:** resolver escenarios de planeación (largo plazo) y de reconfiguración dinámica (ante fallas o eventos críticos).
5. **Validación externa:** comparar con referencia comercial y métricas de servicio (MAE/RMSE, cobertura espacial/temporal, disponibilidad).
6. **Transferencia:** preparar documentación reproducible (código, datos anonimizados) y establecer convenios para pilotos y escalamiento.

Entregables esperados

- Artículos científicos (calibración/uncertainty, optimización de redes, analítica en tiempo real para IoT ambiental).
- Repositorio reproducible (código, datasets anonimizados y documentación).
- Prototipo operativo (tablero en tiempo real, API de datos y módulo de reconfiguración de red).

Indicadores de éxito

- Reducción de error (MAE/RMSE) frente a líneas base y estaciones de referencia.
- Mejora de cobertura espacial/temporal y disponibilidad del sistema.
- Ahorro energético y aumento de autonomía por estación.
- Publicaciones, colaboraciones y adopción por partes interesadas.

Apéndice A

Diagramas completos

Sistema de control embebido: Un dispositivo electrónico dedicado que gestiona la adquisición de señales de sensores y procesa la información de manera autónoma, sin necesidad de intervención humana constante.

Sistema de adquisición de datos: Se recogen variables del ambiente para su análisis y toma de decisiones, facilitando la supervisión continua del proceso ambiental.

Sistema de comunicación remota: Los datos recopilados se transmiten automáticamente a una plataforma en internet, lo que permite el monitoreo remoto desde cualquier lugar, optimizando el control y la gestión de recursos sin necesidad de estar físicamente en el sitio.

Aplicación en gestión y mejora continua: Esta estación ayuda a tomar decisiones basadas en datos reales para mejorar procesos productivos, gestionar riesgos ambientales y cumplir con normativas de seguridad y calidad.

En resumen: Es un sistema automatizado, integrado y conectado que facilita la medición y monitoreo de variables ambientales en tiempo real, aportando información clave para la optimización y control de procesos industriales y ambientales.



Figura A.1: Enter Caption

Bibliografía

- [1] Agencia Estatal de Meteorología. (s.f.). *Breve historia de la meteorología*. Recuperado el 5 de abril de 2025, de https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones/divulgativas/historia_meteorologia
- [2] García, R., & López, M. (2020). *Meteorología básica y aplicaciones*. Editorial Universitaria.
- [3] Organización Meteorológica Mundial. (2018). *Guía sobre instrumentos y métodos de observación meteorológicos* (WMO-No. 8). Recuperado el 5 de abril de 2025, de <https://community.wmo.int/activity-areas/wmocodes/wmoguides>
- [4] Secretaría de Educación Pública. (2019). *Manual técnico de estaciones meteorológicas automatizadas*. Dirección General de Servicios de Información y Tecnológica.
- [5] Bebis, G. (Ed.). (2021). *Sensors: Theory, Algorithms, and Applications*. Springer.
- [6] Blevins, T., & Nixon, M. (2020). *The Industrial Internet of Things: Using Smart Instrumentation for the Second Digital Revolution*. ISA ? The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- [7] Carullo, A. (2004). *Modern Sensors Handbook*. ISTE Publishing.
- [8] D'Souza, A. F. (2006). *Design and Development of Sensors and Actuators*. Pearson Education.
- [9] Fraden, J. (2016). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications* (5^a ed.). Springer.
- [10] Arduino. (2023). *The easy-to-use hardware and software platform*. Recuperado el 5 de abril de 2025, de <https://www.arduino.cc>
- [11] Espressif Systems. (2022). *ESP32-WROOM-32 Datasheet*. Recuperado el 5 de abril de 2025, de <https://www.espressif.com/en/products/modules/esp32/esp32-wroom-32>

- [12] Espressif Systems. (2023). *ESP32 Arduino Core Documentation* [Repositorio de código]. GitHub. Recuperado el 5 de abril de 2025, de <https://github.com/espressif/arduino-esp32>
- [13] Simcom. (2021). *SIM800 Series AT Command Manual*. Recuperado el 5 de abril de 2025, de https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Wireless/GSM/SIM800%20Series_AT%20Command%20Manual_V1.09.pdf

Bibliografía

- [1] Agencia Estatal de Meteorología. (s.f.). *Breve historia de la meteorología*. AEMET.
https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones/divulgativas/historia_meteorologia
- [2] García, R., & López, M. (2020). *Meteorología básica y aplicaciones*. Editorial Universitaria.
- [3] Organización Meteorológica Mundial. (2018). *Guía sobre instrumentos y métodos de observación meteorológicos* (WMO-No. 8).
<https://community.wmo.int/activity-areas/wmocodes/wmoguides>
- [4] Secretaría de Educación Pública. (2019). *Manual técnico de estaciones meteorológicas automatizadas*. Dirección General de Servicios de Información y Tecnológica.
- [5] Bebis, G. (2021). *Sensors: Theory, algorithms, and applications*. Springer.
- [6] Blevins, T., & Nixon, M. (2020). *The industrial internet of things: Using smart instrumentation for second digital revolution*. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- [7] Carullo, A. (2004). *Modern sensors handbook*. ISTE Publishing.
- [8] D'Souza, A. F. (2006). *Design and development of sensors and actuators*. Pearson Education.
- [9] Fraden, J. (20
- [10] Autor, A. (Año). Título del libro. Editorial.
- [11] Arduino. (2023). *Arduino IDE*. Recuperado de <https://www.arduino.cc>
- [12] Espressif Systems. (2022). *ESP32-WROOM-32 Datasheet*. Recuperado de <https://www.espressif.com>

-
- [13] Espressif. (2023). *ESP32 Arduino Core Documentation*. GitHub. Recuperado de <https://github.com/espressif/arduino-esp32>
 - [14] Simcom. (2021). *SIM800 Series AT Command Manual*. Recuperado de <https://cdn.sparkfun.com>