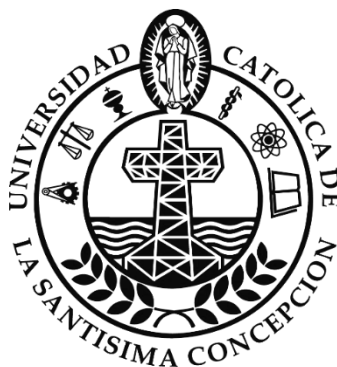


UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Diseño de una estación meteorológica geolocalizada basada en Arduino

Camila Andrea Vallejos Viveros

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniera Civil Eléctrica

Profesor Guía:

Dra. Silvia E. Restrepo M.

Comisión:

Dr. Ricardo Bustos P.
Dr. Jaime Cariñe C.

Concepción, diciembre de 2025.

Resumen

El presente trabajo presenta el diseño e implementación de una estación meteorológica geolocalizada de bajo costo, orientada al monitoreo climático en zonas agrícolas de pequeña escala. El sistema integra una plataforma basada en Arduino junto con un módulo GPS, permitiendo registrar variables ambientales relevantes para la toma de decisiones agronómicas, tales como temperatura, humedad relativa, radiación ultravioleta, precipitación, presión barométrica, velocidad y dirección del viento.

Para fundamentar el diseño, se realizó una revisión bibliográfica sobre tecnologías utilizadas en estaciones meteorológicas automáticas (EMA), estrategias de calibración de sensores y sistemas de alimentación autónomas basados en energía solar. Posteriormente, se seleccionaron sensores comerciales de bajo costo y se desarrolló un prototipo compuesto por un nodo transmisor (encargado de la adquisición de datos) con comunicación inalámbrica mediante ESP8266 que envía los datos a la plataforma online Adafruit. El sistema incluye un módulo fotovoltaico, batería recargable y convertidores de corriente continua a corriente continua (DC-DC) para garantizar una autonomía energética básica.

La calibración de los sensores se efectuó mediante métodos comparativos con instrumentos de referencia, permitiendo validar su funcionamiento y ajustar los datos experimentales. Finalmente, se realizaron pruebas controladas en el exterior, ubicando el prototipo junto a una estación meteorológica de referencia para evaluar su desempeño. Los resultados evidencian que el sistema es capaz de generar mediciones coherentes y transmitirlos en línea, demostrando la viabilidad técnica de una solución accesible, modular y replicable para el monitoreo climático en entornos agrícolas.

En cuanto a trabajos futuros, el prototipo desarrollado permite proyectar mejoras como, optimizar el consumo energético, mejorar la autonomía con baterías certificadas y monitoreo de carga, corrección de corrimiento temporal mediante RTC/NTP o GPS con recepción estable. Además, la incorporación de almacenamiento local (SD) evitaría pérdidas de datos por falta de conexión y la base de mediciones obtenida abre posibilidades de investigación como caracterización microclimática, estimación de evapotranspiración y modelos predictivos.

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi profesora guía por su orientación, dedicación, apoyo y confianza durante el desarrollo de este proyecto. Su acompañamiento fue fundamental para avanzar con claridad y certeza en cada etapa del trabajo.

A los profesores Diego Camaño y Jaime Cariñe, cuyo apoyo técnico, disposición y facilidades otorgadas, tanto en la instalación de la estación como en el acceso a equipamiento de laboratorio, fueron esenciales para el desarrollo de este proyecto. Asimismo, agradezco el respaldo del proyecto ANID FONDECYT N°1251819, cuyo apoyo contribuyó al desarrollo de esta investigación.

A mi familia, gracias por colaborar en la construcción de los soportes de la estación y por acompañarme en su transporte. Su apoyo práctico, compromiso y presencia constante hicieron posible que este proyecto avanzara incluso en los momentos más complejos.

Extiendo también mi gratitud a los amigos y conocidos que hice a lo largo de esta trayectoria, en especial a Roberto Vives y Pablo Burgos, quienes, en distintos momentos de mi formación, me brindaron apoyo, motivación y compañía. Sus aportes, tanto en lo académico como en lo personal, fueron fundamentales durante este proceso.

A una persona en particular, por su apoyo técnico en aspectos de diseño y presentación del proyecto. Su mirada crítica, paciencia y ayuda constante aportaron claridad y coherencia a este trabajo. Este logro también es suyo.

Finalmente, gracias a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron al desarrollo de este proyecto.

Tabla de Contenidos

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL	9
1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
1.2.1 <i>Discusión</i>	15
1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO	17
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	17
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	17
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES	17
1.5 TEMARIO Y METODOLOGÍA	18
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	21
2.1 INTRODUCCIÓN	21
2.2 METEOROLOGÍA.....	21
2.2.1 <i>Conceptos básicos</i>	21
2.3 ESTACIONES METEOROLÓGICAS	23
2.3.1 <i>Escalas de Estaciones Meteorológicas</i>	23
2.3.2 <i>Tipos de Estaciones Meteorológicas</i>	24
2.3.3 <i>Variables de una Estación Meteorológica</i>	25
2.3.4 <i>Topología de EMA</i>	25
2.3.5 <i>Estructura de EMA</i>	26
2.4 PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	28
2.5 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)	29
2.6 APLICACIÓN EN EL CONTEXTO AGRÍCOLA	30
CAPÍTULO 3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO	32
3.1 INTRODUCCIÓN	32
3.2 VARIABLES A MEDIR	32
3.3 COMPONENTES	32
3.4 PRINCIPIO DE OPERACIÓN Y CONEXIÓN DE SENSORES MECÁNICOS	40
3.5 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA GENERAL	44
3.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	46
3.7 DISEÑO DE LA CARCASA Y SOPORTES MODULARES	49
3.7.1 <i>Soportes estructurales</i>	53
3.8 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y COMUNICACIÓN DE LA EMA	55
CAPÍTULO 4 CALIBRACIÓN DE SENSORES	61
4.1 INTRODUCCIÓN	61
4.2 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN.....	61
4.2.1 <i>Estación de referencia HOBO RX3004</i>	62
4.2.2 <i>Pluviómetro</i>	64
4.2.3 <i>Veleta</i>	66
4.2.4 <i>Anemómetro</i>	68
4.2.5 <i>Sensor de presión</i>	70
4.2.6 <i>Sensor de temperatura y humedad</i>	72
4.2.7 <i>Sensor de radiación UV</i>	75
4.2.8 <i>Sensor de lluvia</i>	76
CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y VALIDACIÓN	78
5.1 INTRODUCCIÓN	78
5.2 MODIFICACIONES DERIVADAS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO	78
5.3 EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	79
5.4 VISUALIZACIÓN REMOTA DE DATOS EN ADAFRUIT IO	93
5.5 COSTOS DEL PROTOTIPO	94

5.5.1	<i>Comparación cuantitativa de costos.....</i>	98
CAPÍTULO 6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	100
6.1	CONCLUSIONES.....	100
6.2	TRABAJOS FUTUROS.....	102
CAPÍTULO 7	BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXO A	REGISTROS DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	110
A.1	FIGURAS COMPLEMENTARIAS	110
A.1.1	<i>Figuras: Determinación del desfase temporal (lag) para el sensor DHT11</i>	<i>110</i>
A.1.2	<i>Figuras: Datos crudos obtenidos durante la experimentación.....</i>	<i>111</i>

Tabla de Figuras

Fig. 3.1 Pinout del ESP8266 usado. Fuente: Elecrow.....	33
Fig. 3.2 Pinout del Arduino Nano. Fuente: Mischianti.	34
Fig. 3.3 Sensor DHT11.	34
Fig. 3.4 Sensor ML8511.....	35
Fig. 3.5 Sensor de lluvia YL-83 FC-37 y Chip Comparador LM393.	35
Fig. 3.6 Pinout del sensor BMP180. Fuente: Last Minute ENGINEERS.	35
Fig. 3.7 Pinout del GPS Ublox NEO-6M. Fuente: Last Minute ENGINEERS.	36
Fig. 3.8 Pinout del módulo I2C LCD. Fuente: Last Minute ENGINEERS.	36
Fig. 3.9 Pluviómetro digital. Fuente: MCI Electronics.	36
Fig. 3.10 Anemómetro. Fuente: MCI Electronics.	37
Fig. 3.11 Veleta. Fuente: MCI Electronics.....	38
Fig. 3.12 Panel Solar 20W 12V Monocristalino. Fuente: Solarstorm.....	38
Fig. 3.13 Módulo de carga de batería MCP73871. Fuente: Micro Robotics.	39
Fig. 3.14 Módulo step-down LM2596. Fuente: Altronics.	39
Fig. 3.15 Convertidor boost step-up MT3608. Fuente: MechatronicStore.	40
Fig. 3.16 Conexión veleta y anemómetro.	40
Fig. 3.17 Funcionamiento interno del pluviómetro.....	43
Fig. 3.18 Relación L/m2 con mm de precipitación.	43
Fig. 3.19 Diagrama de bloques de la EMA propuesta.	44
Fig. 3.20 Esquema de conexión transmisor de la EMA.	45
Fig. 3.21 Diagrama de bloques alimentación nodo transmisor.	48
Fig. 3.22 Propuesta referencial de diseño para la carcasa de la EMA.	50
Fig. 3.23 Distribución interna referencial de la EMA.....	51
Fig. 3.24 Modelos 3D para sensores externos.....	52
Fig. 3.25 Vistas del modelo 3D con las piezas impresas integradas.	52
Fig. 3.26 Vistas de la integración de carcasa y estructura de soportes modulares.....	54
Fig. 3.27 Diagrama de flujo Arduino Nano().	56
Fig. 3.28 Diagrama de flujo Nodo Transmisor().	59
Fig. 4.1 Estación meteorológica HOBO RX3004. Fuente: Hydrocultura.	64
Fig. 4.2 Configuración de laboratorio para calibración del pluviómetro.	64
Fig. 4.3 Representación cálculo del área de captación.	66
Fig. 4.4 Configuración de laboratorio para calibración de la veleta.	67
Fig. 4.5 Ajuste para visualizar el grado de correspondencia entre el prototipo y la referencia para la velocidad.	69
Fig. 4.6 Ajuste para visualizar el grado de correspondencia entre el prototipo y la referencia para la presión.	70
Fig. 4.7 Histograma del error de ajuste entre el prototipo y la referencia.	71
Fig. 4.8 Ajuste para visualizar el grado de correspondencia entre el prototipo y la referencia para la	72
Fig. 4.9 Ajuste para visualizar el grado de correspondencia entre el prototipo y la referencia para la temperatura.	74
Fig. 4.10 Ajuste para visualizar el grado de correspondencia entre el prototipo y la referencia para la humedad.	75
Fig. 4.11 Prueba controlada del sensor de lluvia.....	76
Fig. 4.12 Gráfica de Dispersión: Relación entre el valor ADC y el nivel de Agua.	77

Fig. 5.1 Instalación y ubicación de la EMA.....	79
Fig. 5.2 Comparación Temporal de la dirección del viento entre el prototipo de EMA y la estación HOBO.....	82
Fig. 5.3 Histograma de la diferencia angular corregida.	83
Fig. 5.4 Comparación polar de la dirección del viento.	84
Fig. 5.5 Diagrama de dispersión para la velocidad del viento entre la EMA y HOBO.	84
Fig. 5.6 Diagrama de dispersión para la presión entre la EMA y HOBO.....	86
Fig. 5.7 Diagrama de dispersión para la temperatura entre la EMA y HOBO.....	87
Fig. 5.8 Evaluación del ajuste para la humedad (valores calibrados y originales).	89
Fig. 5.9 Comparación de series de humedad relativa EMA vs HOBO.....	90
Fig. 5.10 Diagrama de cajas para la humedad registrada por ambas estaciones.....	91
Fig. 5.11 Relación entre humedad EMA y HOBO bajo condiciones de equilibrio.	92
Fig. 5.12 Panel de monitoreo de estación meteorológica en tiempo real 15/11/25.....	93
Fig. A. 1 Determinación del lag óptimo para alineación temporal de temperatura EMA vs HOBO.	110
Fig. A. 2 Determinación del lag óptimo para alineación temporal de humedad EMA vs HOBO. ...	111
Fig. A. 3 Variación temporal del valor ADC registrado.	112
Fig. A. 4 Variación temporal de la velocidad del viento registrada.....	112
Fig. A. 5 Variación temporal de la presión barométrica registrada.	112
Fig. A. 6 Variación temporal de la temperatura ambiente registrada.	113
Fig. A. 7 Variación temporal de la radiación UV registrada.....	113
Fig. A. 8 Variación temporal del porcentaje de lluvia registrado.	114

Lista de Tablas

TABLA 3.1 Valores de salida teóricos de voltaje para la veleta según la dirección del viento	42
TABLA 3.2 Consumo energético diario de los componentes del sistema.....	47
TABLA 3.3 Promedio mensual de la radiación incidente en el plano con inclinación igual a la latitud del sitio [kwh/m2/día]	47
TABLA 4.1 Volumen vertido vs pulsos del sensor	64
TABLA 4.2 Datos experimentales de la veleta del viento.....	67
TABLA 5.1 Componentes y Costos asociados a la Estación Meteorológica	94
TABLA 5.2 Estimación de horas efectivas de trabajo por actividad	95
TABLA 5.3 Horas de impresión por impresora.....	96
TABLA 5.4 Costos de producción estimados para el prototipo	98

Abreviaciones

Mayúsculas

ADC	: Analog-to-Digital Converter.
EMA	: Estación meteorológica automática.
EMM	: Estación meteorológica mecánica.
FPGA	: Field Programmable Gate Array.
GPIO	: General Purpose Input/Output.

HTTP	: Hypertext Transfer Protocol.
I2C	: Inter-Integrated Circuit.
ICSP	: In-Circuit Serial Programming.
IoT	: Internet de las cosas.
MCU	: Multipoint Control Unit.
MEMA	: Mini estación meteorológica automática.
MQTT	: Message Queuing Telemetry Transport.
RAM	: Random Access Memory.
RF	: Radio frecuencia.
RX	: Recepción.
SoC	: System on Chip.
SPI	: Serial Peripheral Interface.
TCP/IP	: Transmission Control Protocol/Internet Protocol.
TX	: Transmisión.
UDP	: User Datagram Protocol.
UV	: Radiación ultravioleta.
Wi-Fi	: Wireless Fidelity.

Capítulo 1 Introducción

1.1 Introducción General

El cambio climático ha intensificado la variabilidad de las condiciones meteorológicas, afectando directamente a sectores que dependen de la estabilidad ambiental como la agricultura. En este contexto, las estaciones meteorológicas se convierten en herramientas fundamentales ya que permiten recopilar datos climáticos en tiempo real, facilitando el seguimiento de patrones atmosféricos y el desarrollo de modelos predictivos. Esta información resulta clave para tomar decisiones técnicas que impactan en la productividad y sostenibilidad de los cultivos.

Particularmente en el ámbito agrícola, contar con datos precisos y localizados permite optimizar prácticas como la gestión del riego, un aspecto crítico en la eficiencia del uso de los recursos hídricos. Sin embargo, las soluciones comerciales disponibles suelen implicar altos costos y configuraciones complejas, dificultando su adopción en pequeños predios o comunidades rurales.

En respuesta a esta necesidad, el presente proyecto tiene como objetivo el desarrollo e implementación de una estación meteorológica geolocalizada, autónoma y de bajo costo, orientada al monitoreo de variables climáticas relevantes para el manejo agrícola. El sistema se basará en la plataforma de hardware abierto Arduino e integrará un módulo GPS para georreferenciación, junto con sensores para la medición de temperatura, humedad relativa, radiación ultravioleta, precipitación, velocidad y dirección del viento.

El desarrollo del proyecto contemplará la investigación de tecnologías y criterios de diseño adecuados, la incorporación y calibración de sensores climáticos, así como el diseño de un prototipo con alimentación autónoma, capaz de visualizar los datos recolectados en una plataforma en línea. Finalmente, se realizarán pruebas en terreno para validar su funcionamiento, con el fin de ofrecer una solución efectiva, accesible y replicable para el monitoreo climático en entornos agrícolas locales.

1.2 Revisión Bibliográfica

Esta revisión bibliográfica explora los avances recientes en el desarrollo de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) de bajo costo, enfocándose en tecnologías abiertas como Arduino y su integración con plataformas IoT. Se abordan criterios para el diseño del sistema, la selección y calibración de sensores climáticos, y las estrategias de alimentación autónoma, necesarias para su funcionamiento continuo en terreno. Además, se analizan casos de aplicación en contextos agrícolas que permiten fundamentar la implementación, conectividad y validación de la solución propuesta en este proyecto.

- V. D. Velasco Martínez, F. G Flores García, G. González Cervantes, M. Flores Medina, y H. A. Moreno Casillas, “Desarrollo y validación de una estación meteorológica automatizada de bajo costo dirigida a agricultura”, *Rev. Mex. Cienc. Agrícolas*, vol. 6, n. ° 6, pp. 1253–1264, septiembre de 2015 [1].

Este estudio describe el desarrollo de un prototipo de EMA que mide temperatura del aire, lluvia, radiación solar, velocidad y dirección del viento, utilizando sensores como termistor, piranómetro, anemómetro, veleta y pluviómetro. Los datos se transmiten mediante módems de radiofrecuencia, y el sistema es alimentado con un panel solar, batería y cargador. Además, se emplea regresión lineal para comparar dos variables con los datos de una estación en condiciones similares, obteniendo correlaciones de 0.95 para radiación global y 0.91 para temperatura. En cuanto a costos, el prototipo es un 60 % más económico que estaciones de largo alcance, y un 14.24 % más costoso que las de corto alcance, debido a su alta capacidad de medición, atribuida al uso de componentes discretos, comunes en desarrollos más avanzados.

Aunque en el artículo se presenta la metodología de comparación de datos como una “validación del sistema”, este procedimiento puede interpretarse también como una forma de calibración práctica, por lo que el enfoque resulta especialmente relevante, ya que permite ajustar los datos experimentales utilizando una fuente de referencia confiable, mejorando la precisión y la fiabilidad del sistema.

- H. Martínez, “Sistema inteligente para la medida y monitorización en agricultura inteligente,” in *SAAEI2018 - Libro de Actas*, Barcelona, 2018, pp. 250–256 [2].

Este artículo desarrolla dos prototipos de estaciones para agricultura inteligente, diseñados con bajo consumo energético. En este contexto, la EMA permite medir variables como la presencia de lluvia, nivel de iluminación, radiación UV, presión atmosférica, velocidad, dirección del viento, temperatura y humedad relativa, usando sensores como pluviómetro, TSL2561, GUVAS12SD, BMP180, anemómetro, veleta y DHT22. Por su parte, la transmisión de datos se realiza mediante un módulo GSM/GPRS, mientras que la alimentación del sistema se basa en un panel solar policristalino fijo, una batería LiPo 3.7V, un módulo MPPT para optimizar la carga y un convertidor de tensión (step-up) a 5V. Además, el sistema ofrece flexibilidad para la monitorización en tiempo real, visualización de datos históricos en forma de gráficos, y descarga de registros para su posterior procesamiento.

- “Estación meteorológica inteligente para control de riego y mitigación de heladas”, RTE, vol. 34, no. 3, pp. 46–57, Nov. 2022, doi: 10.37815/rte.v34n3.948 [3].

En este artículo se propone un prototipo de estación meteorológica inteligente que proporciona en tiempo real datos de lluvia, temperatura y humedad del suelo, así como temperatura y humedad ambiente, utilizando los sensores SHT-31D, DS18B20, el sensor de precipitación Davis 7857 y el reflectómetro TDR CS655. Además, los datos fueron transmitidos mediante el módulo Bluetooth HC-05. En cuanto a la alimentación, se utilizó un panel solar de 6V-3W, una batería LiPo de 3.7V y un convertidor DC-DC (step-up). Para el desarrollo del prototipo, se recurrió a las plataformas Arduino IDE y Visual Studio Code. Con respecto al proceso de calibración, este consistió en comparar las lecturas de los sensores con estándares de referencia y realizar ajustes para corregir las desviaciones. Asimismo, se aplicó una metodología basada en prototipos rápidos, evaluando la operatividad de los dispositivos electrónicos tanto de forma individual en un entorno controlado como de manera integrada en una parcela experimental, demostrando un funcionamiento continuo y estable a una altitud de 3100 m. s. n. m.

- Konstantinos Ioannou, Dimitris Karampatzakis, Petros Amanatidis, Vasileios Aggelopoulos and Ilias Karmiris. «Low-Cost Automatic Weather Stations in the Internet of Things». En: Information, vol. 12, no. 4, p. 146 (marzo 2021) [4].

El artículo revisa tecnologías actuales para una EMA y el uso del IoT en sistemas de observación. Presenta el proyecto AgroComp, que integra sensores de bajo costo y algoritmos de Deep Learning ejecutados localmente. El sistema, además, transmite datos local y remotamente mediante una Raspberry Pi Zero con servidor MySQL y nodos ESP32/ESP8266 con Wi-Fi. Se alimenta con un panel solar de 50 W, baterías y convertidores de voltaje.

Para validar la fiabilidad de las mediciones, se realizó una calibración comparativa entre sensores (MCP9808, BMP180 y DHT22), un termómetro de mercurio y datos del Servicio Meteorológico Nacional Helénico (HNMS). También se desarrolló una Placa de Circuito Impreso (PCB) personalizada que facilita la conexión segura y modular de sensores.

- N. Granda, J. Monga, C. Barreno, y F. Quilumba, «Desarrollo de una estación meteorológica y una herramienta computacional para la evaluación de los recursos eólico y solar», re, vol. 18, n.º 2, pp. PP. 113–123, ene. 2022 [5].

Este estudio presenta el diseño y construcción de una estación meteorológica e implementación de una herramienta computacional para evaluar recursos solares y eólicos. La estación registra temperatura ambiente, humedad relativa, irradiancia solar, presión, altitud, latitud, longitud, dirección y velocidad del viento. Además, cuenta con una alimentación autónoma a través de un sistema fotovoltaico con almacenamiento y puede transmitir datos en tiempo real, mediante un módulo Ethernet compatible con Arduino. La herramienta computacional permite la evaluación del potencial de generación eléctrica mediante gráficas del comportamiento de las variables y realizar tratamientos previos de los datos para eliminar mediciones erróneas.

- W. A. Zuñiga Vinuesa, A. P. Risquet, y A. S. Nagy, "Prototipo de mini estación meteorológica automática inalámbrica," Revista Publicando, vol. 3, no. 7, pp. 20-32, 2016 [6].

Este trabajo diseña e implementa un prototipo de mini estación meteorológica automática (en adelante MEMA), modular, transportable y de bajo costo, que monitorea variables como humedad, temperatura ambiental y presión barométrica. Utiliza comunicación unidireccional por radiofrecuencia (posteriormente RF) y permite la expansión de sensores. Las pruebas, demostraron que mide con precisión las variables, empleando dos módulos independientes basados en Arduino. El primer módulo, envía datos al segundo módulo, que recibe la información y la envía a un computador para su visualización y almacenamiento en LABVIEW. Esto genera bases de datos útiles para desarrollar modelos matemáticos de predicción climática.

- C. Morón, J. P. Díaz, D. Ferrández, and P. Saiz, “Design, Development and Implementation of a Weather Station Prototype for Renewable Energy Systems,” *Energies*, vol. 11, no. 9, p. 2234, 2018 [7].

El artículo diseña y codifica un sistema embebido para una EMA portátil, que incorpora sensores de alto rendimiento para medir temperatura, radiación solar, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento. La principal contribución de este trabajo es el desarrollo de un sistema de control embebido que funciona en tiempo real, basado en un dispositivo Field Programmable Gate Array (FPGA). El método implementado, garantiza la adquisición de datos de alta resolución, a partir de múltiples muestras en tiempo real. Las muestras obtenidas se agrupan y almacenan en una base de datos.

- E. Betancur Villamil, " Desarrollo de Estación Meteorológica con IoT, redundante a fallos y para condiciones ambientales de alta montaña”, UNIVERSIDAD EIA, EIA, Antioquia, Colombia, 2021 [8].

Este proyecto de grado desarrolla una EMA remota para la adquisición de datos meteorológicos. Utiliza una tarjeta de desarrollo Feather, baterías, un panel solar y otros componentes, seleccionados mediante la metodología de diseño de Karl T. Ulrich, para monitorear temperatura, humedad y precipitación. En este se aborda la problemática de estaciones meteorológicas existentes, que enfrentan pérdida de información y problemas de funcionamiento por limitaciones de memoria, costos y fallos por condiciones climáticas. La estación incluye sistemas redundantes, tecnología IoT, respaldo de información con memorias SD, protección contra descargas atmosféricas y condiciones adversas. Finalmente, realiza ensayos y análisis de resultados, transmitiendo datos a la nube, con bajo costo, portabilidad y un diseño modular que facilita su mantenimiento.

- R. D. Ferrer Sanabria, “Desarrollo de una estación meteorológica autónoma de bajo costo”, Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás, USTA, Bucaramanga, Colombia, 2017 [9].

En este trabajo de investigación, se desarrolló un sistema de alimentación con autonomía de 2 días sin radiación solar, donde se implementó un sistema de transmisión por red móvil 3G que mejoró la cobertura y permitió su uso en entornos con señal de telefonía móvil. Utilizando una interfaz gráfica, el estudio expone la información de la base de datos facilitando la comprensión del comportamiento

climático y ambiental de la zona. La estación puede monitorear variables ambientales y climáticas en sitios remotos, gracias al sistema fotovoltaico que le proporciona autonomía, así como su capacidad para medir y graficar datos de manera efectiva, respaldada por una cobertura de red celular.

- M. A. Ponce-Jara, C. Velásquez-Figueroa, D. Tonato-Peralta, y G. Paredes-Morillo, “Diseño de una estación meteorológica automática para registrar las variables solar y eólica”, *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, vol. 5, no. 10, pp. 937-957, Jul.-Dec. 2020 [10].

Este artículo implementa un proceso de lectura en paralelo para calibrar los instrumentos y obtener resultados fiables. El estudio hace uso de un servidor web para almacenar datos garantizando un respaldo a largo plazo y realiza pruebas que indican un buen funcionamiento del prototipo, aunque mejorable. A pesar de que la información sobre radiación y viento es inconclusa, el artículo sugiere la viabilidad de proyectos energéticos basados en energías renovables no convencionales (ERNC). Finalmente, plantea la necesidad de realizar un estudio de factibilidad técnico-económico para justificar la implementación de estas tecnologías.

- J. A. Botero-Valencia, C. A. Mejía-Herrera, y J. M. Pearce, “Low cost climate station for smart agriculture applications with photovoltaic energy and wireless communication,” *HardwareX*, vol. 11, e00296, 2022, doi:10.1016/j.ohx.2022.e00296 [11].

El artículo presenta el diseño de una estación climática de bajo costo orientada a la agricultura inteligente, utilizando sensores ambientales, energía fotovoltaica y comunicación inalámbrica. Su enfoque en hardware accesible y autosuficiencia energética respalda directamente el objetivo general de implementar una estación meteorológica autónoma en zonas agrícolas. Además, ofrece referencias útiles sobre la selección, calibración e integración de sensores, así como sobre la transmisión remota de datos.

- G. González-Rodríguez, J. G. García-Cuevas, E. Rodríguez-Laguna, y J. A. Acosta-Velázquez, “Evaluación de la partición de lluvia en dos especies arbóreas con Arduino,” *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 15, núm. 85, pp. 70–96, 2024 [12].

El artículo demuestra la utilidad de plataformas como Arduino en aplicaciones de monitoreo ambiental. Los autores emplean una estación experimental basada en Arduino para evaluar la partición de lluvia en dos especies arbóreas, validando así la precisión y confiabilidad de estos sistemas en

condiciones de campo. El enfoque metodológico adoptado en el artículo ofrece un precedente técnico para respaldar la integración de sensores y la calibración de datos en escenarios reales.

- K. Malek, E. Ortiz Rodríguez, Y.-C. Lee, J. Murillo, A. Mohammadkhorasani, L. Vigil, S. Zhang, and F. Moreu, "Design and implementation of sustainable solar energy harvesting for low-cost remote sensors equipped with real-time monitoring systems," *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, vol. 2, p. 100051, Jul. 2023 [13].

El artículo describe el diseño, implementación y validación experimental de una red inalámbrica de sensores inteligentes (WSSN) alimentados mediante energía solar. Aunque el enfoque principal del estudio es el monitoreo hidrométrico (nivel de agua y precipitación), los principios de diseño de nodos autónomos basados en microcontroladores (Arduino/ESP32), gestión energética con paneles fotovoltaicos, almacenamiento en baterías y transmisión de datos en tiempo real mediante interfaces web, son directamente aplicables al desarrollo de estaciones meteorológicas de bajo costo para uso agrícola. Además, este aporta criterios técnicos clave para la selección de componentes, estimación de consumo energético y validación en terreno.

1.2.1 Discusión

Los estudios analizados evidencian que las EMA ofrecen una serie de ventajas relevantes para su aplicación en el sector agrícola. Entre ellas, destaca el bajo costo de implementación, como se observa en el trabajo de Velasco Martínez [1], donde el prototipo desarrollado resulta un 60% más económico que soluciones comerciales, lo que favorece su adopción por agricultores de pequeña escala. A esto se suma la posibilidad de monitoreo en tiempo real y la incorporación de tecnologías como IoT, abordada por Ioannou [4], que permite optimizar el análisis de datos y la toma de decisiones ante condiciones climáticas dinámicas. No obstante, también se exponen ciertos desafíos, como la vulnerabilidad operativa en ambientes adversos, señalada por Betancur Villamil [8], quien identifica riesgos asociados a la pérdida de datos y fallos del sistema. Asimismo, la precisión de los sensores de bajo costo puede ser variable, como advierte Ponce-Jara [10], lo que podría comprometer la calidad de las mediciones si no se aplican procesos de validación adecuados.

En conjunto, estos trabajos aportan fundamentos técnicos y metodológicos que resultan pertinentes para alcanzar los objetivos de esta investigación, validando la factibilidad técnica de distintas EMA de bajo costo, lo cual respalda el objetivo general del proyecto. En relación con los

objetivos específicos, presentan visiones actualizadas sobre tecnologías aplicadas a EMA, tales como IoT, Edge Computing y redes LPWAN, lo que fortalece el análisis de criterios de diseño. Asimismo, el uso de calibración comparativa de sensores frente a referencias confiables, observado en varios trabajos, proporciona una base metodológica directa para la integración y validación de sensores climáticos en el prototipo. Del mismo modo, se describen sistemas de alimentación autónoma mediante paneles solares y baterías, junto con mecanismos de transmisión de datos vía Wi-Fi, lo cual respalda el diseño orientado a la visualización remota. Por último, las pruebas en terreno y el análisis estadístico de resultados ofrecen referencias validadas para estructurar un protocolo funcional replicable en entornos agrícolas locales.

1.3 Hipótesis de Trabajo

Una estación meteorológica de bajo costo basada en Arduino y GPS es capaz de generar datos climáticos confiables en pruebas controladas, evidenciando su viabilidad para futuras aplicaciones en entornos agrícolas de pequeña escala.

1.3.1 Objetivo General

- Desarrollar una estación meteorológica de bajo costo, usando Arduino y GPS, orientada al monitoreo en zonas agrícolas de pequeña escala.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Investigar tecnologías y criterios de diseño relevantes para estaciones meteorológicas agrícolas.
- Incorporar y calibrar sensores climáticos basados en métodos experimentales o comparativos en función de las condiciones de medición y referencia disponibles.
- Diseñar un prototipo funcional con capacidad de transmisión en línea y alimentación solar de autonomía limitada.
- Evaluar el desempeño del sistema mediante pruebas de campo controladas, identificando fortalezas y limitaciones del prototipo.

1.4 Alcances y Limitaciones

El desarrollo de la estación meteorológica se enmarca en un enfoque de bajo costo, por lo que la selección de sensores dependerá de la disponibilidad en el mercado nacional y del presupuesto asignado. Esta condición puede influir en su precisión, estabilidad o durabilidad, ya que se utilizarán componentes comerciales económicos en lugar de soluciones profesionales certificadas. En consecuencia, el desempeño del prototipo reflejará las capacidades reales de estos dispositivos dentro de un contexto de accesibilidad y restricción presupuestaria.

La calibración de los sensores se realizará mediante métodos experimentales y comparativos basados en la documentación técnica del fabricante y en instrumentos de referencia disponibles, sin recurrir a procesos de certificación formal. Esta decisión responde tanto al carácter académico y prototípico del proyecto como a la disponibilidad limitada de equipamiento especializado. Aun así,

los procedimientos aplicados permitirán verificar el funcionamiento general de los sensores y obtener una aproximación razonable a su comportamiento real.

El sistema de alimentación energética estará compuesto por soluciones simples y económicas, como un panel solar de baja potencia y una batería recargable, lo que proporcionará una autonomía básica. Esta implementación busca mantener la portabilidad del prototipo, aunque no está diseñada para operar en forma continua durante largos periodos ni en condiciones de alta demanda energética, como sería esperable en instalaciones de uso intensivo, entendidas como aquellas que incorporan cargas adicionales de mayor consumo.

Si bien la arquitectura del sistema permite, a nivel físico, la incorporación de cargas adicionales, para determinar si el sistema de alimentación podría sostenerlos sería necesario realizar un estudio detallado de consumo y balance energético, mediante la instrumentación con sensores de corriente y tensión que permitan caracterizar de forma precisa el consumo durante todo el funcionamiento de la estación.

En cuanto a la resistencia del sistema, no se incorporarán mecanismos avanzados de protección frente a condiciones meteorológicas extremas, tales como tormentas eléctricas, heladas severas o acumulación significativa de agua y vientos fuertes. Para mantener baja la complejidad del diseño, el prototipo está pensado para operar adecuadamente en condiciones correspondientes al período de primavera en la provincia de Concepción, dependiendo de protecciones externas cuando exista exposición a eventos climáticos de mayor intensidad.

Las pruebas realizadas en “terreno” correspondieron a la colocación del prototipo junto a una estación meteorológica de referencia, con el fin de obtener mediciones simultáneas para comparación. Si bien esta validación no representa un escenario agrícola real, permitió evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones ambientales externas y contrastar sus lecturas con un instrumento previamente calibrado.

1.5 Temario y Metodología

La presente investigación se desarrolla siguiendo una metodología estructurada que permite diseñar, implementar y validar una estación meteorológica de bajo costo basada en microcontroladores. El proceso inicia con una revisión bibliográfica enfocada en estaciones

automáticas de bajo costo, sensores comúnmente utilizados, criterios de diseño, tecnologías de comunicación y experiencias previas relevantes en la medición de variables climáticas e integración con plataformas IoT. Este análisis teórico proporciona las bases conceptuales para la selección de sensores, la arquitectura del sistema y la transmisión de datos georreferenciados.

Posteriormente, se elaboró el diseño preliminar del prototipo, definiendo las variables a medir y seleccionando sensores apropiados para temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, radiación UV, precipitación, velocidad y dirección del viento. Se establecieron los esquemas eléctricos necesarios para la conexión de cada componente al microcontrolador, asegurando compatibilidad eléctrica y correcta alimentación. Asimismo, se diseñó un sistema de alimentación autónoma mediante paneles solares y baterías recargables, considerando las condiciones climáticas de la provincia de Concepción para garantizar un funcionamiento continuo.

La calibración de los sensores se realizó mediante comparaciones con instrumentos de referencia y datos entregados por los fabricantes, permitiendo ajustar el código de lectura y validar la coherencia y estabilidad de los datos. En paralelo, se implementó la transmisión remota hacia Adafruit IO, verificando la integridad de la información enviada y la visualización en tiempo real.

El prototipo se probó en el exterior durante un periodo acotado, con el fin de evaluar la operación integrada del sistema y detectar posibles inconsistencias. Finalmente, se efectuó una comparación económica entre la estación desarrollada y dos alternativas comerciales, evaluando su costo relativo y ventajas potenciales.

En cuanto al contenido del informe, este se organiza en los capítulos siguientes:

Capítulo 2: Se exponen los conceptos fundamentales de meteorología, sistemas de medición, protocolos de comunicación, topologías de estaciones y funcionamiento del GPS, con el fin de establecer un marco teórico que respalde las decisiones de diseño del sistema.

Capítulo 3: Se describe el diseño e implementación del prototipo, presentando las variables medidas, los componentes seleccionados, fundamentos de operación, estructura física, sistema de alimentación solar, la arquitectura general de adquisición y transmisión de datos.

Capítulo 4: Se desarrollan los procedimientos de calibración aplicados a los distintos sensores del sistema, incluyendo pluviómetro, veleta, anemómetro, sensor de lluvia, temperatura, humedad,

presión y radiación UV. Se presentan los métodos comparativos utilizados y las correcciones obtenidas.

Capítulo 5: Se muestran los resultados obtenidos en pruebas al exterior, junto con la validación del sistema, los ajustes derivados de las pruebas reales, la visualización remota en Adafruit IO, se incluye la evaluación económica del prototipo.

Capítulo 6: Se entregan las conclusiones finales del proyecto, junto con las proyecciones de trabajo futuro para mejorar la precisión, autonomía y robustez del sistema.

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 Introducción

En este capítulo se presentan los conocimientos generales sobre meteorología, variables meteorológicas y tipos de estaciones, conceptos que establecen las bases necesarias para la elaboración del proyecto.

2.2 Meteorología

Según [14], la meteorología es la ciencia que estudia los fenómenos atmosféricos, con el fin de definir el clima, predecir condiciones meteorológicas y analizar su interacción con otros subsistemas del sistema climático. Se basa en la recopilación y análisis de datos para identificar patrones que afectan el entorno.

Como señala la *Guía de instrumentos y métodos de observación* [15], comprender las variaciones climáticas ha sido clave para la toma de decisiones a lo largo de la historia, y su estudio cobra mayor relevancia frente al cambio climático actual.

La importancia de esta disciplina se refleja en organismos como la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que representa al sistema de Naciones Unidas en temas relacionados con la atmósfera, el clima y el agua. Coordina el trabajo de 188 países para generar información estandarizada sobre estos fenómenos [18].

2.2.1 Conceptos básicos

Comprender los principios de la meteorología permite interpretar las condiciones atmosféricas y anticipar fenómenos que pueden impactar desde la agricultura hasta actividades cotidianas. Distinguir entre meteorología, climatología, tiempo meteorológico y clima, y conocer elementos como la presión, temperatura y humedad, permite tomar decisiones informadas ante cambios ambientales.

- **Meteorología:** Ciencia que estudia el tiempo meteorológico y los fenómenos que ocurren en la atmósfera en períodos cortos, con el fin de realizar pronósticos [22].
- **Climatología:** Ciencia que estudia el clima, entendido como el promedio del comportamiento del tiempo atmosférico a largo plazo, mediante el análisis estadístico de datos históricos [22].

- **Tiempo meteorológico:** Estado variable de la atmósfera en periodos cortos (nubes, temperatura, lluvia, etc.). Se relaciona con pronósticos diarios [22].
- **Clima:** Promedio a largo plazo del tiempo atmosférico, determinado mediante análisis estadísticos de datos históricos [22].
- **Atmósfera:** Capa gaseosa que rodea la Tierra, compuesta principalmente de nitrógeno y oxígeno, además de gases traza, vapor de agua y aerosoles [22].
- **Tropósfera y Estratósfera:** La tropósfera es la capa más cercana a la superficie y donde ocurren los fenómenos meteorológicos; la estratósfera contiene la capa de ozono, que filtra la radiación UV [22].
- **Sistema climático:** Formado por la atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera que interactúa dinámicamente con influencias internas y externas [22].
 - **Biósfera:** Ecosistemas terrestres y marinos, incluyendo su materia orgánica [22].
 - **Litósfera:** Capa sólida externa de la Tierra. Aunque no forma parte activa del sistema climático, influye como forzante externo [22].
 - **Hidrósfera:** Aguas superficiales y subterráneas: océanos, ríos, lagos, etc. [22].
 - **Criósfera:** Zonas donde el agua está en estado sólido: nieve, glaciares, hielo marino y permafrost [22].
- **Energía solar:** Motor del sistema climático, cuya absorción y reemisión regula el equilibrio térmico terrestre mediante la radiación de onda larga (ROL).
- **Norte magnético:** Dirección que marca una brújula, determinada por el campo magnético terrestre; cambia constantemente [20].
- **Norte geográfico:** Punto fijo del eje de rotación de la Tierra, también llamado norte verdadero; se localiza con la Estrella Polar [20].
- **Norte de cuadrícula:** Dirección norte utilizada en mapas proyectados (UTM o Lambert); no coincide con el norte geográfico [20].
- **Medición:** Obtención experimental de valores atribuibles a una magnitud [15].
- **Instrumento de medición:** Dispositivo para realizar mediciones, solo o acompañado de otros componentes [15].

2.3 Estaciones Meteorológicas

Según [19], las estaciones meteorológicas permiten medir y registrar variables climáticas esenciales para distintos campos de estudio. Existen versiones profesionales, domésticas y portátiles, y pueden operar en tiempo real o en forma diferida. En general, una estación incluye: el terreno circundante (ubicación y exposición), la parcela meteorológica (zona con los instrumentos), un abrigo protector y los instrumentos de medición.

2.3.1 Escalas de Estaciones Meteorológicas

En las estaciones meteorológicas, el concepto de "representatividad" es fundamental, ya que mide qué tan bien una observación captura el valor de una variable relevante para un objetivo específico [15]. Según esta misma fuente, la frecuencia y densidad de las observaciones son críticas para mejorar la precisión en pronósticos, especialmente a corto plazo.

Por lo anterior, no se puede tratar como una característica fija de la observación, ya que puede variar según diversos factores: el instrumento de medición utilizado, el rango de la medición y el tiempo de exposición a la variable.

Las escalas espaciales horizontales se clasifican, con cierto margen de incertidumbre, en:

- **Microescala** (<100 m): meteorología agrícola (e.g., evaporación).
- **Topoescala o local** (100 m – 3 km): tornados, contaminación del aire.
- **Mesoescala** (3 – 100 km): tormentas, brisas marinas o de montaña.
- **Gran escala** (100 – 3.000 km): frentes, ciclones, nubes.
- **Escala planetaria** (>3.000 km): ondas en la tropósfera superior.

La precisión depende de instrumentos adecuados y manejo correcto, pero en la práctica puede verse limitada por la falta de recursos y formación. La frecuencia de medición también varía: en aviación es necesaria cada minuto; en agricultura, cada hora; y en climatología, diariamente.

Obtener mediciones representativas en escalas de metros a cientos de kilómetros es complejo. Aún así, estaciones no ideales pueden ofrecer datos útiles si son consistentes en el tiempo, permitiendo detectar cambios reales del clima más allá de posibles errores de medición.

2.3.2 Tipos de Estaciones Meteorológicas

Debido a la amplia variedad de estaciones meteorológicas disponibles y su diversidad en función de características, tecnologías y aplicaciones, este apartado presenta algunas categorías principales.

1. **Estación Meteorológica Mecánica (EMM):** Tradicional, opera de forma manual mediante instrumentos mecánicos. Requiere un observador que registre datos a horas específicas y cambie las bandas de registro.
2. **Estación Meteorológica Automática (EMA):** Registra datos automáticamente mediante sensores conectados a una unidad central. Incluye sistema de alimentación y puede transmitir datos remotamente. Según la OMM, las EMA operan 24/7 y envían datos para su análisis, aplicando fórmulas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Según su configuración, se pueden clasificar en:

- **Cerrada:** Con sensores predefinidos por el fabricante.
- **Abierta:** Permite añadir sensores personalizados compatibles con el datalogger.

Según la Guía [16], se clasifican en:

- **EMA básicas:** Miden variables como temperatura o precipitación, para uso climatológico o en tiempo real.
- **EMA ampliadas:** Incluyen variables adicionales como radiación solar, temperatura del suelo o evaporación.
- **EMA con observaciones visuales automatizadas:** Integran sensores para visibilidad, altura de nubes y tiempo presente. También se conocen como sistemas automatizados de observación meteorológica.

En función de su costo y prestaciones, la Guía [16] distingue:

- **Compactas:** Todo-en-uno, dirigidas a usuarios aficionados.
- **Multifunción:** Pueden transmitir datos localmente pero no registrarlos.
- **Instrumentos autónomos (IoT):** Sensores inteligentes que envían datos vía Wi-Fi/Bluetooth a servidores con bajo consumo energético.

2.3.3 Variables de una Estación Meteorológica

Según [17], los elementos a observar varían según el tipo de estación y la red de observación. De acuerdo con [15], en estaciones climatológicas características o de la red sinóptica de superficie; compuesta por estaciones distribuidas estratégicamente para registrar datos meteorológicos en tiempo real; se observan las siguientes variables meteorológicas:

- Temperatura del aire y del suelo [$^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$, $^{\circ}\text{K}$].
- Presión atmosférica [hPa, mbar].
- Humedad relativa [%].
- Dirección y velocidad del viento [$^{\circ}$ y m/s].
- Precipitación y capa de nieve [mm, kg/m^2 , l/m^2].
- Insolación y/o radiación solar [h, W/m^2 , J/m^2].
- Visibilidad [m, km].
- Evaporación [mm, mm/día].
- Tiempo presente y pasado [s, min, h, día, semana, mes, año].
- Nubosidad, tipo y altura de la base de las nubes [octas, m].

Estas variables también son respaldadas por [19].

2.3.4 Topología de EMA

La "topología" describe cómo se interconectan los dispositivos de una red, tanto física como lógicamente. En el caso de las EMA, este concepto aplica tanto a su comunicación con la unidad central como a la conexión con sus sensores [23]. Así, las principales topologías utilizadas son:

Punto a Punto: Conexión directa entre la EMA y la unidad central, o entre sensores y EMA, mediante cables o enlaces inalámbricos. Es simple y fácil de implementar, pero vulnerable a fallos si se pierde el medio de conexión.

Bus: Todas las EMA o sensores comparten una única línea de comunicación, generalmente con protocolo SPI. Es adecuada para configuraciones en serie (p.ej., a lo largo de un río), pero un daño en la línea afecta a todos los nodos.

Estrella: Cada EMA se conecta directamente a la unidad central, y los sensores se conectan del mismo modo a su EMA. Esta topología es segura, ya que el fallo de un nodo no afecta a los demás. Su principal desventaja es la complejidad de instalación.

Malla: Conexión entre EMA y la unidad central a través de múltiples rutas (Full o Partial Mesh). Es la más robusta frente a fallos, ya que permite rutas alternativas de datos. No obstante, su instalación es más compleja, especialmente con cables.

2.3.5 Estructura de EMA

Actualmente, las estaciones meteorológicas automáticas se diseñan para cumplir múltiples funciones de medición de manera simultánea, permitiendo la recolección de datos ambientales que son transmitidos a un servidor o dispositivo móvil. A través de herramientas informáticas, estos datos son procesados y presentados de forma clara y accesible al usuario. Según lo indicado por [16] y [19], la estructura general de una EMA puede dividirse en los siguientes componentes:

2.3.5.1 Datalogger

Constituye el núcleo de procesamiento de la estación. Su función principal es consultar, registrar y almacenar de forma programada los datos provenientes de cada sensor en tiempo real. Este componente actúa como la unidad central de procesamiento (CPU), encargada de ejecutar los cálculos establecidos en la programación interna [19].

Según [24], los dataloggers pueden clasificarse principalmente en:

- **Autónomos:** Son portátiles, alimentados por baterías, y diseñados para realizar mediciones durante periodos definidos. Una vez finalizado el registro, los datos deben ser recuperados manualmente mediante conexión a un computador.
- **Inalámbricos:** Permiten la transmisión remota de datos utilizando tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee o LoRaWAN, lo que los hace especialmente útiles en ubicaciones de difícil acceso. Estos dispositivos suelen incorporar paneles solares o baterías para asegurar su autonomía energética.

2.3.5.2 *Sistema de comunicación y transmisión de datos*

Este sistema posibilita la transferencia de la información registrada desde la EMA hacia una base de datos central. La elección del medio de comunicación dependerá de las condiciones geográficas y de infraestructura del sitio. Las opciones más comunes incluyen:

- **Comunicación directa:** Mediante cables RS232 o RJ-485 que conectan directamente el datalogger con un computador.
- **Red telefónica fija:** Requiere de módems en ambos extremos para la transmisión de datos por línea telefónica convencional.
- **Telefonía móvil:** Utiliza módems GSM/3G/4G conectados a la EMA y al computador receptor, permitiendo una comunicación remota más flexible.
- **Radiofrecuencia:** Implica el uso de equipos de transmisión-recepción que cubren la distancia entre la EMA y el centro de control. Puede requerirse el uso de antenas repetidoras, y es necesario obtener autorización de frecuencia por parte del Ministerio de Obras Públicas, a través de la Dirección de Telecomunicaciones.
- **Tecnología satelital:** Empleada en zonas sin cobertura terrestre, requiere la contratación de un servicio satelital y equipos específicos de transmisión y recepción.

2.3.5.3 *Sistema de alimentación de energía*

El suministro energético es un componente crítico para el funcionamiento continuo de una EMA, especialmente en entornos remotos. Los métodos de alimentación más utilizados son:

- **Energía eléctrica alterna (220 V):** Se utiliza un transformador para reducir el voltaje a los niveles requeridos por los componentes (usualmente 6 a 12 V). Para asegurar el funcionamiento ante cortes de energía, se incorporan baterías de respaldo de igual voltaje que el datalogger.
- **Energía eléctrica continua:** Mediante baterías recargables o pilas de estado sólido, que permiten la operación autónoma de la estación.
- **Panel solar:** Dispositivo que convierte la energía solar en electricidad para alimentar la estación o recargar las baterías. Su selección debe considerar los requerimientos energéticos de la estación, el consumo total diario, y las condiciones climáticas locales, especialmente durante periodos de baja irradiación como el invierno [19].

2.3.5.4 Sensores

Los sensores son los dispositivos encargados de medir las variables meteorológicas específicas. Según [15] y [19], los principales sensores integrados en una EMA son los siguientes:

- **Barómetro:** Mide la presión atmosférica. Puede funcionar mediante el principio de presión hidrostática (barómetro de mercurio) o con sensores electrónicos que convierten los cambios de presión en señales digitales.
- **Pluviómetro:** Cuantifica la precipitación mediante un balancín que se acciona al alcanzar un volumen específico de agua, generando un pulso electrónico por cada volcado [19].
- **Psicrómetro o higrómetro:** Determina la humedad relativa del aire y el punto de rocío. Utiliza un sensor capacitivo cuya capacitancia varía con la humedad ambiental.
- **Piranómetro:** Mide la radiación solar global incidente, convirtiendo la energía electromagnética en una señal eléctrica proporcional.
- **Sensor de radiación fotosintéticamente activa:** Capta la fracción de radiación útil para la fotosíntesis, generalmente mediante fotodiodos o celdas fotovoltaicas. En sensores de radiación ionizante, se emplean detectores como los tubos Geiger-Müller.
- **Veleta:** Indica la dirección del viento mediante una pala giratoria que se alinea con la corriente de aire predominante.
- **Anemómetro:** Mide la velocidad del viento, ya sea por la rotación de hélices o por sensores térmicos que detectan la pérdida de calor en un hilo conductor expuesto al aire.
- **Termómetro:** Registra la temperatura ambiental mediante sensores de resistencia (ej. termómetros de platino), cuya variación de resistencia es proporcional al cambio de temperatura [19].
- **Sensor de temperatura de suelo y/o agua:** Utiliza termopares o termistores para medir la temperatura en distintos medios.
- **Sensor de humedad de hojas:** Evalúa la humedad en la superficie foliar a través de variaciones en la conductividad o capacitancia.

2.4 Protocolos de Comunicación

Además del hardware, la comunicación entre sistemas requiere protocolos, es decir, reglas que permiten el intercambio de información entre los componentes.

- **RS-232/RS-485:** Comunes en estaciones meteorológicas. RS-485 es ideal para largas distancias y entornos ruidosos por su comunicación diferencial y soporte para múltiples dispositivos en un mismo bus.
- **Modbus:** Protocolo industrial confiable y sencillo, usado para conectar sensores, controladores y sistemas SCADA. Opera sobre RS-485 o TCP/IP, facilitando la integración de dispositivos [25].
- **TCP/IP:** Protocolo estándar en redes modernas. Permite transmitir datos meteorológicos localmente o por internet, facilitando el monitoreo remoto [26].
- **Zigbee:** Protocolo inalámbrico eficiente en consumo, ideal para estaciones autónomas con paneles solares. Soporta redes de malla para cobertura en grandes áreas [27].
- **LoRaWAN:** Inalámbrico, de largo alcance y baja potencia. Adecuado para zonas rurales o remotas por su eficiencia energética y capacidad de transmitir a varios kilómetros [27].
- **Wi-Fi:** Frecuente en estaciones domésticas. Permite envío de datos a servidores locales o la nube de forma sencilla [28].
- **Bluetooth:** Útil para transmisiones a corto alcance y configuraciones iniciales desde dispositivos móviles [29].
- **GPRS/4G/5G:** Protocolos móviles que garantizan conectividad en tiempo real en estaciones remotas sin redes locales [27].
- **MQTT:** Protocolo liviano de publicación/suscripción, ideal para IoT con bajo ancho de banda. Permite transmisión eficiente a la nube [28].
- **HTTP/HTTPS:** Usado para enviar datos a servidores web o consumir APIs REST. Facilita la visualización de datos en plataformas online [30].

2.5 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

Es una tecnología de navegación satelital administrada por el Departamento de Defensa de Estados Unidos. Su objetivo principal es permitir que cualquier usuario determine su ubicación exacta en cualquier parte del mundo, en cualquier momento y bajo cualquier condición climática.

El sistema utiliza la constelación de satélites NAVSTAR, compuesta por 24 satélites distribuidos en seis planos orbitales inclinados 55° con respecto al ecuador, a una altitud de aproximadamente 20.200 km. Cada satélite completa una órbita en 12 horas, lo que garantiza que al menos cuatro satélites estén siempre visibles desde cualquier punto del planeta [31].

El GPS determina la posición mediante triangulación: calcula la distancia entre el receptor y varios satélites, estimando estas distancias como radios de esferas centradas en los satélites. La intersección de estas esferas permite ubicar con precisión el punto en la superficie terrestre. Aunque es posible calcular una posición con tres satélites, en la práctica se requiere un cuarto para corregir errores de sincronización y obtener coordenadas espaciales y temporales precisas [32].

Para el GPS la estimación de la altura se hace por medio de la “altura elipsoidal”, que corresponde a la distancia vertical entre el punto medido y un “elipsoide de referencia geodésico”, el cual representa un modelo simplificado de la tierra generado a partir de girar una elipse. Esta altura no representa directamente la elevación sobre el nivel medio del mar, ya que el elipsoide es una superficie matemática que no coincide con el geoide real terrestre. En receptores GPS de bajo costo, la estimación de la altura elipsoidal presenta menor precisión que la posición horizontal y puede verse afectada por la geometría de los satélites, pérdidas temporales de señal y variaciones en la solución de posicionamiento [33][34].

2.6 Aplicación en el Contexto Agrícola

La incorporación de estaciones meteorológicas automáticas (EMA) en entornos agrícolas representa una estrategia fundamental para la optimización del manejo agronómico y la adaptación frente a la variabilidad climática. Las variables meteorológicas abordadas en esta sección temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, radiación solar, presión atmosférica y viento tienen un impacto directo en procesos fisiológicos de los cultivos, como la fotosíntesis, la transpiración, la germinación y la aparición de enfermedades o estrés hídrico.

Por ejemplo, la temperatura y la humedad relativa influyen en la dinámica de evapotranspiración, en el desarrollo fenológico y en la proliferación de enfermedades criptogámicas; la radiación solar afecta la eficiencia fotosintética y el crecimiento vegetal; la presión atmosférica permite anticipar cambios en el tiempo meteorológico; mientras que el viento y las precipitaciones determinan aspectos operacionales del riego, fertilización, aplicación de agroquímicos y cosecha. En este contexto, disponer de datos meteorológicos localizados, capturados en tiempo real y con georreferenciación mediante GPS, permite una gestión del riego más eficiente, así como la implementación de prácticas agrícolas adaptadas a las condiciones microclimáticas del predio [1].

En el contexto de aplicaciones en entornos agrícolas de pequeña escala, la incorporación de un módulo GPS asegura la correcta georreferenciación de los datos registrados, permitiendo asociarlos de manera precisa a un punto específico del predio. Si bien las estaciones se instalan en ubicaciones fijas, la información de posición es relevante para el análisis de las condiciones microclimáticas locales, las cuales pueden presentar variaciones significativas incluso en distancias reducidas, así como para la comparación de los registros obtenidos con estaciones de referencia cercanas o con información climática regional. Asimismo, el uso de GPS permite verificar la localización de la estación ante eventuales reubicaciones dentro del predio o cambios en la disposición del sistema, contribuyendo a una interpretación más precisa y a una gestión agrícola mejor adaptada a las condiciones particulares del entorno.

El desarrollo de EMA con tecnologías de bajo costo, como las plataformas Arduino y módulos de comunicación inalámbrica, permite superar las barreras económicas que tradicionalmente han limitado su adopción en explotaciones de pequeña escala. Como se describe en [1] y [4], diversos estudios han demostrado la viabilidad técnica y económica de estos sistemas para aplicaciones agrícolas, integrando sensores de variables clave, paneles solares y comunicación Wi-Fi o por radiofrecuencia. Su diseño modular y replicable facilita la transferencia tecnológica a contextos rurales, promoviendo la digitalización del agro mediante soluciones accesibles, eficientes y adaptadas a las necesidades locales.

Capítulo 3 Diseño e implementación del Prototipo

3.1 Introducción

En este capítulo se darán a conocer las variables a medir y los materiales utilizados para llevar a cabo el diseño del prototipo de una EMA. Estos se escogieron según su disponibilidad dentro del laboratorio, disposición en el mercado, costo y su capacidad para realizar las tareas requeridas. También se presenta el diseño de la EMA desarrollada en conjunto con las pruebas correspondientes al funcionamiento de los dispositivos seleccionados y configurados a través de la plataforma Arduino IDE.

3.2 Variables a medir

Según lo expuesto en el marco teórico, aunque muchas estaciones comparten variables, su selección depende del tipo de aplicación. En este caso, se diseñó una EMA agrícola, de tipo microescala. Se eligieron variables como temperatura, humedad, presión atmosférica, presencia y cantidad de lluvia, radiación UV, y velocidad y dirección del viento, ya que influyen directamente en el desarrollo y salud de los cultivos. Estas afectan procesos como la fotosíntesis, disponibilidad hídrica, aparición de plagas, evaporación del suelo, propagación de enfermedades y daños mecánicos por vientos intensos.

Además, se incorporan variables de latitud, longitud, altitud, dirección, número de satélites visibles y HDOP mediante GPS, lo que permite asociar los datos meteorológicos con ubicaciones precisas. Esto es especialmente útil en terrenos extensos o con variaciones topográficas, donde las condiciones climáticas pueden diferir significativamente entre zonas.

3.3 Componentes

La selección de sensores y dispositivos se fundamenta en las variables a medir, la capacidad funcional de los componentes, el respaldo de la literatura y su bajo costo relativo. Por ello, se seleccionaron sensores adecuados para medir este y otros parámetros ambientales relevantes.

En sistemas electrónicos e IoT, el ESP8266 se destaca por su conectividad Wi-Fi y compatibilidad con protocolos como TCP/IP, UDP, HTTP y MQTT. Cabe destacar que el ESP8266

puede operar en modo Access Point (AP), permitiendo que otros dispositivos se conecten directamente a él mediante Wi-Fi sin requerir un router externo. Por otro lado, el protocolo UDP permite una comunicación rápida entre dispositivos, sin verificación de entrega.

El ESP8266 es un SoC con MCU de 32 bits, Wi-Fi a 2.4 GHz, ~50 kB de RAM, un ADC de 10 bits y 17 pines GPIO. No cuenta con almacenamiento interno, pero opera de forma autónoma como microcontrolador.

En este proyecto se emplea el módulo NodeMCU basado en el ESP8266, ilustrado en la Fig. 3.1, el cual permite desarrollar aplicaciones IoT con conectividad Wi-Fi de forma simple y económica. Este incluye conectores de 4 pines, un chip USB-Serial integrado, entrada para batería Li-Po de 3.7 V con sistema de carga incorporado y se programa mediante un puerto Micro USB utilizando Arduino IDE.

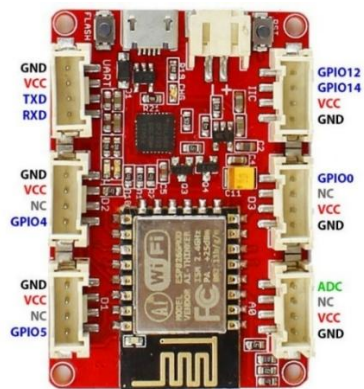


Fig. 3.1 Pinout del ESP8266 usado. Fuente: Elecrow.

Arduino Nano: Es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega328P, de tamaño compacto, completa y compatible con protoboards. Posee 14 pines digitales (6 PWM), 8 pines analógicos, un puerto serie por hardware, conexión mini-USB, conexión ICSP y un botón de reseteo. Dispone de las mismas capacidades que un Arduino UNO, tanto en potencia del microcontrolador como en conectividad. En este proyecto se utiliza un Arduino Nano, mostrado en la Fig. 3.2.

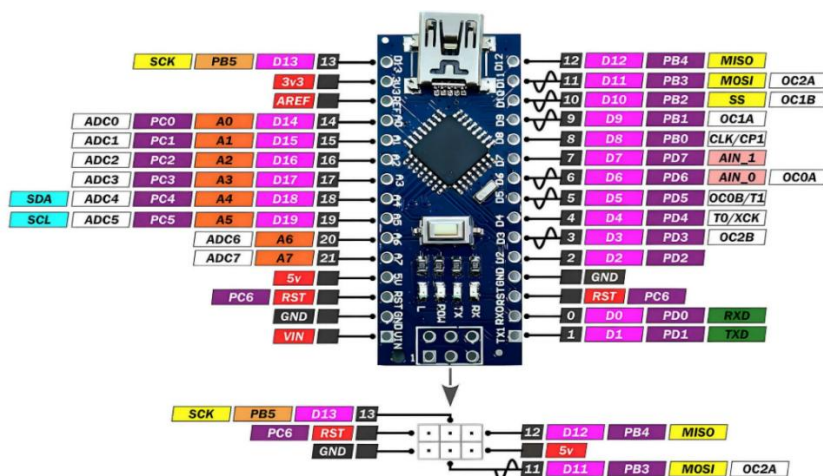


Fig. 3.2 Pinout del Arduino Nano. Fuente: Mischianti.

La elección de este microcontrolador se basa en su tamaño compacto, facilidad de programación mediante Arduino IDE, capacidad para manejar sensores analógicos sin hardware adicional, bajo costo y disponibilidad de entradas analógicas.

La temperatura es un factor clave en el desarrollo y distribución de los cultivos. Su monitoreo permite planificar mejor las actividades agrícolas [22]. En función de esta necesidad, se integró el siguiente sensor:

Sensor DHT11 2.0: Representado en la Fig. 3.3, mide temperatura y humedad relativa del aire mediante un sensor capacitivo y un termistor, entregando los datos como señal digital para su monitoreo ambiental.



Fig. 3.3 Sensor DHT11.

Sensor UV ML8511: Mide la intensidad de radiación ultravioleta (UV-A y parte de UV-B) en el rango de 280 a 390 nm. Posee una corriente de operación entre 300 μ A a 500 μ A, y voltaje de operación de 3.0 V a 3.6 V. Este funciona mediante un fotodiodo que emite una señal analógica proporcional a la intensidad de rayos UV en mW/cm^2 , lo que permite un monitoreo eficaz de la exposición solar. El componente empleado se presenta en Fig. 3.4.



Fig. 3.4 Sensor ML8511.

Sensor de lluvia FC-37: Utiliza pistas conductoras entrelazadas que, al mojarse, permiten el paso de corriente, indicando la presencia de lluvia. Incorpora un comparador LM393 que genera una señal digital o analógica según la cantidad de agua detectada. El umbral de activación puede ajustarse mediante un potenciómetro en la placa, facilitando su calibración para diferentes niveles de sensibilidad. El componente implementado se identifica en la figura 3.5.



Fig. 3.5 Sensor de lluvia YL-83 FC-37 y Chip Comparador LM393.

Sensor BMP180: Sensor barométrico de bajo consumo, con rango de 300 a 1100 hPa y precisión de hasta 0.02 hPa. Usa tecnología piezo-resistiva para alta precisión, linealidad y estabilidad. Funciona con 1.8 a 3.6 V y se comunica vía I2C. El componente empleado se presenta en Fig. 3.6.

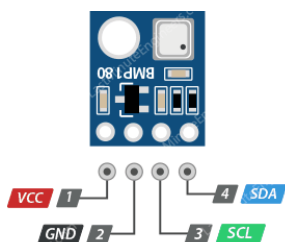


Fig. 3.6 Pinout del sensor BMP180. Fuente: Last Minute ENGINEERS.

GPS Ublox NEO-6M: Módulo compatible con Arduino, basado en el receptor NEO-6M y sistema de coordenadas WGS-84. Incluye antena cerámica activa integrada, opera con 3.0–5.0 V y señales de 3.3 V. Usa comunicación serial, cuenta con LED indicador y puede guardar configuraciones en EEPROM. Tiene un tiempo promedio de inicio de 35 segundos. El componente utilizado corresponde al mostrado en Fig. 3.7.

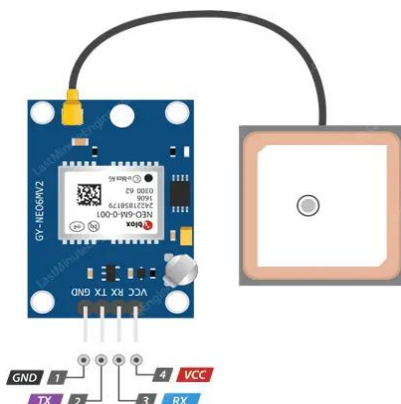


Fig. 3.7 Pinout del GPS Ublox NEO-6M. Fuente: Last Minute ENGINEERS.

Pantalla LCD 16x2 I2C: Dispositivo de visualización que muestra 2x16 caracteres con corriente de operación cuando está iluminado de 40mA. Utiliza la interfaz I2C para comunicarse con un microcontrolador, simplificando la conexión y permitiendo controlar el LCD con solo dos pines del microcontrolador. Funciona con 5V DC. El componente implementado se identifica en Fig. 3.8.



Fig. 3.8 Pinout del módulo I2C LCD. Fuente: Last Minute ENGINEERS.

Pluviómetro digital de cubeta basculante: La medición de precipitación se efectúa mediante un pluviómetro de cubeta basculante SparkFun SEN-15901, mostrado en la Fig. 3.9. Su mecanismo consta de un sistema de vaciado automático después de cada medición, lo que garantiza lecturas continuas sin intervención manual. La señal generada por el interruptor de lengüeta puede ser registrada por un microcontrolador o contador digital, facilitando la integración con sistemas de monitoreo meteorológico. Además, el sensor se conecta mediante un cable terminado en RJ11, lo que simplifica su instalación y conexión con otros componentes del sistema.



Fig. 3.9 Pluviómetro digital. Fuente: MCI Electronics.

Anemómetro: Para medir velocidad del viento se implementa un anemómetro de cazoletas, ilustrado en la Fig. 3.10. Estas giran alrededor de un eje central cuando son impulsadas por el viento, el movimiento rotatorio hace que un imán interno pase repetidamente frente a un interruptor magnético tipo reed (interruptor de lengüeta), cerrando el circuito en cada vuelta completa. Este cierre genera una señal eléctrica que puede ser detectada y medida. Específicamente, una velocidad del viento de 2.4 km/h (aproximadamente 0.67 m/s) provoca un cierre del interruptor por segundo. Esta relación permite calcular la velocidad del viento contando la frecuencia de los pulsos generados.

Es importante destacar que este sensor no contiene componentes electrónicos activos; en su lugar, emplea un sistema pasivo de imán e interruptor reed. Por lo tanto, requiere una fuente de voltaje externa para su funcionamiento y para generar la señal de salida.



Fig. 3.10 Anemómetro. Fuente: MCI Electronics.

Veleta: La dirección del viento se obtiene mediante una veleta analógica, mostrada en la Fig. 3.11. Esta internamente cuenta con 8 reed switches, cada uno conectado a una resistencia de valor único. Al girar, el imán adherido al eje de la veleta puede activar uno o dos interruptores simultáneamente, dando lugar a 16 combinaciones distintas las que representan las siguientes direcciones del viento:

Direcciones cardinales: Norte (N), Sur (S), Este (E), Oeste (O).

Direcciones intercardinales: Noreste (NE), Sureste (SE), Suroeste (SO), Noroeste (NO).

Direcciones intercardinales menores: Nor-noreste (NNE), Este-noreste (ENE), Este-sureste (ESE), Sur-sureste (SSE), Sur-suroeste (SSO), Oeste-suroeste (OSO), Oeste-noroeste (ONO), Nor-noroeste (NNO).

Su diseño permite identificar con una resolución de 22.5° la dirección del viento sin necesidad de componentes electrónicos activos dentro del sensor, manteniendo un consumo mínimo y una integración sencilla con sistemas embebidos.



Fig. 3.11 Veleta. Fuente: MCI Electronics.

Panel solar monocristalino: Tipo de tecnología que ofrece una mayor eficiencia de conversión (hasta 13,85%) y un mejor desempeño en condiciones de baja radiación en comparación con los paneles policristalinos. Dado que el espacio disponible es limitado y la continuidad energética es fundamental para el sistema, la mayor densidad de potencia y estabilidad del panel monocristalino lo convierten en la opción más adecuada para garantizar una captación energética suficiente en distintos escenarios ambientales. Cabe mencionar que el módulo implementado, presente en Fig. 3.12 se encuentra certificado para soportar altas cargas de viento (2400 Pascal).



Fig. 3.12 Panel Solar 20W 12V Monocristalino. Fuente: Solarstorm.

Módulo de gestión y carga MCP73871: La gestión energética se realiza con el cargador lineal para dispositivos portátiles y sistemas de instrumentación remota de la Fig. 3.13, debido a su simplicidad de integración, estabilidad operativa y bajo costo. Este permite la carga segura de baterías de litio de 3.7 V y dispone de una arquitectura de power-path, que administra de manera automática la prioridad entre la energía proveniente del panel solar y la batería.

Si bien por tratarse de un cargador lineal su eficiencia depende directamente de la diferencia entre la tensión de entrada y la tensión de la batería, lo que implica valores menores que los alcanzados

por convertidores conmutados, su desempeño resulta adecuado para aplicaciones de bajo consumo y ciclos de carga moderados. La estabilidad térmica del MCP73871 durante la carga reduce la probabilidad de sobrecalentamiento y contribuye a prolongar la vida útil de la batería. Esto permite alimentar de forma confiable al ESP8266 y al Arduino Nano sin requerir circuitos de regulación más complejos o de mayor costo.



Fig. 3.13 Módulo de carga de batería MCP73871. Fuente: Micro Robotics.

Convertidor reductor (buck) LM2596: El componente de la figura 3.14 fue seleccionado para la etapa de regulación descendente debido a su alta eficiencia (superior al 80–90 %) y a su capacidad para entregar una tensión estable incluso en presencia de variaciones del panel solar. Este permite reducir el voltaje de entrada a un nivel seguro y constante, ya que alimentar directamente módulos sensibles como el cargador de batería sin una regulación previa podría generar inestabilidad, sobrecalentamiento o daños. Su capacidad para manejar corrientes de hasta 2 A continuas lo hace adecuado para entregar una señal limpia y estable al módulo cargador de batería, mejorando la confiabilidad del sistema en condiciones ambientales variables.



Fig. 3.14 Módulo step-down LM2596. Fuente: Altronics.

Convertidor elevador (boost) MT3608: El componente presente en la figura 3.15 es utilizado para aumentar la tensión proveniente del módulo cargador de batería (normalmente ~3.7–4.2 V) hacia los niveles requeridos por dispositivos como el Arduino Nano que necesita una entrada regulada en torno a 7–9 V cuando se alimenta por su pin VIN. Este ofrece una solución compacta, económica y eficiente (85%-93%) para obtener este voltaje elevado sin necesidad de aumentar el tamaño o número de baterías. Además, tiene un rango de entrada amplio y soporta corrientes adecuadas para alimentar microcontroladores y sensores sin comprometer la estabilidad del sistema.



Fig. 3.15 Convertidor boost step-up MT3608. Fuente: MechatronicStore.

3.4 Principio de operación y conexión de sensores mecánicos

Antes de integrar la veleta, el pluviómetro y el anemómetro al sistema completo, se realizaron pruebas individuales con cada uno de ellos, lo que validó sus salidas eléctricas y ajustar el código necesario para su lectura. Luego, los circuitos correspondientes a la veleta y el anemómetro fueron unificados como se expone a continuación en Fig. 3.16.

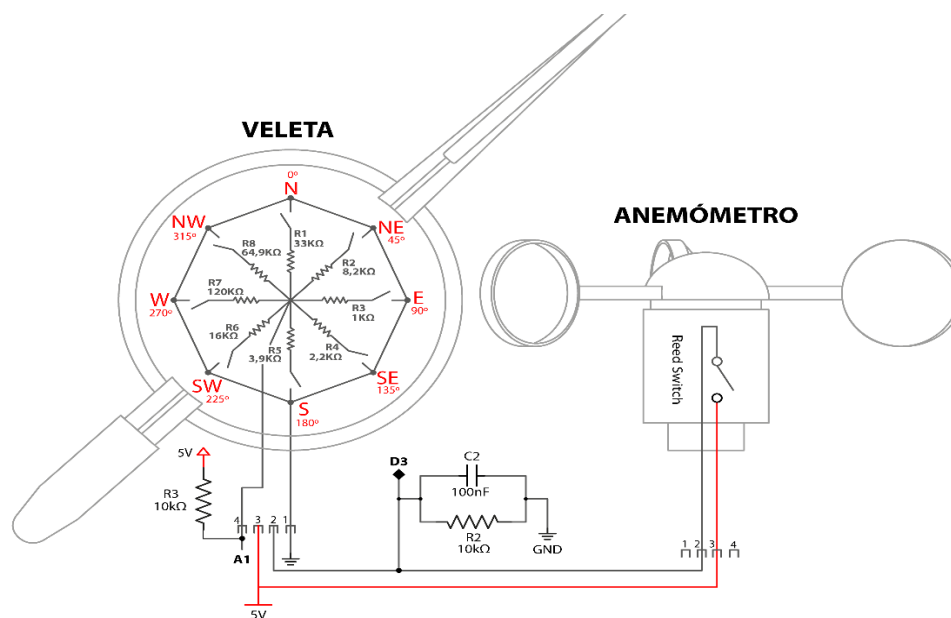


Fig. 3.16 Conexión veleta y anemómetro.

El esquema en Fig. 3.16 ilustra la conexión de dos sensores meteorológicos, diseñados para trabajar con un microcontrolador, cuya conexión es a través de un RJ11 de 4 pines. Para la veleta se utiliza un divisor de voltaje con una resistencia externa de 10 k Ω a 5V, que transforma las distintas combinaciones de resistencias internas (activadas según la dirección del viento) en un valor de voltaje analógico. Este voltaje puede ser leído por un pin analógico del microcontrolador, permitiendo identificar con precisión cada dirección cardinal o intermedia al generar un voltaje único, facilitando la interpretación del dato sin necesidad de componentes digitales adicionales.

En el caso del anemómetro, cada vez que el reed switch se activa genera un pulso eléctrico que es registrado por el microcontrolador mediante una interrupción, y es precisamente la frecuencia con que estos pulsos ocurren la que se relaciona directamente con la velocidad del viento. Para mitigar posibles rebotes eléctricos y reducir el ruido generado por el reed switch, se incorpora un filtro RC compuesto por una resistencia de 10 k Ω (R2) y un condensador cerámico de 100 nF (C2), valores seleccionados según las recomendaciones del fabricante. Esto se debe a que, cada vez que el imán pasa cerca del reed switch, este puede abrirse y cerrarse rápidamente varias veces debido a vibraciones mecánicas o interferencias eléctricas, produciendo múltiples pulsos falsos. El filtro RC actúa como un sistema de amortiguación que estabiliza la señal, permitiendo que el microcontrolador registre un pulso limpio y confiable por cada rotación completa del anemómetro. A continuación, se determina la constante de tiempo que genera el filtro y la frecuencia de corte:

$$\begin{aligned}\tau &= R * C = 10000 * 0.0000001 = 0.001s = 1ms \\ f_c &= \left(\frac{1}{2\pi RC} \right) \approx \left(\frac{1}{2\pi 0.001} \right) \approx 159Hz\end{aligned}\quad (1)$$

De la ecuación (1), los pulsos menores a 1ms se suavizan y como el anemómetro genera 2 pulsos/vuelta, la señal se encuentra por debajo del filtro, por lo que la eliminación no distorsiona los pulsos de viento.

Con lo comentado anteriormente, se puede escribir la ecuación (2) que representa a la tensión de salida de la veleta, siendo el voltaje dependiente del valor de resistencia en cada posición.

$$V_{OUT} = I \cdot R_{variable} = \frac{V_{IN} \cdot R_{variable}}{R_{variable} + R_{externa}} \quad (2)$$

Se determinó el valor DC en cada posición mediante un cálculo basado en la proporcionalidad directa e inversa, considerando además que el voltaje de referencia del ADC es de 5 V. En otras palabras, para cada voltaje V , se aplica la siguiente relación:

$$Valor_{DC} = \frac{V}{5} * 1023 \quad (3)$$

Así, utilizando (2) y (3) se generó la Tabla 3.1 que presenta la correspondencia entre las direcciones del viento, los valores de resistencia equivalentes generados por la combinación de resistencias internas de la veleta, y los voltajes resultantes en el divisor de tensión configurado. La columna “Output (V=5V, R=10k)” indica el voltaje teórico que puede ser leído por un pin analógico

del microcontrolador, y la columna “DC” representa el valor digital correspondiente que entregaría un convertidor analógico-digital (ADC) de 10 bits (resolución de 0 a 1023).

TABLA 3.1 Valores de salida teóricos de voltaje para la veleta según la dirección del viento

Grados (°)	Dirección	Resistencia	Valor (K Ω)	Output (V=5V, R=10k)	DC
0	N	R1	33	3,84	785,664
22,5	NNE	R1 R2	6,57	1,98	405,108
45	NE	R2	8,2	2,25	460,35
67,5	ENE	R2 R3	0,891	0,41	83,886
90	E	R3	1	0,45	92,07
112,5	ESE	R3 R4	0,688	0,32	65,472
135	SE	R4	2,2	0,9	184,14
157,5	SSE	R4 R5	1,41	0,62	126,852
180	S	R5	3,9	1,4	286,44
202,5	SSO	R5 R6	3,14	1,19	243,474
225	SO	R6	16	3,08	630,168
247,5	OSO	R6 R7	14,12	2,93	599,478
270	O	R7	120	4,62	945,252
292,5	ONO	R7 R8	42,12	4,04	826,584
315	NO	R8	64,9	4,78	977,988
337,5	NNO	R8 R1	21,88	3,43	701,778

Debido a que el principio de funcionamiento de la veleta se basa en un número finito de combinaciones discretas de interruptores reed (resistencias de valores fijos), no es posible obtener ángulos con resoluciones menores a 22.5°. Esto se debe a que la salida eléctrica del sensor es de naturaleza discreta y no continua, específicamente dentro de cada intervalo angular no existe variación de la señal que permita interpolar el ángulo. En consecuencia, el conversor analógico digital únicamente digitaliza niveles de tensión constantes, quedando la resolución determinada por el diseño físico del sensor.

En la Fig. 3.17 se pueden apreciar los componentes internos del pluviómetro, principalmente los dos recipientes montados en un balancín, que actúa por medio de un sensor electromecánico. A medida que la lluvia se acumula en uno de los recipientes, el peso del agua provoca que el balancín se incline, vaciando el contenido y generando un impulso eléctrico mediante un interruptor de lengüeta magnético sellado. Cada inclinación del balancín corresponde a una precipitación de 0.2794 mm.

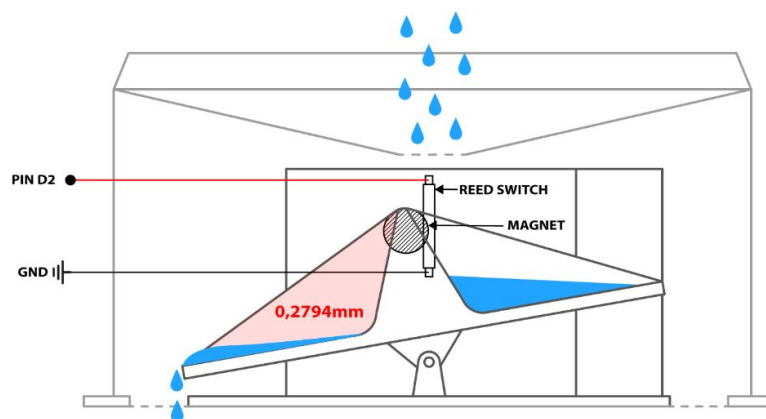


Fig. 3.17 Funcionamiento interno del pluviómetro.

La ilustración en Fig. 3.18 representa de forma sencilla la relación de las unidades de medida. Para explicarlo en el ejemplo, se utiliza un recipiente de 1 metro por 1 metro de superficie, es decir, un área de 1 metro cuadrado. Al verter 1 litro de agua sobre esta superficie, el nivel del agua sube exactamente 1 milímetro, siendo el milímetro, la unidad de medida que se utiliza comúnmente para expresar la precipitación en los reportes meteorológicos.

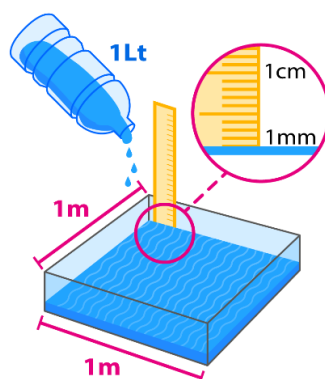


Fig. 3.18 Relación L/m² con mm de precipitación.

3.5 Diseño de la Estructura General

El sistema consta de dos nodos inalámbricos en una configuración de comunicación punto a punto: un nodo transmisor con todos los sensores meteorológicos y un nodo receptor con una pantalla para mostrar los datos recibidos. En el nodo de transmisión, se tiene un módulo ESP8266 comunicado con el Arduino Nano junto con la incorporación de los sensores DHT11, BMP180, sensor UV ML8511, sensor de nivel de agua, pluviómetro, anemómetro, veleta y el GPS NEO-6M. El nodo transmisor realiza lecturas de todos sus sensores y envía los datos de forma inalámbrica a la plataforma Adafruit IO [52].

A continuación, en Fig. 3.19 se presenta el diagrama de bloques general propuesto para la estación meteorológica.

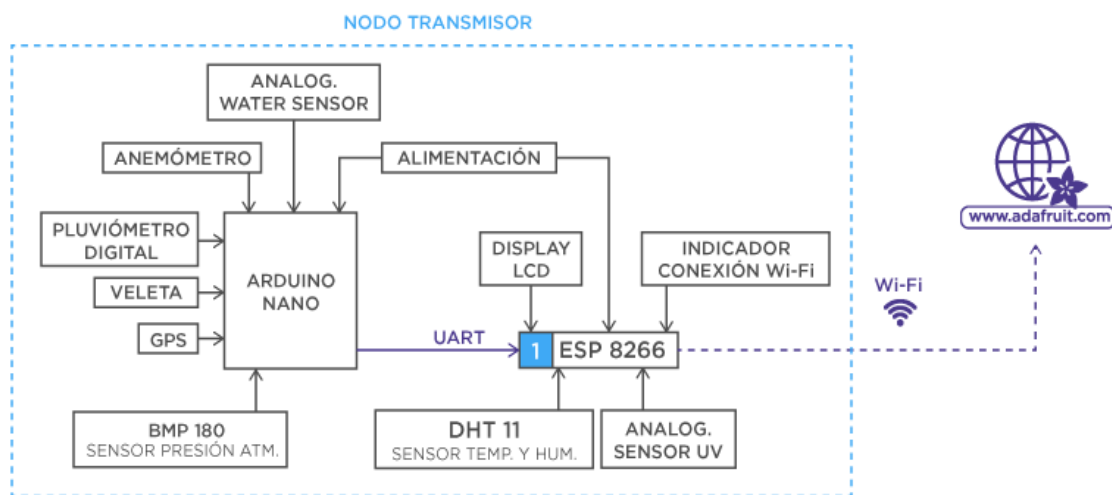


Fig. 3.19 Diagrama de bloques de la EMA propuesta.

La comunicación de los sensores DHT11 y ML8511 a la EMA es de tipo Estrella, pues se comunican directamente con el nodo transmisor de la EMA mediante una interfaz cableada. De esta forma, aunque una de las conexiones de los sensores falle, los demás seguirán funcionando. Por otro lado, el Arduino nano y el ESP transmisor tiene una comunicación de punto a punto por medio de una conexión universal asynchronous receiver/transmitter (UART), debido a la disponibilidad de los pines y a que el módulo posee solo un puerto analógico. Mientras tanto, el Arduino nano recibe los datos de los distintos dispositivos por conexión directa tipo estrella. En la Fig. 3.20 se puede observar el esquema de conexión del nodo transmisor.

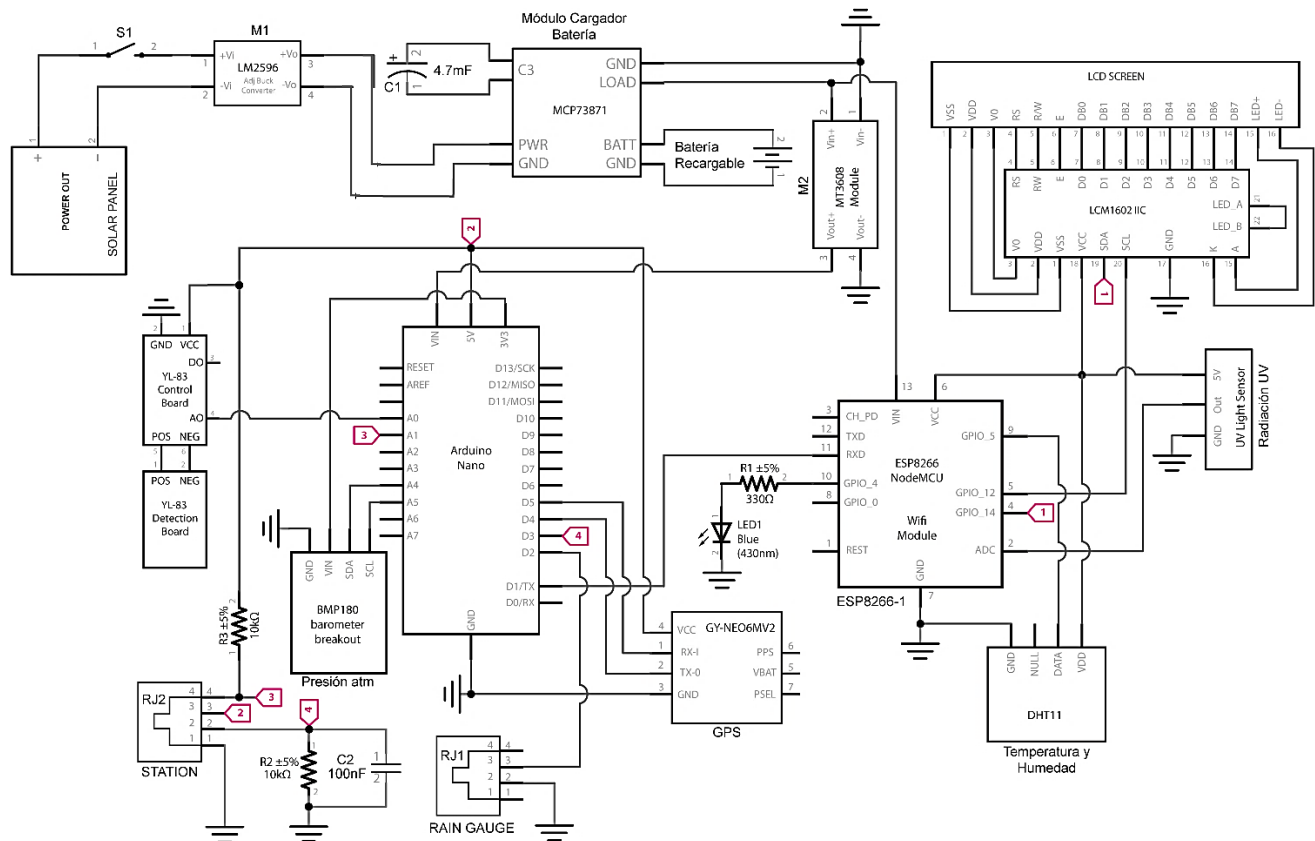


Fig. 3.20 Esquema de conexión transmisor de la EMA.

Como el Arduino Nano dispone de más pines analógicos el pluviómetro, anemómetro y la veleta se conectan aquí para ser leídos de la misma forma que en Fig. 3.16. Además, como el Arduino recibe los datos del GPS, el pin TX del GPS se conecta al RX del Arduino recibiendo los datos sin necesidad de realizar una conversión de niveles, porque este reconoce los 3.3 volts como nivel alto. Cabe mencionar que la comunicación que se realiza es unidireccional, ya que no se considera necesario que el Arduino reciba datos del ESP8266. Es importante destacar que las tierras del Arduino y el ESP8266 deben estar interconectadas para que los datos transmitidos y recibidos sean interpretados correctamente. Esto ayuda a reducir el ruido eléctrico y evita problemas de circulación indebida de corriente eléctrica a través de la puesta a tierra.

Se propone además la incorporación de una pantalla LCD 16x2, para mostrar mensajes correspondientes al envío de los datos o algún error que pudiese haber en la transmisión desde el Arduino al ESP8266.

El sistema de alimentación se encuentra formado por un conjunto de elementos: panel solar, diodo, un módulo cargador de batería, batería recargable, convertidor MT3608 y convertidor LM2596.

Este sistema se encarga de alimentar el Arduino nano y al ESP8266. En este caso el panel incorpora un diodo conectado en paralelo para evitar que la corriente se invierta y dañe las celdas, sobre todo cuando en condiciones de baja luz o sombra, el panel puede convertirse en una carga en lugar de generar energía si se conecta con otro módulo. Esto ayuda a mantener el rendimiento general del panel y proteger contra sobretensiones que pueden ocurrir debido a condiciones climáticas extremas o fallos en el sistema.

Se planea que la transmisión de los datos sea por medio de conexión Wi-Fi, lo que simplifica el uso de protocolos comunes como HTTP y MQTT, permitiendo una comunicación sencilla y funcional entre dispositivos. Cabe destacar que el esquema presentado se encuentra sujeto a cambios a medida que se requiera implementar más elementos que permitan un mejor funcionamiento de la estación.

3.6 Diseño del Sistema de Alimentación

El sistema de alimentación constituye un elemento crítico en el diseño y operación de la estación meteorológica, ya que permite garantizar su funcionamiento continuo en condiciones de campo. Para responder a este requisito, se implementó una solución basada en energía solar, complementada con almacenamiento mediante una batería recargable. Esta configuración asegura una fuente energética limpia, renovable y de bajo mantenimiento, capaz de sostener la operación de los distintos módulos durante periodos prolongados sin intervención externa.

Con el fin de dimensionar adecuadamente el sistema fotovoltaico se utilizó como referencia [42], [43] y [44]. A partir de esto, se determinó el consumo energético diario de cada uno de los componentes conectados. La Tabla 3.2 presenta el desglose del consumo energético diario requerido por cada dispositivo, considerando una operación continua de 24 horas.

TABLA 3.2 Consumo energético diario de los componentes del sistema

Componente/Carga	I Operación [mA]	Vin [V]	P unitaria [W]	Horas/día	Consumo/día [Wh/día]
Arduino nano	98	7	0,686	24	16,464
GPS Ublox NEO-6M	50	5	0,25	24	6
Sensor BMP180	0,032	3,3	0,0001056	24	0,0025344
Sensor de lluvia YL-83	15	5	0,075	24	1,8
Anemómetro	0,5	5	0,0025	24	0,06
Pluviómetro	0,5	5	0,0025	24	0,06
Veleta	0,468	5	0,00234	24	0,05616
ESP8266 Node MCU 2.0	93,2	3,7	0,34484	24	8,27616
Sensor DHT11	2	3,3	0,0066	24	0,1584
Sensor ML8511	0,3	3,3	0,00099	24	0,02376
Display LCD 16x2	50	3,3	0,165	24	3,96
Total	310	-	1,5358756	-	36,86

Los valores mostrados fueron obtenidos a partir de las hojas de datos de cada sensor y módulo, complementados con mediciones experimentales realizadas durante el desarrollo. La potencia unitaria se calculó multiplicando el voltaje de operación por la corriente de consumo, mientras que la energía diaria se obtuvo multiplicando dicha potencia por las horas de funcionamiento.

Para estimar la energía disponible mediante paneles solares, se utilizó la herramienta Explorador Solar del Gobierno de Chile [43], que entrega promedios mensuales de radiación global, directa y difusa sobre un plano horizontal. La Tabla 3.3 contiene los valores correspondientes a la ciudad de Concepción.

TABLA 3.3 Promedio mensual de la radiación incidente en el plano con inclinación igual a la latitud del sitio [kwh/m2/día]

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Directa	5.69	5.68	5.45	4.17	2.78	2.39	2.27	2.81	3.99	4.32	4.98	5.3
Difusa	1.38	1.21	0.96	0.79	0.6	0.52	0.55	0.75	1.11	1.5	1.69	1.61
Suelo	0.2	0.17	0.13	0.09	0.05	0.04	0.04	0.06	0.1	0.14	0.18	0.2
Global	7.27	7.06	6.54	5.05	3.43	2.95	2.86	3.62	5.2	5.96	6.85	7.11

Fuente: Explorador Solar, Reporte de Recursos Meteorológicos.

En el cálculo del sistema fotovoltaico se consideró la radiación global incidente sobre un panel inclinado según la latitud del sitio, debido a que esta magnitud integra la radiación directa, difusa y reflejada, y corresponde a la configuración estándar para maximizar la captación anual de energía.

Para considerar el peor escenario operacional, se empleó el mes con menor radiación global (julio), cuyo valor es de 2,86 [kWh/m²/día], equivalente a las Horas de Sol Pico (HSP). A partir de este dato, la potencia necesaria del panel se determinó mediante la ecuación (4). Para un requerimiento energético diario de 36,86 [Wh], el cálculo entrega un valor aproximado de 12,89 [W]. Luego, se aplicó un margen de seguridad del 30% para contemplar pérdidas por temperatura, suciedad, degradación, cableado, orientación imperfecta y tolerancias de fabricación, obteniéndose una potencia corregida de 18,41 [W].

$$Potencia\ Paneles\ (W) = \frac{Energía\ diaria\ (Wh)}{HSP} \quad (4)$$

Dado que los paneles comerciales disponibles más cercanos a dicho valor corresponden a módulos de 20 W 12 V, se seleccionó esta opción y se integró un convertidor reductor para adaptar el voltaje del panel a niveles seguros para los componentes electrónicos. Este módulo se complementó con un circuito cargador encargado de regular la carga de la batería, la cual actúa como reserva energética ante ausencia de luz solar. Asimismo, se añadió un convertidor elevador para garantizar un voltaje estable hacia el Arduino Nano. La estructura anterior puede observarse en la Fig. 3.21.

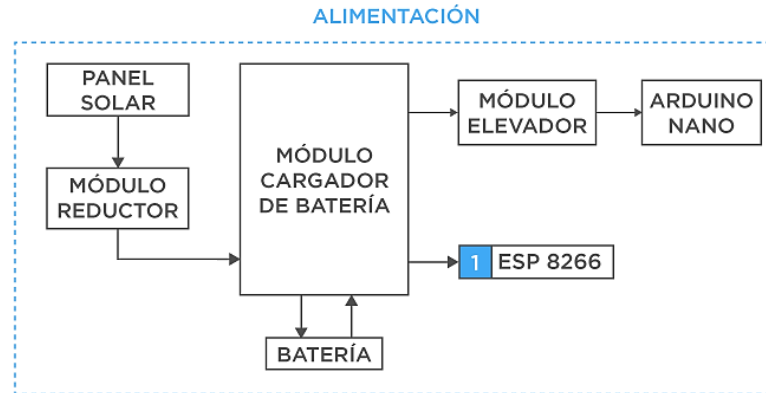


Fig. 3.21 Diagrama de bloques alimentación nodo transmisor.

Para el dimensionamiento del banco de baterías se requiere determinar la energía mínima que debe ser almacenada para mantener la operación del sistema en ausencia de aporte solar. Este proceso se realizó aplicando la ecuación (5), en la cual el parámetro η representa la eficiencia global del sistema y agrupa las pérdidas propias de los convertidores DC-DC, reguladores y elementos del cableado.

$$Capacidad\ Batería\ (Ah) = \frac{Consumo\ diario(Wh) * Días\ autonomía}{Voltaje\ (V) * Profundidad\ de\ descarga\ (DoD) * \eta} \quad (5)$$

En la formula anterior se consideró una profundidad máxima de descarga (DoD) del 80%, valor comúnmente recomendado para baterías de ion-litio en aplicaciones estacionarias, ya que evita el envejecimiento prematuro asociado a ciclos completos de descarga. De este modo, en los cálculos se asumió como utilizable solo el 80 % de la capacidad nominal.

La eficiencia global del sistema se modeló mediante un factor $\eta = 0,85$, que integra las pérdidas en el regulador de carga, los convertidores DC-DC y el cableado del sistema. Este valor se encuentra dentro del rango típico reportado para convertidores comerciales (85-95 %), entregando un margen adicional de seguridad en la estimación de la capacidad necesaria del banco de baterías.

Aplicando estos criterios y utilizando una tensión nominal de 3,7 V, se obtuvo un requerimiento de 14,65 Ah (14.650 mAh). Considerando que en el laboratorio se disponía de baterías tipo 18650 de ion-litio con 6.800 mAh nominales, se evaluó inicialmente el uso de 3 baterías en paralelo, configuración que teóricamente entregaba una capacidad combinada de 20.400 mAh, suficiente según los cálculos realizados.

Con el objetivo de determinar la capacidad efectiva real de las celdas disponibles, se realizó un ensayo de autonomía bajo condiciones reales. El procedimiento consistió en alimentar el prototipo únicamente desde la batería y registrar el tiempo de funcionamiento continuo hasta el apagado. En una primera instancia, la prueba con tres celdas en paralelo, no obtuvo resultados satisfactorios en términos de autonomía. Posteriormente, el ensayo se repitió incrementando el número de celdas a seis baterías en paralelo (1S6P), obteniendo una autonomía de aproximadamente 9-10 horas, lo que permitió evidenciar que la capacidad efectiva de las celdas es considerablemente inferior a la declarada por el fabricante.

A partir de los resultados experimentales y considerando las restricciones de disponibilidad del laboratorio, no se continuó con el aumento del número de celdas. En consecuencia, se definió la configuración de seis baterías en paralelo, tomando en consideración que la autonomía obtenida es suficiente para la ejecución de los ensayos requeridos.

3.7 Diseño de la carcasa y soportes modulares

La Fig. 3.22 presenta la propuesta de diseño seleccionada para la carcasa de la EMA. Este modelo fue escogido por su estructura compacta, simple y adecuada para las etapas iniciales de

integración de sensores. Su geometría facilita el montaje, la verificación del flujo de datos y la incorporación ordenada de los componentes electrónicos.

La fabricación de las piezas presentadas en el diseño fue realizada mediante impresión 3D, utilizando dos equipos en distintos laboratorios, según el tipo de componente y la etapa del proyecto. En el Laboratorio de Optoelectrónica (LabOE) se empleó la impresora Bambu Lab P1S, mientras que en el Laboratorio de Redes y Sistemas Inteligentes (Lab Redsis) se utilizó la Creality Ender-3 S1.

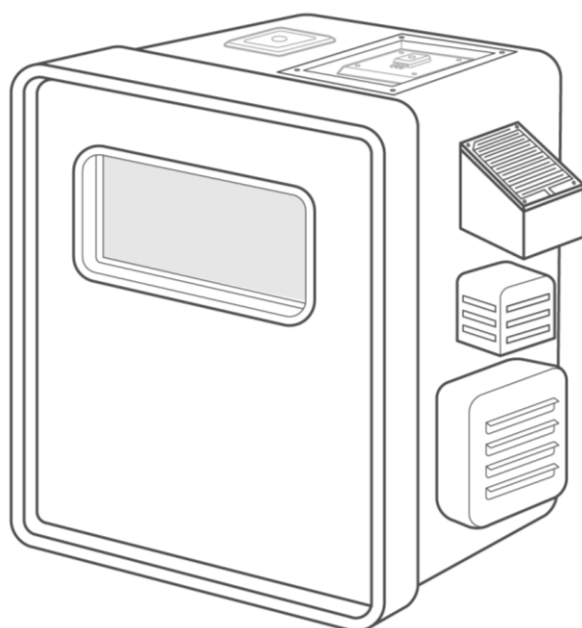


Fig. 3.22 Propuesta referencial de diseño para la carcasa de la EMA.

El diseño de la Fig. 3.22 permite realizar modificaciones sucesivas sin incrementar significativamente el tiempo ni el consumo de materiales durante la fase de prototipado. El frontal de acrílico puede ser reemplazado en el futuro por otros materiales con mejores propiedades ópticas, manteniendo la misma compatibilidad estructural y la posibilidad de integrar mejoras adicionales conforme avance el desarrollo del proyecto.

La Fig. 3.23 describe la distribución interna propuesta para los componentes dentro de la carcasa de la EMA.

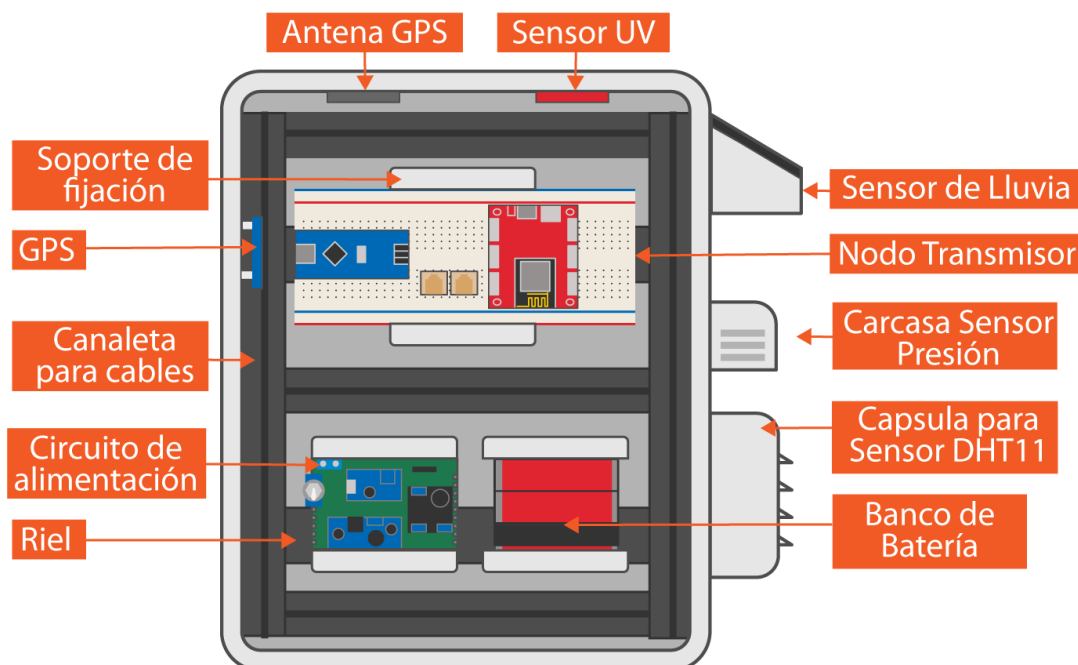


Fig. 3.23 Distribución interna referencial de la EMA.

La organización en la Fig. 3.23 se definió por niveles, priorizando el orden, la accesibilidad y el funcionamiento adecuado de cada módulo. En la parte superior se ubican los sensores expuestos al ambiente (UV y lluvia) junto con la antena GPS, colocados en una posición elevada para minimizar interferencias. Debajo de ellos se instaló el módulo GPS y el soporte de fijación de la placa principal, lo que facilita el montaje y el mantenimiento.

En la sección inferior se dispuso el sistema de alimentación, compuesto por el circuito regulador y el banco de baterías con su soporte correspondiente. La carcasa incorpora además canaletas internas para ordenar y proteger el cableado.

Para evitar efectos del calor interno y asegurar mediciones precisas, los sensores de presión, temperatura y humedad se instalaron de manera independiente en un lateral ventilado de la carcasa. Esta ubicación permite igualar la presión interna con la del ambiente, mantener adecuada circulación de aire y reducir errores asociados a la acumulación térmica. A continuación, la Fig. 3.24 presenta el modelado de las carcasas para los sensores externos realizadas en Fusion360.

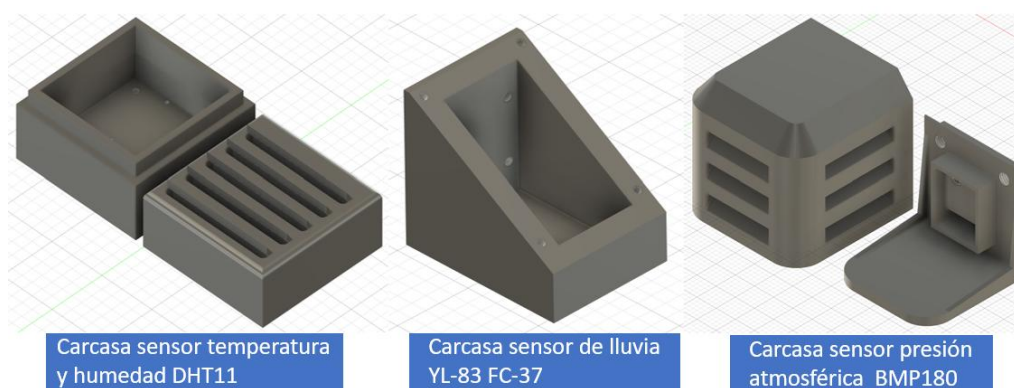


Fig. 3.24 Modelos 3D para sensores externos.

Finalmente, en la figura 3.25 se expone el modelo de la estructura con todas sus piezas integradas en Blender, que permite visualizar en 3D la disposición real de los componentes de forma sencilla, verificar dimensiones, alineaciones y compatibilidades entre piezas, y detectar posibles interferencias antes de la fabricación.



Fig. 3.25 Vistas del modelo 3D con las piezas impresas integradas.

Cabe destacar que todas las piezas expuestas de manera directa al ambiente exterior fueron planificadas para ser fabricadas en Tereftalato de Polietileno Glicolado (PETG), al igual que los soportes de fijación. Este material se seleccionó por su mayor resistencia mecánica y térmica, menor absorción de humedad y mejor estabilidad frente a la radiación UV en comparación con el Ácido Poliláctico (PLA), asegurando así una mayor durabilidad en condiciones ambientales reales.

Por otro lado, el riel y la canaleta para cables, se imprimieron en PLA, dado que se encuentran en el interior de la caja, sin exposición directa a radiación solar o humedad, y su función es únicamente de soporte y ordenamiento interno.

3.7.1 Soportes estructurales

El diseño de los soportes del mástil y del panel solar se desarrolló considerando las exigencias mecánicas, ambientales y operativas para una estación meteorológica ubicada a la intemperie. En este tipo de sistemas, los soportes constituyen un componente crítico, ya que determinan la estabilidad del conjunto y la calidad de las mediciones.

Soporte del mástil

El mástil se construyó utilizando perfiles galvanizados tipo metalcom, seleccionados por su adecuada relación peso–rigidez, su resistencia a la flexión y su durabilidad en ambientes exteriores. La geometría rectangular de estos perfiles contribuye a limitar la deformación por torsión y a mantener la alineación de los sensores frente a la acción del viento, lo cual es importante para garantizar lecturas consistentes del anemómetro y la veleta.

La estructura cuenta con una base tipo cuádrípode, diseñada para aumentar la superficie de apoyo y distribuir de forma más uniforme las cargas. Esta configuración reduce el riesgo de vuelco al mantener un centro de gravedad bajo y mejorar la estabilidad ante esfuerzos laterales producidos por ráfagas repentinas.

Para la altura se consideró que, al aumentar mucho el largo del mástil, la fuerza del viento actúa con mayor ventaja sobre la parte superior, generando una tendencia más marcada a que la estructura se incline en la base. Por esta razón, la altura total de la EMA fue de 1,73 m, resultante de una base estructural de 1,50 m más la elevación adicional aportada por la caja de electrónica y el tubo/soporte original del kit SparkFun (anemómetro, veleta y pluviómetro). Esta altura se encuentra dentro del rango típicamente empleado en estaciones de bajo costo y montajes compactos, con valores de 1,5 a 2,0 m, debido a las recomendaciones para sensores cercanos al suelo establecidas por la OMM. Además, mantener una altura dentro de ese rango permite que el mástil se mantenga lo suficientemente rígido para evitar desalineaciones de los sensores y reduce el riesgo de inclinaciones excesivas por acción del viento que puedan comprometer la estabilidad general del sistema.

Cabe mencionar que la altura de la base estructural (1,50 m) fue seleccionada con el objetivo de permitir el acceso directo al gabinete a un usuario de estatura promedio, facilitando las labores de inspección, mantenimiento y calibración.

Soporte del panel solar

El soporte del panel solar se diseñó como una estructura lateral independiente del eje del mástil, con el fin de mejorar su orientación y evitar interferencias con los sensores. Se incluyó un sistema de inclinación regulable de forma manual, que permite al usuario intercambiar entre dos posiciones ($\approx 30^\circ$ y $\approx 45^\circ$), estas fueron seleccionadas en función de recomendaciones de instalación para la latitud de Concepción. El ángulo de 30° optimiza el rendimiento en periodos con mayor altura solar, mientras que 45° aumenta la eficiencia durante meses de menor elevación solar. Para asegurar la estabilidad del panel, la estructura incorpora refuerzos diagonales que aumentan la rigidez y evitan deformaciones, considerando que el panel constituye la superficie más expuesta al viento del sistema.

A continuación, en la Fig. 3.26 se muestra la estructura completa incluyendo los soportes estructurales.



Fig. 3.26 Vistas de la integración de carcasa y estructura de soportes modulares.

La arquitectura modular del sistema fue diseñada para facilitar la sustitución o mejora de componentes individuales, ofreciendo así una alta flexibilidad y capacidad de expansión.

Cabe mencionar que la caja de derivación instalada en el mástil se implementó para alojar un cargador y un módem ZTE Mi-Fi 4G MF920U, necesarios para proporcionar conectividad móvil a la estación. Esto se debe a que, durante las pruebas en terreno, no se identificaron redes Wi-Fi con la calidad necesaria para garantizar una conexión confiable (con potencias de -80 a -95 dBm). La caja también cumple la función de resguardar las conexiones eléctricas, protegiéndolas de la intemperie y posibles daños.

3.8 Sistema de adquisición de datos y comunicación de la EMA

Este apartado presenta los diagramas de flujo desarrollados para estructurar la lógica de lectura de sensores y la comunicación, facilitando la implementación del sistema. A continuación, se presentan los diagramas de flujo siguiendo un orden secuencial comenzando por el Arduino nano de la Fig. 3.27.

Para poder comparar los datos se realizan las mediciones de los sensores en distintos intervalos temporales según la variable observada. Estos intervalos fueron seleccionados de modo que la información generada por el prototipo fuese temporalmente compatible con los registros de la estación de referencia. Así, la presión atmosférica y la velocidad del viento se obtienen a partir de promedios calculados sobre ventanas de 30 segundos, mientras que la dirección del viento se determina a partir del promedio y estabilización de 10 lecturas analógicas consecutivas, con el fin de reducir fluctuaciones instantáneas. La precipitación se registra de forma continua y se acumula en una ventana de 5 minutos. Los sensores de presencia de agua y el módulo GPS se leen de forma puntual al momento del registro. Finalmente, todos los datos procesados se integran y se transmiten en un único registro cada 5 minutos.

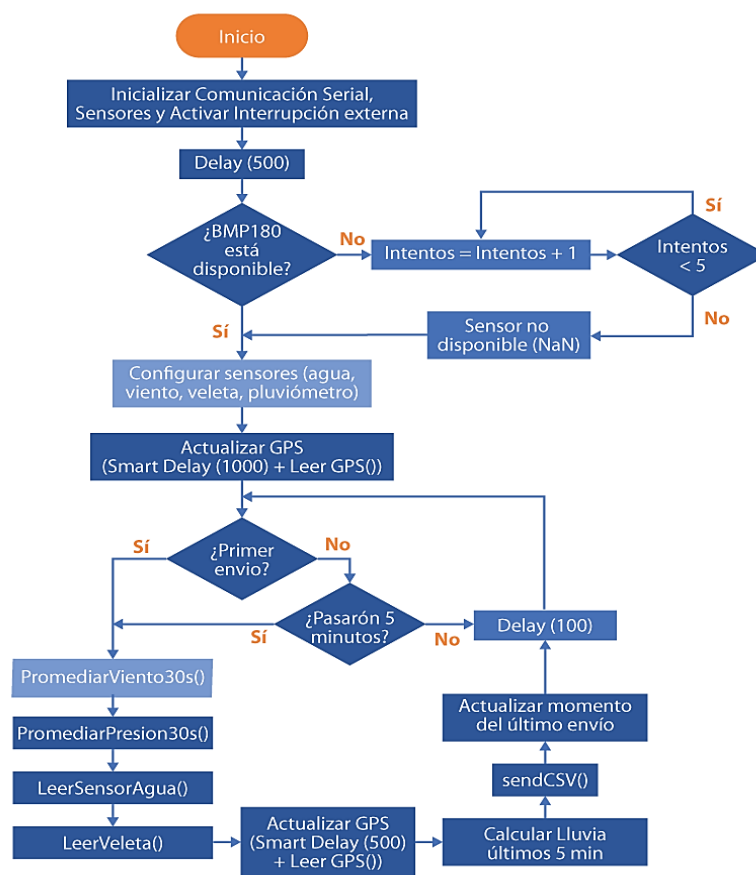


Fig. 3.27 Diagrama de flujo Arduino Nano().

El sistema comienza incluyendo las librerías para operar los sensores principales: el barómetro BMP180 mediante comunicación I2C, el módulo GPS a través de un puerto serial por software, y TinyGPS para decodificar las tramas NMEA (mensajes de texto según el estándar NMEA-0183, creado por la *National Marine Electronics Association*). Luego se crean los objetos bmp y gps para representarlos y se configura un puerto SoftwareSerial en los pines 4 y 5 para recibir datos desde el módulo GPS sin ocupar el puerto serie principal.

Seguido, se definen constantes globales, como la velocidad de transmisión serial y el desfase horario para convertir la hora UTC del GPS a la hora local de Chile. También se define una pequeña función auxiliar para formatear correctamente la fecha y la hora. Posteriormente se declaran los pines de cada sensor (agua, veleta, anemómetro y pluviómetro), además de las variables globales donde se almacenarán los últimos valores medidos para ser enviados en formato CSV. Adicionalmente se incluye un conjunto de coordenadas fijas que se utilizan como respaldo cuando el GPS no tiene la cantidad mínima de satélites necesarios para entregar una posición confiable y evitar desconexión del mapa en el servidor.

Aunque la estación meteorológica se instala en una ubicación fija, el módulo GPS se consulta e incluye en cada paquete de datos con fines de verificación del funcionamiento y control del estado del sistema. En particular, se transmiten indicadores de calidad de señal, como el número de satélites y el HDOP, lo que permite detectar pérdidas de señal, desconexiones o fallas del módulo durante períodos prolongados de operación. Dado que la posición geográfica no presenta variaciones relevantes en este tipo de sistema, esta estrategia puede generar datos repetidos; sin embargo, se mantiene en esta versión como mecanismo de supervisión del módulo GPS. En versiones futuras del sistema, la frecuencia de lectura de la posición puede optimizarse sin afectar la adquisición de las variables meteorológicas.

Después, se implementan dos rutinas de interrupción: una para el anemómetro y otra para el pluviómetro. La primera incrementa un contador cada vez que el reed switch del anemómetro detecta una rotación, permitiendo medir la frecuencia del viento, mientras que la segunda realiza un filtrado temporal para evitar rebotes contando un “tip” si han pasado más de 300 ms desde el anterior, asegurando que cada basculación del balancín corresponda realmente a un pulso de lluvia.

Luego, se definen funciones específicas para leer cada sensor. El sensor de agua se interpreta como un valor porcentual invertido ($0-1023 \rightarrow 100-0\%$), mientras que la veleta se lee varias veces para promediar su valor analógico y reducir el ruido. En cuanto a la dirección del viento, la lectura promediada se compara con los valores experimentales de la Tabla 4.2, determinando el más cercano. Además, se aplica un filtro de estabilidad para evitar cambios bruscos causados por pequeñas variaciones eléctricas. Para esto se compara la lectura analógica actual con la última lectura válida, actualizando la dirección cuando el cambio es suficientemente grande para considerarse real. Si la diferencia entre ambas lecturas es menor a un umbral fijo de 10 unidades ADC, se asume que se trata de ruido eléctrico y mantiene el último registro. En cambio, si la variación supera ese umbral, se considera un cambio auténtico de dirección y se actualiza el valor.

Las funciones de promediado de viento y presión realizan mediciones prolongadas. En el caso del anemómetro, se registra cuántos pulsos ocurren durante 30 segundos, luego calcula una frecuencia en Hz y la convierte a km/h utilizando el factor del fabricante 2,4 km/h. Después se transforma a m/s y se somete a una corrección lineal obtenida mediante la calibración comparativa. En el caso de la función para la presión, durante un intervalo de 30 segundos se realiza una lectura del barómetro cada segundo. A cada medición se le aplica la corrección por altura sobre el nivel del mar utilizando la

ecuación barométrica (6) indicada en el datasheet del sensor. Luego, se promedian únicamente los valores válidos y, finalmente, se aplica el ajuste lineal obtenido en la calibración previa.

$$P_0 = \frac{P}{\left(1 - \frac{h}{44330}\right)^{5.255}} \quad (6)$$

Donde P_0 corresponde a la presión equivalente al nivel del mar y P es la presión atmosférica medida a una altura h , siendo h la altura sobre el nivel medio del mar (MSL). El exponente 5.255 proviene de la combinación de la aceleración de gravedad, la masa molar del aire, la constante universal de los gases y el gradiente térmico vertical asumido en la atmósfera estándar. Para el cálculo de h se utilizó la elevación del terreno obtenida desde Google Earth, referida de forma aproximada al MSL, resultando para la ubicación 36°47'49''S 73°03'25''W en un valor de $h = 41$ m. Esta decisión se adoptó debido a que el GPS entrega una altura elipsoidal, la cual no representa directamente la altura ortométrica sobre el MSL. Adicionalmente, la precisión vertical del GPS es considerablemente menor que la horizontal, presentando errores y variaciones del orden de varios metros.

El código incorpora una función `smartdelay()`, que permite que el sistema siga escuchando los datos del GPS mientras espera para evitar pérdidas de información. En cuanto a la función `leerGPS()` esta se encarga de extraer la posición, la fecha y la hora de las tramas decodificadas; si la hora es válida, actualiza la fecha y aplica la corrección horaria. Además, guarda valores como número de satélites, HDOP y altitud. En cuanto a la posición, el sistema puede operar de dos formas:

1. **Si el GPS tiene datos válidos (≥ 4 satélites)**, utiliza la última coordenada real obtenida del módulo, aunque no haya llegado una actualización reciente.
2. **Si el GPS no es confiable (menos de 4 satélites)**, reemplaza automáticamente la posición por una coordenada fijada previamente, garantizando estabilidad en los datos cuando la señal no es adecuada.

Para enviar datos se utiliza la función `sendCSV()`, que arma una línea en formato CSV con todos los valores obtenidos: fecha, presión, humedad del suelo, dirección del viento, coordenadas GPS, lluvia acumulada en los últimos 5 minutos, velocidad del viento, etc. Esta información se transmite por Tx hacia el ESP transmisor.

En el `setup()` el programa inicializa todos los sensores, configura los pines de entrada, activa las interrupciones del anemómetro y pluviómetro, inicia la comunicación con el GPS y realiza un

primer intento de lectura para obtener la fecha y hora inicial. El barómetro se intenta reconectar varias veces en caso de fallas, para evitar en lo posible datos inválidos. Finalmente, el loop() se diseñó para enviar un CSV inmediatamente la primera vez, y luego entrar en un ciclo donde cada 300 000 ms realiza un envío con las mediciones completas.

A continuación, en la Fig. 3.28 se presenta el flujo del ESP8266, expresado de manera secuencial y clara, debido a la naturaleza concurrente del sistema y a la cantidad de procesos que se ejecutan en paralelo, se optó por representar el flujo de manera conceptual general para mayor claridad, pues un diagrama de flujo tradicional sería demasiado extenso y menos legible, mientras que esta estructura permite comprender de forma precisa el orden lógico de ejecución.

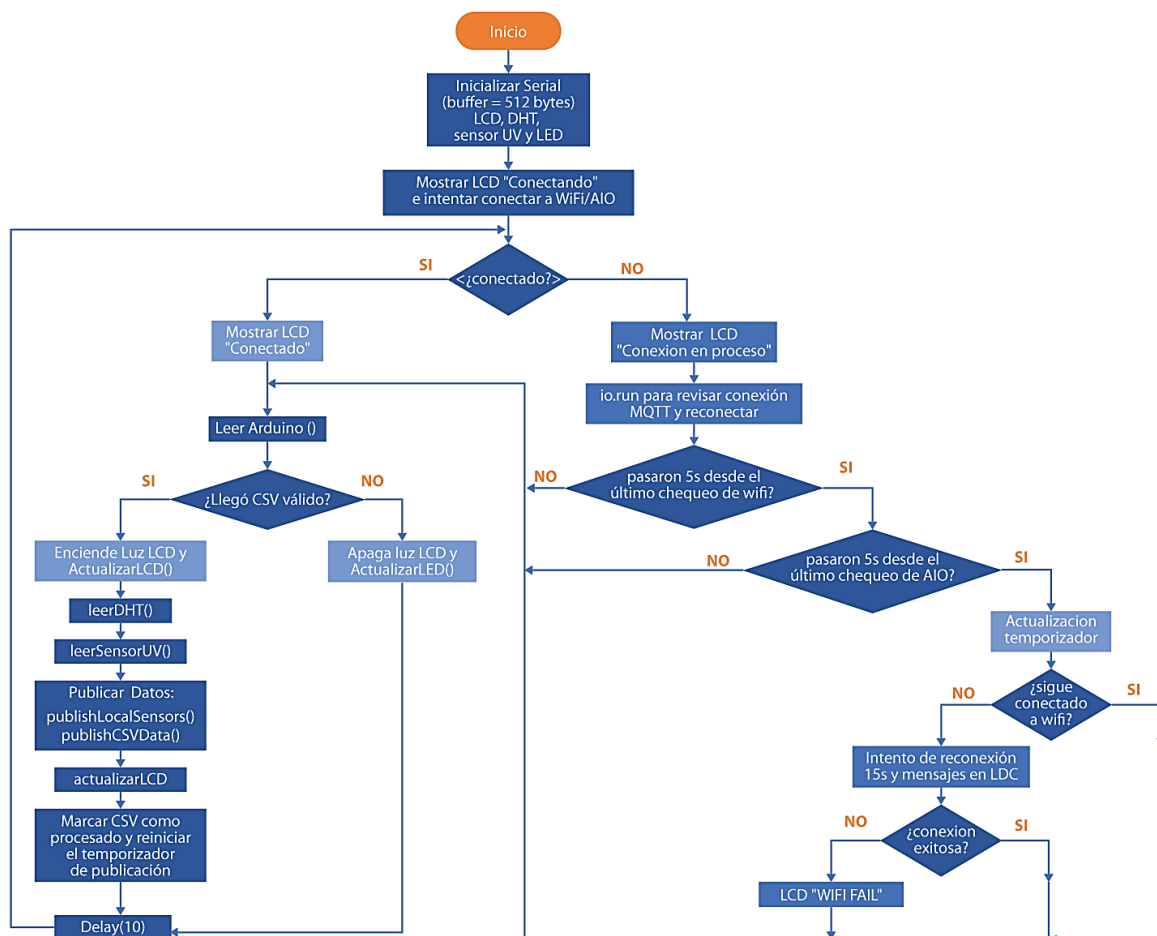


Fig. 3.28 Diagrama de flujo Nodo Transmisor().

El programa integra las librerías de WiFi, Adafruit IO, DHT11 y la interfaz I2C para la pantalla LCD, con el propósito de que el ESP8266, al recibir datos desde el Arduino, pueda publicarlos en Adafruit IO y mostrarlos en el LCD. En esta sección inicial también se configuran las credenciales

WiFi, las claves de Adafruit IO y se crean los feeds, que corresponden a canales individuales de datos dentro de Adafruit IO donde se almacenan y visualizan las mediciones. En este caso, se definen los feeds destinados a recibir el paquete CSV enviado por el Arduino y los datos de los sensores locales del propio ESP8266.

Se inicializa el DHT11, el LED indicador de estado y la pantalla LCD, la cual incorpora un sistema de ahorro energético que apaga la retroiluminación después de 5 segundos sin actividad. La retroiluminación se reactiva cuando llega un nuevo mensaje o el sistema necesita informar algo importante. También, se define la estructura *DatosCSV*, que permite almacenar toda la información enviada por el Arduino dentro de un solo paquete: número de secuencia, fecha/hora, presión, humedad/agua, viento (dirección, velocidad y valor ADC de la veleta), GPS (latitud, longitud, altitud, HDOP, satélites), lluvia acumulada y viento promedio. Esta estructura facilita convertir la línea CSV en datos numéricos, generar mensajes legibles y publicar la información en Adafruit IO o en un servidor local.

El sistema incluye un mecanismo de reconexión mediante la función *ensureConnected()* que revisa el estado de la conexión WiFi y la conexión con Adafruit IO. Si alguna falla, se intenta reconectar durante 15 segundos mientras se informa el estado en el LCD. Además, en el *loop()* hay verificaciones cada 5 segundos para asegurar que la conexión continúe estable durante la operación.

En el *setup()* se configura el puerto serie, aumentando su buffer a 512 bytes para evitar perder datos cuando llegan líneas CSV largas o rápidas. Se inicializan el LCD, el sensor DHT11 y el sensor UV. Finalmente, el ESP8266 intenta conectarse a WiFi y a Adafruit IO. Mientras que, en el *loop()* se ejecuta *io.run()* para mantener activa la comunicación con Adafruit IO y se revisa continuamente si llegaron nuevas líneas desde el Arduino. La función *leerArduino()* reconstruye cada línea CSV hasta detectar un salto de línea, procesando solo las que comienzan con "CSV,". Luego se valida la estructura, separa los campos y los almacena. Cuando llega una nueva línea válida, se activa un temporizador (“debounce”) para evitar publicaciones duplicadas.

Al momento de publicar, el sistema despierta el LCD, lee los sensores locales (DHT y UV), publica sus valores instantáneos luego de pasar por la ecuación lineal para el DHT11 y envía los datos al servidor online de Adafruit IO. Cabe mencionar que el código, detecta situaciones especiales como GPS sin fix o coordenadas estáticas, mostrando avisos en pantalla.

Capítulo 4 Calibración de Sensores

4.1 Introducción

La precisión de las mediciones obtenidas por una estación meteorológica depende en gran medida del desempeño individual de sus sensores y de la capacidad del sistema para interpretar correctamente sus señales. Dado que este proyecto se basa en el uso de dispositivos electrónicos de bajo costo, es necesario realizar un proceso de calibración que permita evaluar su comportamiento real frente a condiciones controladas o instrumentos de referencia. La calibración no solo corrige posibles desviaciones de fábrica o errores derivados de la integración electrónica, sino que también asegura que las mediciones sean consistentes, repetibles y adecuadas para su uso en aplicaciones agrícolas. Para este capítulo se consideraron las referencias [45], [46], [47], [48] y [49].

En este capítulo se describen los procedimientos aplicados para la calibración de los distintos sensores que componen la estación meteorológica. Asimismo, se discuten las limitaciones observadas durante las pruebas y las consideraciones adoptadas, a las características de los sensores o a las variaciones temporales propias de las mediciones ambientales.

4.2 Procedimiento de calibración

Para asegurar la validez de las mediciones entregadas por el prototipo, se realizó un proceso de calibración experimental y/o de fábrica para cada uno de los sensores integrados en la estación meteorológica. A continuación, se presentan los detalles sobre la estación de referencia, los resultados obtenidos junto con la metodología aplicada, las condiciones de las pruebas y el análisis comparativo correspondiente.

Para las variables de velocidad del viento, presión atmosférica, temperatura y humedad se empleó una calibración operativa, definida como la ecuación de corrección implementada directamente en la EMA para transformar la medición cruda del sensor en una medición corregida. Su objetivo es reducir el sesgo sistemático del prototipo y producir estimaciones comparables con la estación de referencia, de manera autónoma y en tiempo real. Esta aproximación es necesaria porque, una vez desplegada la estación, no se dispone de la medición de la HOB0 para ajustar o corregir los datos en postproceso; por ello, la corrección debe expresarse como una función de la propia medición del sensor.

La ecuación aplicable en la EMA se obtiene del ajuste se planteado con la medición de la estación de referencia (HOBO) como variable dependiente y la medición cruda del prototipo como variable independiente. De este modo, la ecuación resultante permite estimar el valor equivalente a la referencia a partir del dato medido por la EMA y es directamente implementable en el microcontrolador. El desempeño de la calibración se evaluó posteriormente mediante métricas de error, como el RMSE, y mediante validación con un conjunto de datos independiente al utilizado para el ajuste.

4.2.1 Estación de referencia HOBO RX3004

La estación de referencia corresponde a un sistema profesional de adquisición de datos, diseñado para el monitoreo continuo de variables meteorológicas y ambientales. Se encuentra instalada en dependencias de la Universidad, frente al estacionamiento del Centro de Energía UCSC y cercana a la planta de Hidrógeno Verde (H2V). En este entorno existe presencia de edificaciones próximas, condición que puede influir en la exposición de los sensores, especialmente para variables como viento, precipitación y radiación. Esta se encuentra bajo la responsabilidad del Dr. Diego Caamaño, académico de la Facultad de Ingeniería Civil.

El sistema está compuesto por un registrador de datos celular HOBO RX3000, que permite la adquisición, el almacenamiento y la transmisión remota de la información registrada por los sensores conectados. El acceso a los datos se realiza mediante una plataforma en la nube LI-COR Cloud, la cual permite la visualización remota de los registros. Sin embargo, esta plataforma no habilita la descarga directa de la información en un formato editable; por ello, los registros utilizados en este estudio fueron proporcionados directamente por el académico responsable. La estación cuenta además con un panel solar que asegura su funcionamiento continuo en terreno. Cabe señalar que no se dispone del detalle de la altura exacta de instalación de cada sensor; no obstante, la estructura presenta una altura total aproximada de 2,40 m.

En cuanto a la instrumentación, la estación incluye:

- **Sensor de temperatura y humedad HOB0 S-THC-M002:** Mide temperatura de -40 a 75 °C y HR de 0 a 100%, con resolución de 0,02 °C y 0,01% HR. En precisión, especifica $\pm 0,20$ °C entre 0 y 70 °C y en HR $\pm 2,5\%$ típica entre 10–90%.
- **Sensor barométrico HOB0 S-BPB-CM50:** Mide la presión atmosférica en un rango de 660 a 1070 mbar (hPa), su resolución es 0,1 mbar, con exactitud $\pm 3,0$ mbar a 25 °C en todo el rango de presión, y un error máximo de $\pm 5,0$ mbar cuando opera entre -40 y 70 °C.
- **Anemómetro HOB0 S-WSB-M003:** Mide la velocidad de viento en el rango 0 a 76 m/s y su salida se entrega como promedio del intervalo de registro, su resolución es de 0,5 m/s, con umbral de arranque de 1,0 m/s, tiene una exactitud de $\pm 1,1$ m/s.
- **Veleta HOB0 S-WDA-M003:** Mide la dirección del viento en el rango de 0 a 355°, con una banda muerta de 5°. Presenta resolución de 1,4° y exactitud de $\pm 5^\circ$, posee un umbral de arranque de 1,0 m/s.
- **Pluviómetro HOB0 S-RGB-M002:** De tipo balancín cada vuelco equivale a 0,2 mm de lluvia (resolución). Su rango de medición de intensidad llega hasta 12,7 cm/h, tiene un máximo de 4000 vuelcos por intervalo, y una exactitud de calibración típica de $\pm 1\%$ para intensidades de hasta 20 mm/h; opera típicamente entre 0 y 50 °C.
- **Piranómetro de silicio HOB0 S-LIB-M003:** Mide la radiación solar en el rango de 0 a 1280 W/m², principalmente el espectro de onda corta en el rango aproximado de 300-1100 nm (ultravioleta cercano, visible e infrarrojo cercano) y tiene resolución de 1,25 W/m², con exactitud típica ± 10 W/m².

Entre las variables medidas se encuentran: temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar, punto de rocío, precipitación acumulada, velocidad del viento y dirección del viento. Los datos son adquiridos cada 30 segundos, según la configuración observada en la plataforma, las variables que corresponden a promedios en ese intervalo son la presión, radiación solar, velocidad del viento y punto de rocío (variable derivada a partir de temperatura y humedad). En cambio, variables como temperatura y humedad relativa, se reportan como el último valor registrado. En cuanto al pluviómetro, su medición corresponde a una acumulación en una ventana de 30 segundos. Finalmente, todos los datos se publican cada 5 min en la plataforma.



Fig. 4.1 Estación meteorológica HOBO RX3004. Fuente: Hydrocultura.

4.2.2 Pluviómetro

Para la calibración del sensor se tomaron mediciones con respecto al valor de precipitación y a la cantidad de pulsos del sensor, considerando una jeringa con error de precisión (ϵ_p) de 0,5mm y un vaso medidor con $\epsilon_p = 10$ mm. Las mediciones fueron realizadas como se puede observar en la Fig. 4.2.

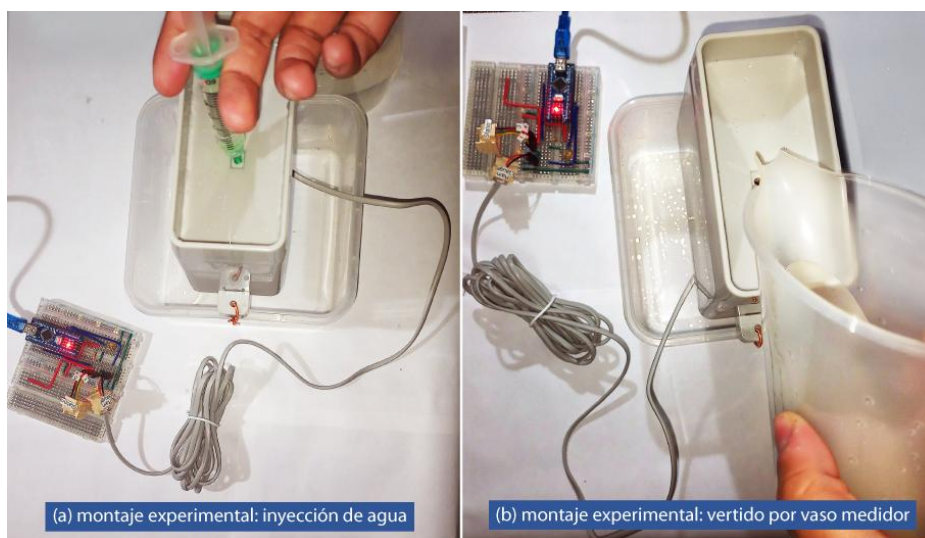


Fig. 4.2 Configuración de laboratorio para calibración del pluviómetro.

Los datos obtenidos de las experimentaciones fueron registrados en la Tabla 4.1.

TABLA 4.1 Volumen vertido vs pulsos del sensor

Método	Volumen en ml	Pulsos	mm caídos en 1 min	ml por pulso
	50	21	5,87	2,381

Vaso medidor	50	20	5,59	2,5
	50	21	5,87	2,381
	50	21	5,87	2,381
	50	21	5,87	2,381
	50	21	5,87	2,381
	50	22	6,15	2,273
	50	21	5,87	2,381
	50	20	5,59	2,5
	50	21	5,87	2,381
Jeringa	5	3	0,84	1,667
	5	3	0,84	1,667
	5	3	0,84	1,667
	5	3	0,84	1,667
	5	2	0,56	2,5
	5	3	0,84	1,667
	5	3	0,84	1,667
	5	3	0,84	1,667
	5	3	0,84	1,667
	5	3	0,84	1,667

Se realiza una verificación para asegurar que los pulsos generados por el sensor corresponden de forma precisa y repetible a una cantidad conocida de precipitación. Dado que 1 mm de precipitación equivale a 1 litro de agua distribuido uniformemente sobre 1 m² de superficie, se estableció la siguiente relación:

$$1 \text{ L/m}^2 = \frac{1000 \text{ ml}}{10000 \text{ cm}^2} = 0,1 \text{ ml/cm}^2 \quad (7)$$

Por lo tanto, 1 ml/cm² corresponde a 10 mm de lluvia. A partir de esta equivalencia, se puede deducir la siguiente expresión para estimar la precipitación:

$$\text{mm de lluvia} = \left(\frac{\text{ml vertidos}}{\text{área en cm}^2} \right) \cdot 10 \quad (8)$$

Para la estimación de la precipitación en milímetros (mm), se considera exclusivamente el área horizontal superior del recipiente como se puede observar en la Fig. 4.3, ya que esta corresponde a la superficie efectiva de captación del pluviómetro. La altura o volumen total del recipiente no interviene en este cálculo, dado que la precipitación se define como el volumen de agua caído por unidad de superficie horizontal (L/m²). En consecuencia, independientemente de la profundidad del contenedor, el parámetro determinante es su proyección en planta, la cual permite cuantificar con precisión la lámina de agua precipitada bajo condiciones reales de recolección.

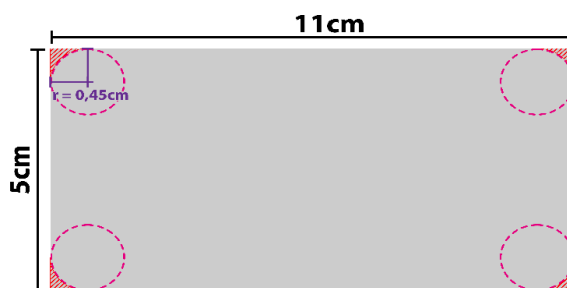


Fig. 4.3 Representación cálculo del área de captación.

El área de captación mide 11cmx5cm, como tiene las esquinas redondeadas al medirlas se determina que el círculo interior tiene un radio de 0,45cm. Por lo tanto, se calcula el área considerando que las esquinas no forman parte de la figura, obteniendo así un área interna de 54,3 cm². De esta forma con 5ml vertidos se obtienen 0,921 mm de lluvia, lo que representa una diferencia absoluta de $\Delta x = 0,081$ mm respecto del valor de la báscula. Así, con estos cálculos en 1 pulso se obtienen 0,307 mm de lluvia.

Durante la calibración, no se logró verter el líquido de manera completamente uniforme sobre toda el área de captación del embudo. En lugar de simular una lluvia homogénea, se realizó de forma puntual mediante jeringa o vaso medidor, lo que pudo concentrar el flujo en una zona específica. Esta condición representa una limitación del procedimiento, ya que en condiciones reales de lluvia la distribución suele ser más homogénea sobre la superficie. No obstante, se tomaron múltiples repeticiones y se estimó el área efectiva de captación para minimizar el impacto de esta no uniformidad.

La diferencia con respecto al valor obtenido (0.307 mm/pulso) representa un error relativo de solo 9.9%. Este margen se encuentra dentro de los niveles aceptables para sensores de bajo costo y prácticas educativas, según criterios de la FAO y la OMM, donde errores menores al 10% son tolerables en aplicaciones no críticas.

4.2.3 Veleta

Con el objetivo de mejorar la precisión en la detección de dirección, se llevó a cabo una calibración experimental del sensor de veleta. Dado que no se contaba con un instrumento que permitiera fijar con exactitud el ángulo de orientación (transportador digital), se optó por realizar una medición con transportador circular con $\epsilon_p = 0,477^\circ$ (dado que presentaba una resolución mínima de lectura de 0,5 mm en su escala circular y un diámetro ≈ 120 mm), para cada dirección se posicionó la

veleta manualmente y se promediaron 10 lecturas del valor analógico (DC) con su correspondiente voltaje. A partir de múltiples muestras tomadas como se aprecia en la Fig. 4.4 se logró determinar la dirección por sectores angulares, que se tabularon en la Tabla 4.2, así como el error porcentual entre el valor teórico y experimental.

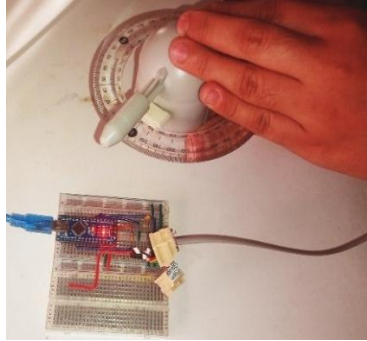


Fig. 4.4 Configuración de laboratorio para calibración de la veleta.

La fórmula utilizada para el error porcentual fue:

$$E\% = \left[\frac{\text{Valor Teórico} - \text{Medición del sensor}}{\text{Valor Teórico}} \right] * 100 \quad (9)$$

TABLA 4.2 Datos experimentales de la veleta del viento

Grados (°)	Dirección	Promedios DC	Promedios V	Error %
[0-25[	N	788	3,85	-0,30
[25-30[	NNE	408	1,99	-0,71
[30-57[	NE	464	2,27	-0,75
[57-90[	ENE	83	0,41	0,91
[90-110[	E	92	0,45	0,47
[110-120[	ESE	65	0,32	0,72
[120-150[	SE	184	0,85	-0,07
[150-160[	SSE	129	0,63	-1,69
[160-200[	S	288	1,41	-0,61
[200-210[	SSO	245	1,20	-0,63
[210-240[	SO	633	3,09	-0,45
[240-250[	OSO	602	2,94	-0,42
[250-290[	O	945	4,62	0,02
[290-320[	ONO	829	4,05	-0,26
[320-340[	NO	888	4,34	9,20
[340-360[	NNO	691	3,85	1,54

El procedimiento no permite conocer con exactitud el ángulo en grados de cada dirección, pero proporciona una calibración semi-experimental más representativa que los valores teóricos del sensor.

En esta se puede observar que la veleta maneja errores de voltaje inferiores al 1 % para la mayoría de las direcciones, con un error máximo típico de 1,7 %.

Registrando un valor atípico en la dirección NO (9,20 %), probablemente asociado a ruido o a una posición intermedia entre dos sectores. Considerando el conjunto de datos, el error de voltaje del sensor puede considerarse del orden de ± 1 %, por lo que la calibración eléctrica de la veleta se considera aceptable.

4.2.4 Anemómetro

Para evaluar el desempeño del anemómetro del prototipo, se realizó un proceso de calibración comparando sus mediciones con las registradas por la estación de referencia HOBO RX3004. En primer lugar, ambas series temporales fueron homogenizadas generando marcas de tiempo consistentes y posteriormente fueron reorganizadas mediante un resampleo a intervalos de 5 minutos, con el propósito de reducir el ruido y obtener estimaciones representativas del viento promedio en cada intervalo.

Luego, las dos series fueron alineadas temporalmente conservando únicamente los intervalos en los que ambas estaciones disponían de datos simultáneos. Posteriormente, se aplicó una corrección por diferencia de alturas entre los sensores utilizando la ecuación (10), correspondiente a la ley de potencia del perfil vertical del viento (power law) [47], donde V_1 representa la velocidad del viento medida por la estación de referencia; V_2 , la velocidad estimada a la nueva altura del sensor del prototipo; z_1 , la altura a la que se encuentra el sensor de la estación de referencia (2,40 m); z_2 , la altura del sensor del prototipo (1,73 m); y α , el coeficiente de estabilidad atmosférica asociado a las características del terreno y condiciones locales, cuyo valor usado fue $\alpha = 0,076$, obtenido de un Excel [47] con el coeficiente para la zona geográfica analizada $(-36.7969, -73.0572)$.

$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (10)$$

Esta corrección permite llevar la velocidad de viento medida por la estación de referencia al nivel del sensor del prototipo eliminando el sesgo sistemático que introduce la diferencia de alturas entre ambos instrumentos. Así, una vez corregidas y alineadas las series, se ajustó el modelo de regresión lineal con intercepto, cuyo resultado se presenta en la Fig. 4.5.

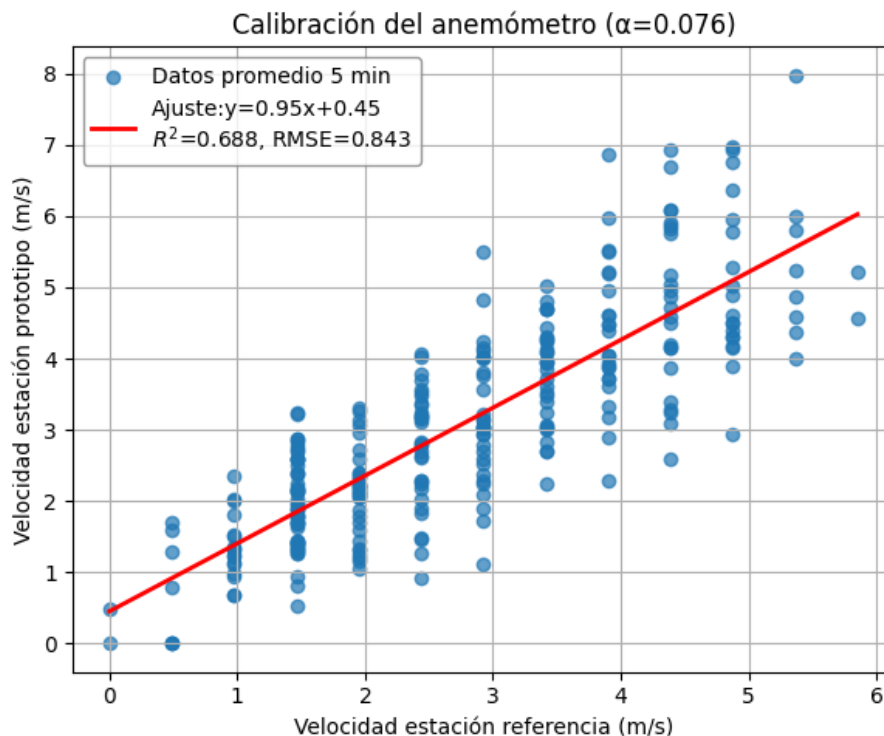


Fig. 4.5 Ajuste para visualizar el grado de correspondencia entre el prototipo y la referencia para la velocidad.

En esta calibración, la precisión está condicionada por la resolución con la que ambas estaciones reportan la velocidad del viento. La estación de referencia tiene un comportamiento escalonado (valores agrupados en niveles) mostrando una resolución de 0,5 m/s, es decir, las mediciones se entregan en incrementos discretos y no como un valor continuo. Esto genera agrupamientos de puntos y añade una variación “aparente” limitando el ajuste. Por su parte, el prototipo también presenta cuantización, ya que su lectura tiene una resolución de 0,666 m/s, lo que impide capturar cambios pequeños de velocidad. Por lo tanto, para los resultados de la regresión (R^2 y RMSE) deben considerarse estas limitaciones instrumentales.

De la gráfica presente en Fig. 4.5 se sugiere que el anemómetro del prototipo presenta una ligera sobreestimación de la velocidad respecto a la estación de referencia en el rango analizado, asociada al término constante positivo, mientras que la pendiente muestra que aproximadamente el 69% de la variabilidad de las mediciones del prototipo es explicada por las variaciones observadas en la referencia. El $RMSE=0,843$ m/s refleja una dispersión moderada, atribuible a turbulencias locales y diferencias de exposición. Visualmente, la nube de puntos evidencia una tendencia lineal y la recta representa la tendencia central de los promedios a 5 min

4.2.5 Sensor de presión

Para calibrar el sensor de la estación propuesta, se realizó una comparación directa con la estación de referencia. Debido a que ambos sistemas registran datos en tiempos distintos, primero se efectuó un emparejamiento temporal (temporal pairing), donde cada medición del sistema Adafruit fue asociada a la medición más cercana de la estación HOBO dentro de una tolerancia de ± 3 minutos. Este procedimiento es común en la literatura cuando se comparan sensores con diferentes frecuencias de muestreo o tiempos internos de registro.

Una vez generados los pares de datos, en la Fig. 4.6 se presenta el resultado de aplicar una regresión lineal por mínimos cuadrados ordinarios (OLS), con el fin de determinar la relación entre ambas mediciones.

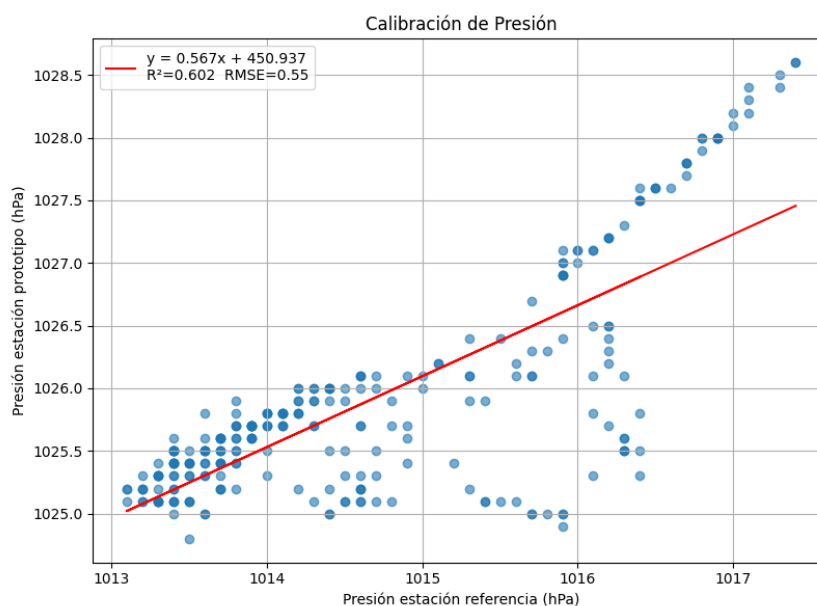


Fig. 4.6 Ajuste para visualizar el grado de correspondencia entre el prototipo y la referencia para la presión.

Al observar en la figura una dispersión apreciable de los puntos respecto de la recta de ajuste lo que reduce el valor del R^2 , una posible explicación es el comportamiento operativo de la EMA durante el ensayo: debido a la falta de autonomía completa, la estación se apagaba después de cierto tiempo y debía reiniciarse manualmente, lo que introduce interrupciones en el registro y puede generar desincronización temporal con la estación de referencia (pares de datos X–Y mal alineados dentro de las ventanas de muestreo). Además, cada reinicio puede provocar transitorios de arranque y cambios en el estado interno del sistema, aumentando el ruido y produciendo saltos o agrupamientos de puntos que se apartan de la tendencia lineal esperada. En conjunto, estos factores operacionales pueden

Con el objetivo de analizar el comportamiento de los errores mediante un histograma de residuos para verificar si se les puede aplicar un criterio de depuración basado en múltiplos de la desviación estándar que identifique valores atípicos.

Realizando el histograma de los residuos presente en la figura 4.7, se observa una distribución centrada en torno a cero y aproximadamente unimodal, aunque con cierta asimetría y colas extendidas, lo que indica que los errores no siguen estrictamente una distribución normal. No obstante, el comportamiento observado resulta razonablemente simétrico, permitiendo emplear el criterio de ± 2 desviaciones estándar [49] como un método empírico para reducir la dispersión de los datos sin alterar la tendencia principal de la relación entre las variables analizadas.

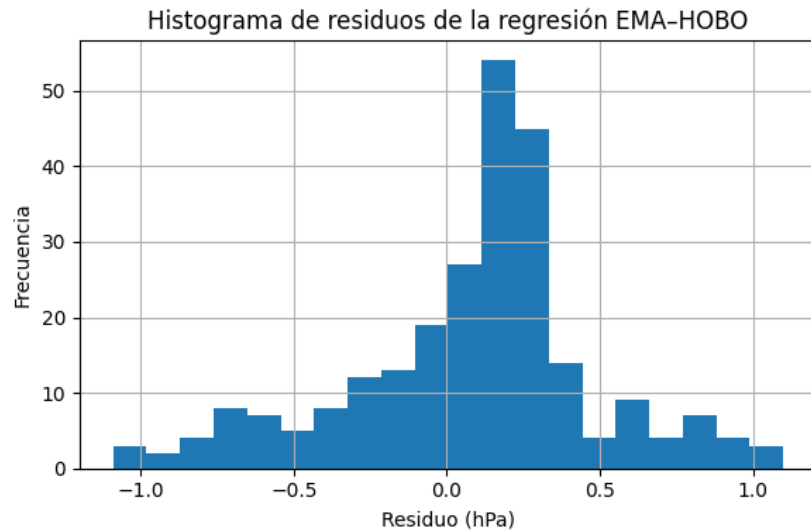


Fig. 4.7 Histograma del error de ajuste entre el prototipo y la referencia.

El criterio para el filtrado de outliers ($\pm 2\sigma$) se basa en la suposición de que los residuos de una regresión lineal presentan un comportamiento aproximadamente normal, bajo el cual cerca del 95 % de las observaciones se concentran dentro de dicho intervalo respecto del valor medio. En este contexto, los datos que exceden este rango (valores atípicos) tienen una baja probabilidad de representar el comportamiento típico del sistema. Por lo tanto, para el filtro se utiliza la ecuación:

$$\text{Residuo} = \text{valor medido} - \text{valor que predice la recta} \quad (11)$$

$$| \text{Residuo} | \leq 2\sigma$$

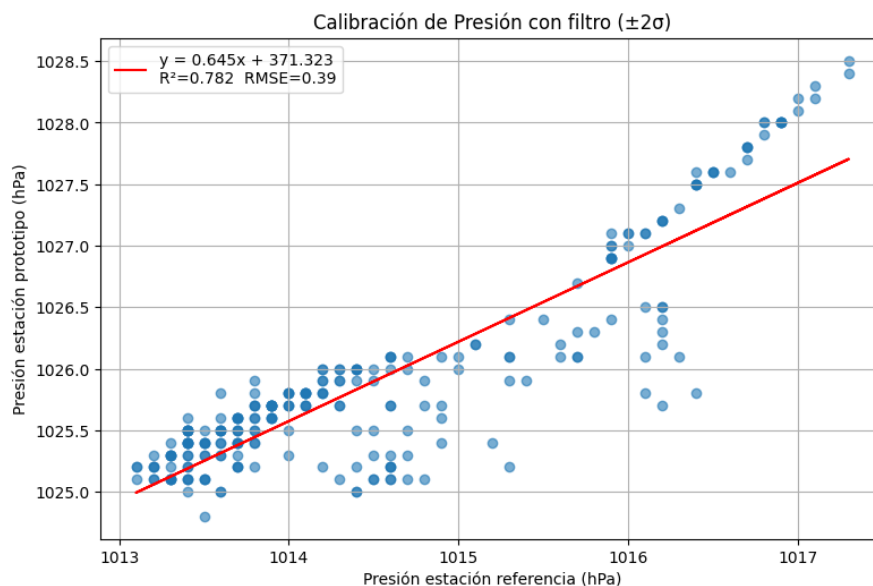


Fig. 4.8 Ajuste para visualizar el grado de correspondencia entre el prototipo y la referencia para la presión con filtro aplicado.

Como se observa en la Figura 4.8, tras aplicar el filtro ($\pm 2\sigma$) se incrementó el coeficiente de determinación de $R^2 = 0.602$ a $R^2 = 0.782$, lo que indica que el modelo lineal explica el 78,2% de la variabilidad de la presión medida por el prototipo en función de la presión registrada por la estación de referencia. Asimismo, el error RMSE disminuyó de 0.55 hPa a 0.39 hPa, evidenciando una mejora en el ajuste al reducir la influencia de datos atípicos. La tendencia aproximadamente lineal observada sugiere que el prototipo sigue de manera coherente las variaciones registradas por la referencia, lo que respalda el uso de una regresión lineal para definir la función de calibración.

4.2.6 Sensor de temperatura y humedad

La calibración de las variables de temperatura y humedad se realizó mediante una comparación directa entre los datos obtenidos por la estación prototipo y las mediciones de la estación de referencia HOBO. Debido a que ambas estaciones no registran datos exactamente en el mismo instante, el primer paso consistió en unificar y sincronizar temporalmente ambas fuentes de información. Para ello, las columnas de fecha y hora se combinaron en un único campo para garantizar un orden cronológico correcto y permitir la comparación precisa entre ambas series temporales.

En este caso, aunque el sensor entrega valores instantáneos, estos no corresponden exactamente al mismo instante real de medición entre ambas estaciones por diferencias internas en el muestreo, el procesamiento y la latencia de transmisión. Por ello, la comparación punto a punto genera

una dispersión artificial que no refleja el desempeño real del sensor. Para evitar esta asincronía, ambas series se remuestrearon mediante promedios de 5 minutos. Este procedimiento se emplea para calibrar sensores con un comportamiento estable, pues asegura que las mediciones correspondan a un mismo intervalo temporal, permitiendo realizar una calibración válida.

Una vez obtenidas ambas series remuestreadas, se evaluó la presencia de desfases temporales (*lag*) entre estaciones, ya que podría originarse por diferencias internas en los tiempos de procesamiento, transmisión o almacenamiento. Para corregirlo, se probó un conjunto de lags que abarcan desde -10 a $+10$ minutos, desplazando la serie proveniente del sensor DHT11 y emparejándola con los datos de la estación HOBO dentro de una tolerancia temporal de ± 3 minutos. Para cada lag evaluado, se formaron pares de datos coincidentes y se ajustó un modelo de regresión lineal, calculando su coeficiente de determinación (R^2) y su error cuadrático medio (RMSE). El lag óptimo se definió como aquel que maximiza el valor de R^2 , ya que representa la mejor alineación temporal entre ambos sensores.

Con las series ya alineadas, se procedió a estimar la ecuación de calibración mediante regresión lineal simple. Este modelo relaciona directamente el valor crudo entregado por el sensor de bajo costo con el valor medido por la estación de referencia. A partir de este ajuste, se obtuvieron los parámetros necesarios para transformar las mediciones originales en valores calibrados. Además, para evaluar la calidad del ajuste se utilizaron las métricas R^2 y RMSE, que describen el grado de correlación entre ambos sensores y el error medio en unidades físicas.

La figura 4.9 manifiesta la relación entre la temperatura registrada por el sensor de la estación prototipo y la estación HOBO, luego de aplicar un desfase temporal óptimo de -2 minutos (para más información de cómo se obtuvo el lag óptimo consultar Anexo A.1). Los puntos azules representan las mediciones alineadas y la línea roja corresponde al modelo de regresión lineal que visualiza el grado de correspondencia. La tendencia positiva indica que ambos sensores responden de forma coherente, mientras que la dispersión refleja diferencias propias del sensor de bajo costo. El ajuste obtenido $R^2 = 0,733$ evidencia una relación lineal adecuada entre ambas mediciones, mientras que el $RMSE = 1,527$ °C cuantifica el error típico residual del modelo respecto a HOBO. Estos resultados permiten derivar la ecuación de calibración mostrada en la figura. Cabe destacar que la resolución del sensor para temperatura se encuentra en 1 °C.

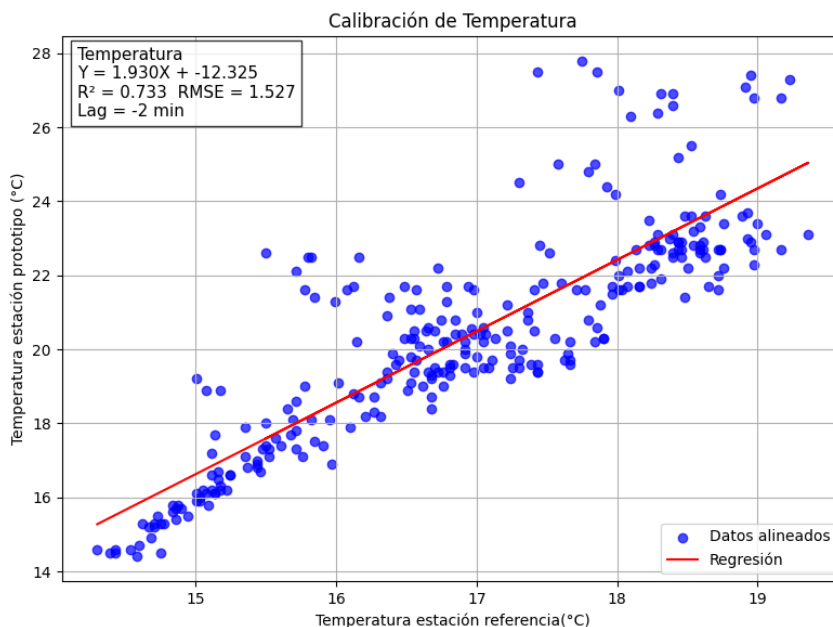


Fig. 4.9 Ajuste para visualizar el grado de correspondencia entre el prototipo y la referencia para la temperatura.

La Fig. 4.10 expone la relación entre la humedad relativa registrada por el sensor de la estación desarrollada y la estación HOBO, después de aplicar un desfase temporal óptimo de -2 minutos (para más información de cómo se obtuvo el lag óptimo consultar Anexo A.1). Los puntos azules representan las mediciones alineadas, mientras que la línea roja representa el modelo de regresión lineal que visualiza el grado de correspondencia. La tendencia ascendente evidencia que ambos sensores responden de manera consistente, aunque con una dispersión mayor que en el caso de temperatura, lo que es habitual en sensores económicos de humedad con resolución de 1% como el DHT11. El ajuste obtenido $R^2 = 0.678$, $RMSE = 6.197\%$ indica una correlación moderada que permite generar la ecuación de calibración mostrada en la figura.

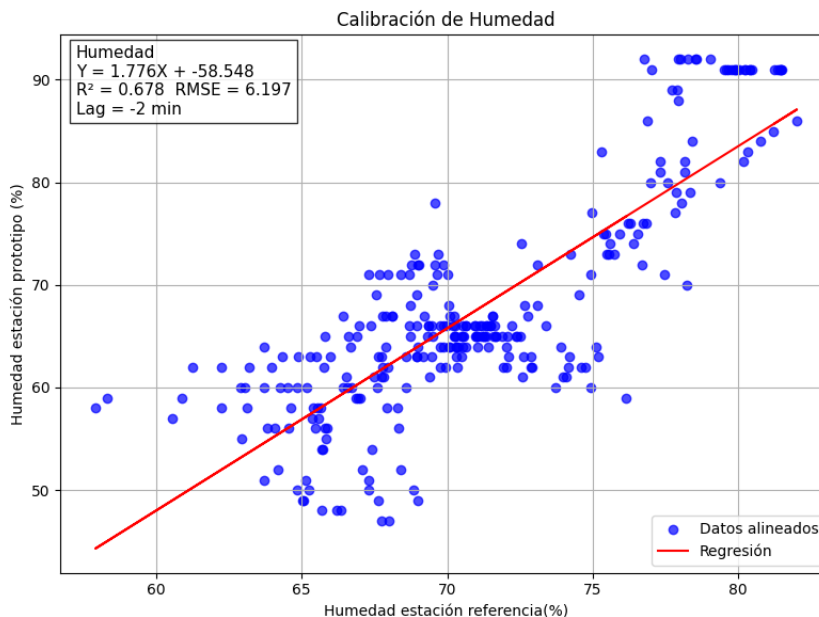


Fig. 4.10 Ajuste para visualizar el grado de correspondencia entre el prototipo y la referencia para la humedad.

4.2.7 Sensor de radiación UV

Para evaluar la posibilidad de calibrar el sensor de radiación ultravioleta (UV) utilizado en este proyecto, inicialmente se consideró emplear como referencia las mediciones entregadas por la estación HOBO RX3000. Sin embargo, esta estación mide radiación solar global en un rango amplio de 300–1100 nm, registrando potencia en W/m² hasta 1280 W/m². En cambio, el sensor incorporado en este proyecto solo detecta radiación ultravioleta (UV-A y parte de UV-B) en el rango 280–390 nm y entrega una intensidad UV relativa, no potencia total.

Debido a estas diferencias fundamentales; distintos rangos espectrales, magnitudes físicas medidas y principios de detección; no es posible realizar una calibración directa entre ambos instrumentos ni emplear las mediciones de la estación de referencia para ajustar el sensor UV del prototipo. Asimismo, llevar a cabo una calibración experimental habría requerido una caracterización óptica del acrílico protector, procedimiento que excede los recursos y plazos disponibles.

En consecuencia, por ambos motivos se mantuvo la calibración de fábrica del sensor UV, señalando además que la cubierta acrílica puede introducir un error sistemático en las mediciones.

4.2.8 Sensor de lluvia

Para el sensor de lluvia se realizaron 5 pruebas donde se vertieron sobre la superficie de la celda gotas de 1ml de agua como se puede notar en la Fig. 4.11. Luego, mediante Python se leen los datos del sensor a través del puerto serial, estos se almacenan en archivos CSV y se generan los gráficos para su análisis. En el código se configura el puerto serial para leer datos a la misma velocidad que en el Arduino IDE. Finalmente, se crea un gráfico de dispersión que relaciona los valores del sensor con los niveles de agua, facilitando así el análisis de los datos recolectados.

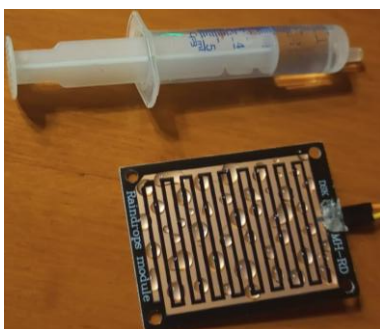


Fig. 4.11 Prueba controlada del sensor de lluvia.

Cabe destacar que en las 5 pruebas se obtuvieron resultados muy parecidos, por lo que solo se presentan los resultados de una de las pruebas, en esta se graficaron 4000 muestras que corresponden a la cantidad de datos que se pudieron obtener en el tiempo que la celda se secaba. El tiempo de separación entre muestras fue de 2s.

En la Fig. 4.12 se evalúa la relación entre el valor ADC del sensor y el porcentaje de nivel de agua utilizando una función de mapeo. A través de la prueba, se busca establecer una correlación precisa entre las lecturas del sensor y el nivel de agua en términos porcentuales.

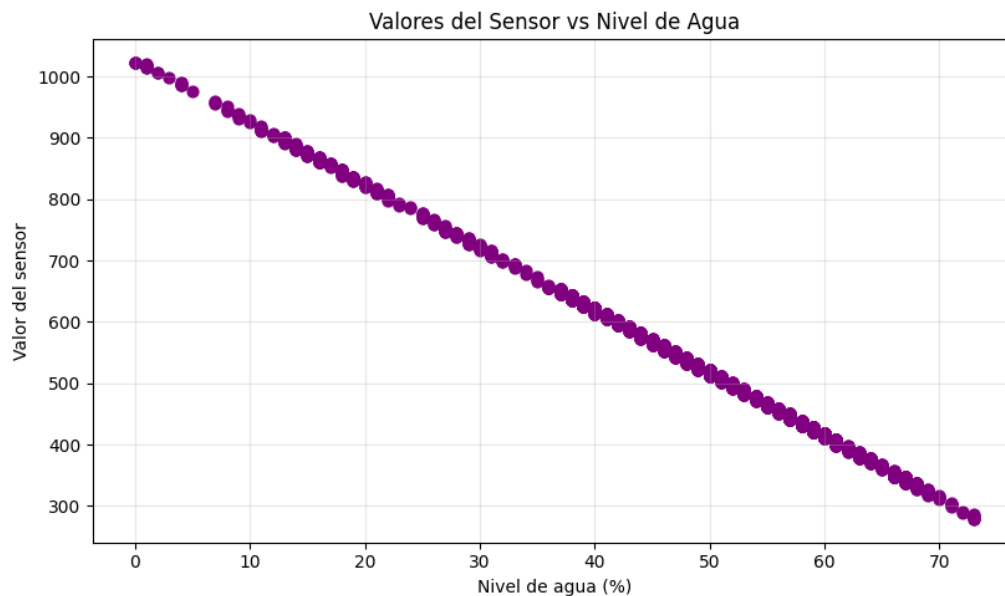


Fig. 4.12 Gráfica de Dispersión: Relación entre el valor ADC y el nivel de Agua.

La gráfica obtenida en Fig. 4.12 representa una relación inversa lineal, lo que indica que a medida que el valor del sensor aumenta, el porcentaje de agua disminuye, teniendo una relación lineal descendente con una correlación inversa. Esta calibración es esencial para garantizar que el sensor proporcione datos precisos y útiles, permitiendo su uso efectivo en aplicaciones prácticas como el monitoreo de nivel de agua.

A partir de las pruebas realizadas se verifica que el sensor responde correctamente a los cambios en el nivel de agua y que la función de mapeo refleja con precisión los niveles de agua.

Capítulo 5 Resultados y Validación

5.1 Introducción

El presente capítulo expone los resultados obtenidos tras la implementación, calibración y evaluación en terreno del prototipo de estación meteorológica. Su propósito es validar el desempeño del sistema en escenarios reales, mediante la comparación directa con una estación meteorológica comercial Hobo RX3004 disponible en las dependencias de la Universidad. Para cada variable medida, se analizan la coherencia de las lecturas, su estabilidad, el comportamiento dinámico frente a cambios ambientales y la magnitud de los errores observados. Estos resultados permiten determinar el grado de confiabilidad del prototipo, identificar sus limitaciones y establecer el nivel de precisión alcanzado en relación con los objetivos planteados.

Asimismo, se presentan los resultados de la evaluación del prototipo realizada en exterior junto a la estación de referencia. El análisis, organizado por variable, permite revisar el desempeño individual de cada sensor y su capacidad para reproducir patrones coherentes con las mediciones oficiales. También se describen las modificaciones y ajustes de diseño que surgieron durante su exposición a condiciones reales. Para este capítulo se consideraron las referencias [45], [48],[49], [50] y [51].

Finalmente, se registraron las variables meteorológicas radiación UV, cantidad de lluvia y porcentaje de agua, las cuales no fueron incluidas en el análisis principal por no contar con un instrumento de referencia o por no aportar información adicional relevante. No obstante, sus gráficas en formato crudo se incorporan en el Anexo A (a excepción de la cantidad de lluvia, ya que durante el período de medición no se registraron precipitaciones), con el fin de asegurar la completitud y trazabilidad del proceso de medición.

5.2 Modificaciones derivadas de las pruebas de campo

Inicialmente, el diseño de la estación meteorológica no contemplaba un sistema activo de ventilación, ya que la disipación pasiva durante las pruebas sin carcasa resultaba adecuada para las configuraciones preliminares. No obstante, al integrar todos los componentes dentro de la cabina la temperatura interna del módulo step down aumentó, quedando cerca de los rangos recomendados para operación continua. Con el fin de garantizar la confiabilidad de las mediciones y evitar fallas asociadas

al sobrecalentamiento, se incorporó posteriormente un ventilador de 5V 0,2A disponible en el laboratorio.

Este componente no estaba considerado en el dimensionamiento energético inicial, por lo que el consumo total del sistema aumentó ligeramente. Aunque el panel de 20 W continúa siendo funcional, la inclusión del ventilador reduce el margen energético diario, afectando la autonomía nocturna del sistema.

5.3 Experimentación y análisis de resultados

Para el proceso de experimentación y análisis de resultados, se trabajó únicamente con aquellas variables que pudieron ser comparadas directamente con la estación de referencia presentes en [53]. Esta selección permite validar el desempeño de los sensores de la EMA bajo condiciones reales y asegurar la consistencia metodológica del estudio. Quedaron excluidos de este análisis el sensor de radiación por las razones comentadas en el apartado 4, el pluviómetro; debido a que durante el periodo de muestreo no se registraron eventos de precipitación; y el sensor de lluvia, ya que la estación de referencia no dispone de un sensor comparable. De este modo, el análisis se centra exclusivamente en las variables dirección del viento, velocidad del viento, presión atmosférica, temperatura y humedad.

La figura 5.1 muestra la instalación y la ubicación de la estación durante la experimentación.

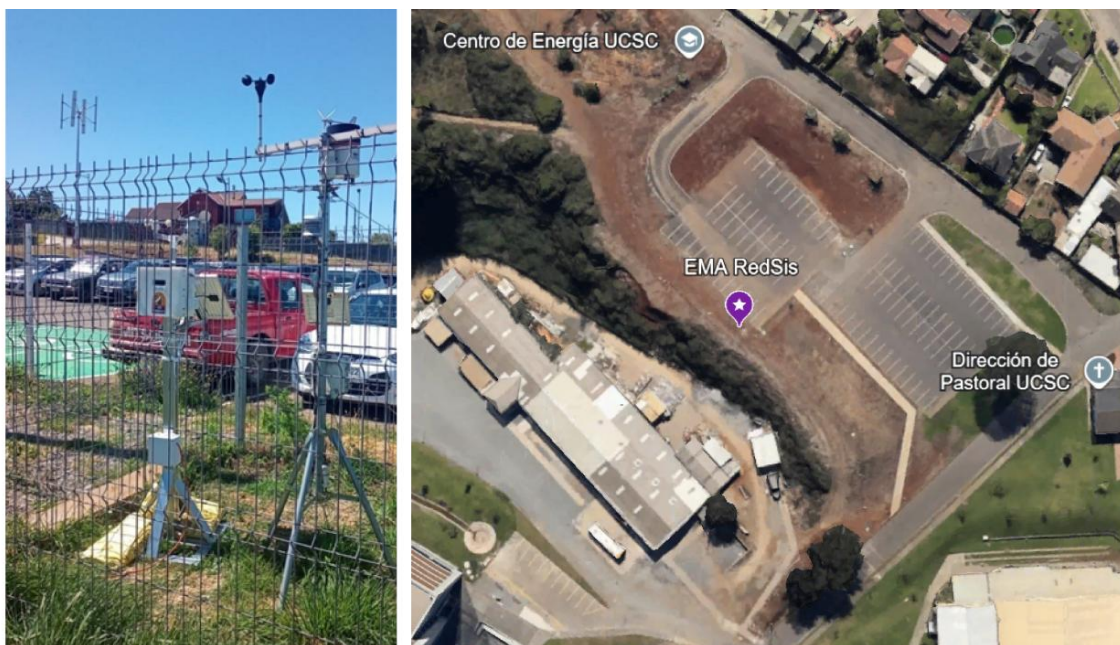


Fig. 5.1 Instalación y ubicación de la EMA.

Durante las pruebas, se observó en términos de autonomía energética que la EMA dependía fuertemente de la disponibilidad diaria de radiación solar. El sistema podía operar a partir de las 7:30-8:00 hrs. Con mayor estabilidad a partir de las 11:00 hrs. No obstante, la descarga comenzaba a hacerse evidente entre las 19:00 y 20:00 horas, coincidiendo con la disminución de la irradiancia logrando mantenerse operativa hasta aproximadamente las 4:00–5:00 de la madrugada mediante 6 baterías en paralelo. Este resultado indica que la cantidad de baterías utilizada no fue suficiente para asegurar operación continua durante toda la noche, evidenciando un funcionamiento extendido pero limitado por la capacidad de almacenamiento y el consumo combinado del Arduino Nano y el ESP8266.

Veleta

Aunque la calibración experimental en laboratorio presentada en Tabla 4.2 evidenció que la veleta presenta una respuesta eléctrica coherente y estable, con errores de voltaje inferiores al 1%. Sin embargo, al comparar las mediciones de dirección del viento con la estación de referencia se obtuvo un error angular promedio de $-70,5^\circ$ y un RMSE de $81,4^\circ$. La presencia de un sesgo angular aproximadamente constante es más consistente con un desalineamiento azimutal de la veleta durante la instalación (orientación del “N” del sensor rotada respecto al norte de referencia) que con efectos puramente aerodinámicos del emplazamiento, los cuales suelen introducir errores más variables y dependientes del régimen de viento. No obstante, debido a que la comparación se concentra en un rango direccional específico (220° – 290°), no es posible asegurar con estos datos que el error sea idéntico en todo el dominio 0° – 360° , por lo que la causa de desalineamiento se considera la más probable, pero no la única.

El suavizado de los datos mediante mediana móvil se aplicó únicamente durante el procesamiento en Python, con el fin de reducir el ruido puntual y obtener una comparación más clara entre la EMA y la estación de referencia. Este procedimiento no se implementa en la estación física, ya que el objetivo es corregir exclusivamente el sesgo sistemático (offset) y mantener las lecturas instantáneas reales del sensor. La calibración final incorporada en el código del Arduino consiste únicamente en la aplicación del offset angular obtenido durante el análisis.

Para corregir el sesgo sistemático se determinó un offset angular óptimo probando todos los posibles desplazamientos entre 0° y 359° , identificando aquel que minimizara el error cuadrático

medio (RMSE) entre las direcciones medidas por la EMA y las registradas por la estación de referencia. De esta manera se obtuvo el ángulo que, al sumarlo a las lecturas de la veleta, alinea estadísticamente ambas series. El offset de 73° constituye la corrección utilizada para compensar la calibración inicial del sensor.

Una vez determinado el offset óptimo, se aplicó esta corrección a todas las lecturas de la EMA y se recalcularon las métricas finales, tales como el error angular promedio y el RMSE, con el fin de cuantificar la eficacia del ajuste. El offset utilizado redujo el error angular promedio a $-0,45^\circ$, eliminando así el desfase constante entre ambas series. Tras la corrección, el RMSE disminuyó a $21,23^\circ$, valor coherente con el desempeño esperado para una veleta tipo reed switch, cuya resolución angular está limitada por el número de imanes o sectores discretos que activan el interruptor. Esto produce saltos angulares más grandes que los de una veleta profesional y una respuesta menos lineal, consistente con la resolución teórica del sensor, que presenta 16 posiciones discretas separadas por $22,5^\circ$ según [37].

El procedimiento anterior permite compensar tanto el desalineamiento mecánico como los errores sistemáticos del sensor, sin necesidad de modificar físicamente el instrumento. A continuación, en Fig. 5.2, Fig. 5.3 y Fig. 5.4 se pueden visualizar la evolución temporal de las mediciones, su distribución angular, así como los errores asociados. Cabe destacar que la comparación se realizó únicamente para direcciones de viento entre 220° y 290° , rango predominante durante el período de medición. La falta de registros en otras direcciones limita el análisis comparativo a este intervalo angular.

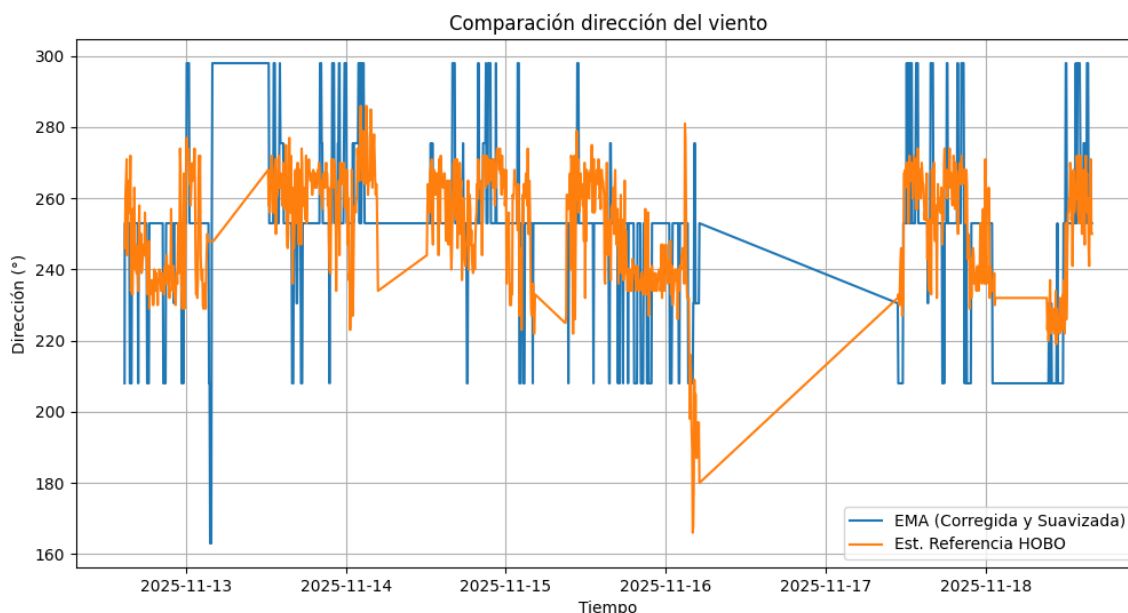


Fig. 5.2 Comparación Temporal de la dirección del viento entre el prototipo de EMA y la estación HOB0.

Aunque la veleta del prototipo de EMA incorpora un filtro RC ($10\text{ k}\Omega + 100\text{ nF}$) para suavizar la señal analógica, en el gráfico de la figura 5.2 aún se observan variaciones bruscas y dispersión en comparación con la estación de referencia. Esto se debe a que el filtro RC atenúa el ruido de muy alta frecuencia, pero no elimina variaciones propias del sensor resistivo, pequeños desplazamientos mecánicos por ráfagas, vibraciones del mástil o fluctuaciones del ADC. Aun así, ambas series mantienen una tendencia general similar entre 250° y 270° , siguiendo los mismos cambios de dirección. En resumen, aunque el filtro RC reduce parte del ruido, el comportamiento observado sugiere que la veleta requiere un filtrado digital adicional para mejorar la estabilidad sin comprometer su respuesta dinámica.

El histograma de la Fig. 5.3 indica una distribución centrada cerca de 0° , lo que evidencia que, tras la corrección aplicada, la veleta tiende en promedio a coincidir con la dirección registrada por la estación de referencia. Sin embargo, la dispersión sigue siendo amplia, con errores entre -40° y $+40^\circ$ y algunos valores extremos aislados. La mayor concentración de valores entre -25° y $+15^\circ$ indica que la mayoría de las mediciones presentan un desvío moderado, reflejando limitaciones inherentes al sensor resistivo, pequeñas variaciones mecánicas y ruido residual del sistema. En conjunto, el histograma evidencia que la calibración mejora la alineación general, pero persisten errores angulares relevantes que justifican la aplicación de métodos de filtrado adicional.

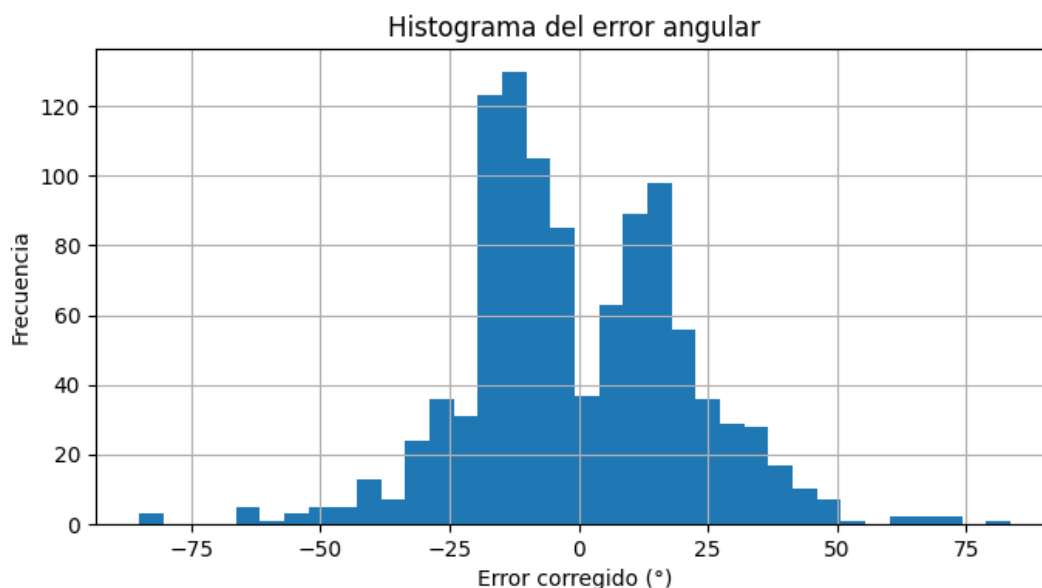


Fig. 5.3 Histograma de la diferencia angular corregida.

El gráfico polar de la Fig. 5.4 permite visualizar de forma intuitiva la distribución angular del viento registrado por ambas estaciones. La estación de referencia exhibe una clara concentración de direcciones entre 210° y 270° , indicando viento dominante del suroeste al oeste durante el periodo analizado. En contraste, los datos de la EMA aparecen más concentrados alrededor de un único sector estrecho, lo que refleja una menor variabilidad registrada por la veleta. Esto sugiere que el sensor posee limitaciones en resolución y en su respuesta a cambios pequeños de dirección. En conjunto, el gráfico indica que, si bien la EMA captura el sector general del viento, no reproduce completamente la amplitud de variaciones observadas en la estación de referencia.



Fig. 5.4 Comparación polar de la dirección del viento.

Anemómetro

La Fig. 5.5 corresponde a la etapa de validación donde se comparan las velocidades de viento de la estación HOBO (referencia) con las velocidades del prototipo después de aplicar la calibración operativa a un conjunto de datos independiente a los utilizados para realizar la calibración y que se observan en la figura 4.5. Esta representación permite evaluar el grado de concordancia entre ambas series temporales y analizar la eficacia del ajuste aplicado.

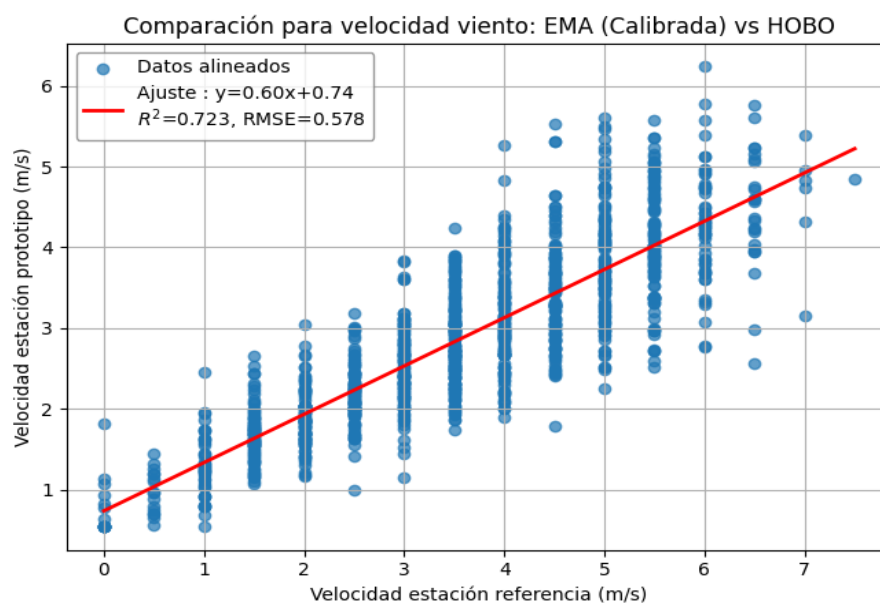


Fig. 5.5 Diagrama de dispersión para la velocidad del viento entre la EMA y HOBO.

De la figura 5.5 se observa una relación lineal positiva clara entre la velocidad medida por la estación de referencia y la registrada por la EMA calibrada, lo que indica que el sensor reproduce en forma consistente la variabilidad del viento.

Antes de la calibración, los datos presentaban un $R^2 = 0.688$ y un $RMSE = 0.843$ m/s, mientras que después de aplicar la calibración operativa estos valores cambiaron a $R^2 = 0.723$ y $RMSE = 0.578$ m/s. El aumento en R^2 indica una mejor capacidad para explicar la variabilidad del viento medida por la estación de referencia, y la disminución del RMSE evidencia una mejora en el error global. En conjunto, la calibración reduce el sesgo sistemático y mejora el acuerdo general con la HOB0, aunque persiste una subestimación relativa en eventos de mayor velocidad.

No obstante, la distribución se siga mostrando en “bandas” evidencia una resolución discreta del prototipo (cuantización), lo que limita la concordancia punto a punto. Además, al comparar con el comportamiento ideal (línea $y = x$), se aprecia un sesgo residual: el prototipo tiende a sobreestimar levemente en bajas velocidades (intercepto positivo) y a subestimar en velocidades altas (pendiente menor que 1). En consecuencia, la calibración mejora la coherencia general con la referencia, aunque persisten limitaciones asociadas al sensor utilizado.

Presión

La Fig. 5.6 corresponde a la etapa de validación donde se comparan las presiones atmosféricas de la estación HOB0 (referencia) con las velocidades del prototipo después de aplicar la calibración operativa a un conjunto de datos independiente a los utilizados para realizar la calibración y que se observan en la figura 4.8. A partir del resultado se puede evaluar el grado de concordancia entre ambas series temporales y analizar la eficacia del ajuste aplicado.

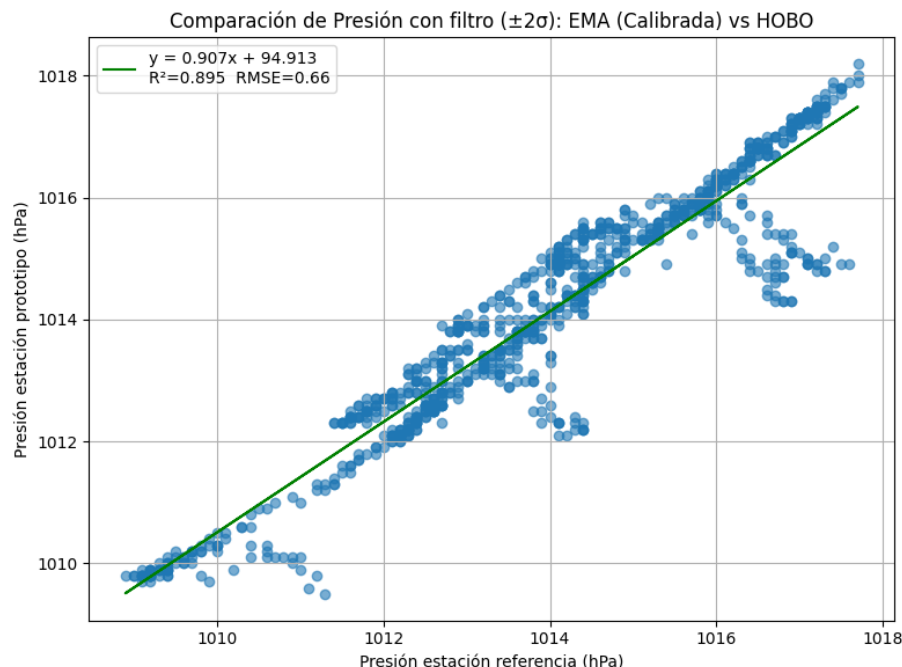


Fig. 5.6 Diagrama de dispersión para la presión entre la EMA y HOBO.

De la Fig. 5.6 se observa que la calibración aplicada al sensor de presión de la EMA mejora la consistencia de la relación lineal con la estación de referencia HOBO. Antes del ajuste, los datos presentaban un $R^2 = 0.782$ y un $RMSE = 0.39$ hPa, mientras que después de la calibración estos valores cambiaron a $R^2 = 0.895$ y $RMSE = 0.66$ hPa. El aumento de R^2 indica que, en conjunto, la EMA sigue de forma más coherente la variabilidad temporal de la presión registrada por la referencia. Sin embargo, el incremento del RMSE evidencia que persisten desviaciones puntuales respecto de la HOBO.

Las agrupaciones paralelas o “ramas” observadas pueden explicarse por desplazamientos sistemáticos en la estimación de presión del sensor barométrico BMP180 asociados a cambios térmicos y a reinicios del sistema. Tras los reinicios debido a las limitaciones de autonomía, el sensor y el microambiente dentro del gabinete (aire interno y paredes) atraviesan un período transitorio hasta alcanzar un nuevo equilibrio térmico. Dado que el BMP180 calcula la presión aplicando una compensación en función de la temperatura medida por el propio chip, pequeñas diferencias en el estado térmico al momento de energizarse pueden traducirse en un sesgo en la presión estimada, generando nubes de puntos desplazadas que aparecen como “ramas” aproximadamente paralelas. Al tratarse de un patrón coherente y no de errores puntuales, este comportamiento puede no ser removido completamente por un filtro de atípicos basado en $\pm 2\sigma$.

En general, la calibración permite obtener un comportamiento más representativo y físicamente consistente, especialmente en el rango de medios a altos para las presiones, aún cuando el error puntual aumente debido a la redistribución de los residuos en torno al nuevo modelo.

Sensor de Temperatura y Humedad

La Fig. 5.7 corresponde a la etapa de validación donde se comparan las temperaturas de la estación HOBO (referencia) con las del prototipo después de aplicar la calibración operativa a un conjunto de datos independiente a los utilizados para realizar la calibración y que se observan en la figura 4.8. A partir del resultado se puede evaluar el grado de concordancia entre ambas series temporales y analizar la eficacia del ajuste aplicado.

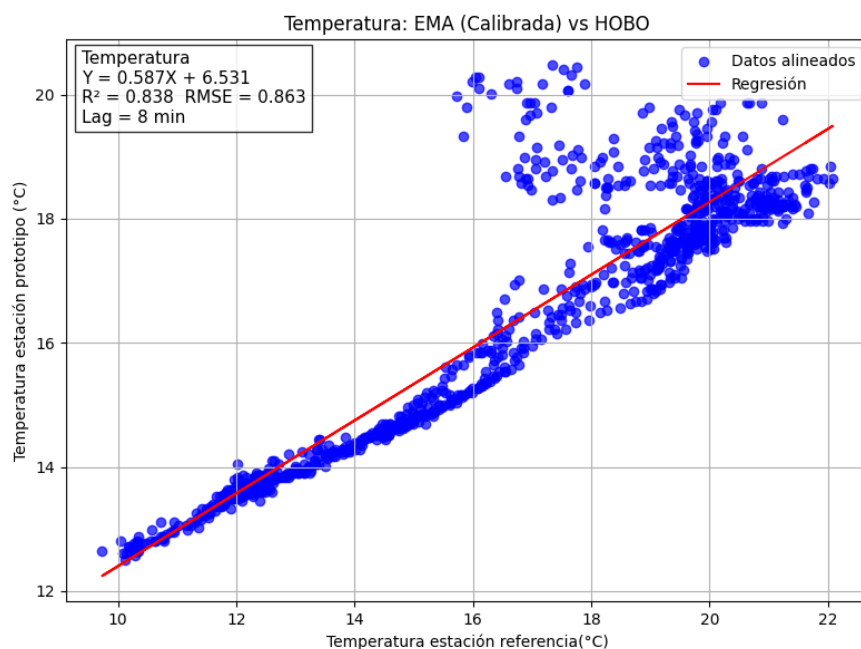


Fig. 5.7 Diagrama de dispersión para la temperatura entre la EMA y HOBO.

En la Fig. 5.7 se observa que la calibración aplicada al sensor mejora la coherencia de las mediciones respecto a la estación de referencia. Antes del ajuste, los datos presentaban un $R^2 = 0.733$ y un $RMSE = 1.527$ °C, mientras que tras la calibración estos valores cambiaron a $R^2 = 0.838$ y $RMSE = 0.863$ °C. El aumento de R^2 indica una relación lineal más consistente con la referencia, y la disminución del RMSE evidencia una reducción del error promedio, es decir, una mejor aproximación global de las mediciones calibradas a los valores de HOBO.

La regresión mostrada sugiere que, pese a la mejora general, aún persisten discrepancias dependientes del rango: la pendiente menor que 1 implica una tendencia a subestimar la temperatura en valores altos. La dispersión observada en ciertos tramos podría asociarse a efectos no lineales y a condiciones ambientales (por ejemplo, cambios rápidos de temperatura o influencia de radiación/ventilación del montaje), por lo que la calibración lineal corrige el sesgo principal pero no elimina completamente los desvíos puntuales.

La nube de puntos dispersa se asocia a condiciones no ideales para la medición de temperatura de aire (principalmente carga radiativa y ventilación). En periodos diurnos y/o de bajo viento, la carcasa de la EMA puede calentarse y modificar la lectura, mientras que en condiciones más homogéneas (noche o alta mezcla atmosférica) la relación con la referencia se estrecha, generando la banda compacta. de tiempo y un desfase temporal no constante contribuyen a la dispersión.

La figura 5.8 ilustra el diagrama de dispersión entre los valores de humedad relativa registrados durante la experimentación una vez alineadas temporalmente las series. Cada punto corresponde a un par de mediciones tomadas en el mismo instante. En esta se puede notar que la nube de puntos no se concentra alrededor de una tendencia definida, tanto para los datos originales como para la calibración aplicada, provocando una ausencia de mejora debido a que el problema principal no es un sesgo constante, sino el comportamiento dinámico del sensor. Las formas de las gráficas reflejan la presencia de histéresis y de diferentes retardos según si la humedad está aumentando o disminuyendo. Como consecuencia, un mismo valor medido por la EMA se asocia a múltiples valores distintos en la estación de referencia. Por lo que la representación lineal durante esta prueba no es capaz de describir adecuadamente la relación entre ambos sensores para la humedad relativa.

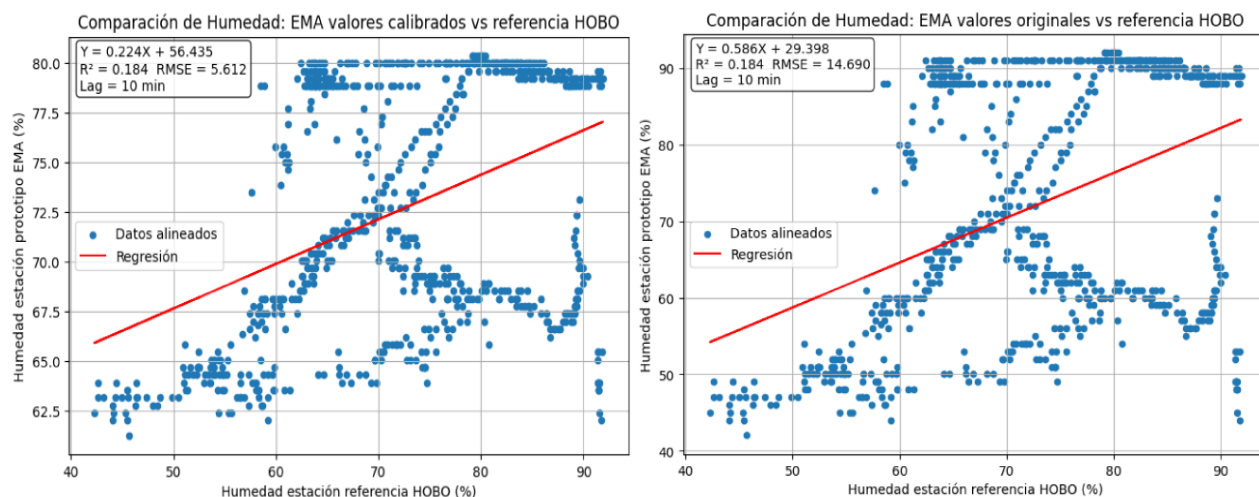


Fig. 5.8 Evaluación del ajuste para la humedad (valores calibrados y originales).

En la Fig. 5.9 se comparan las series temporales de humedad relativa medidas por la estación de referencia (HOBO) y por la EMA, tras aplicar el desfase temporal óptimo para este sensor (10 min). Se observa que, si bien existen intervalos donde ambas señales presentan una evolución similar y difieren principalmente por un retardo temporal, la serie de la EMA muestra además tramos extensos con valores casi constantes cercanos al 90% HR, mientras la referencia continúa variando. Este comportamiento es consistente con un régimen de saturación o recorte del sensor/procesamiento en alta humedad (mesetas), lo que reduce la sensibilidad en ese rango y genera discrepancias que no pueden corregirse solo con un ajuste de lag. La recuperación hacia valores variables en ciertos periodos sugiere una salida transitoria de dicho régimen, atribuible a cambios ambientales (descenso de HR, secado/ventilación) o al propio método de adquisición. En conjunto, la combinación de retardos dinámicos y limitación en el rango alto de HR puede explicar la dificultad de obtener una relación simple y estable entre ambas mediciones.

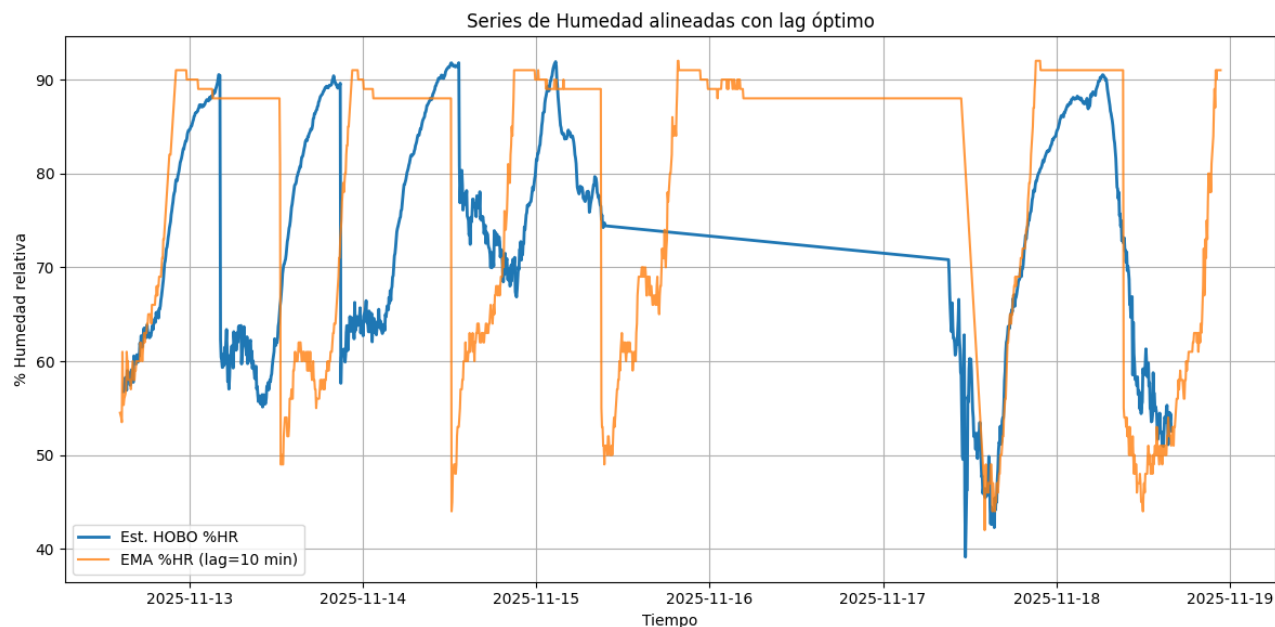


Fig. 5.9 Comparación de series de humedad relativa EMA vs HOBO.

La figura 5.10 presenta una comparación de la distribución de los valores de humedad relativa obtenidos por la estación HOBO y la EMA. En la estación HOBO, la mediana se ubica en torno a valores intermedios, mientras que la dispersión general es amplia pero relativamente simétrica. En contraste, la EMA exhibe un rango intercuartílico ligeramente mayor y un ensanchamiento hacia valores altos de humedad, lo que sugiere una mayor frecuencia de estados cercanos a la saturación. Aunque ambas estaciones registran valores mínimos similares, la EMA presenta una acumulación más marcada en el cuartil superior y alcanza de forma recurrente valores cercanos al 90%. Esto es consistente con los patrones observados en los registros horarios, donde la EMA tiende a permanecer durante lapsos prolongados en condiciones de humedad elevada. En conjunto, estos resultados indican que la EMA tiende a sobre representar los episodios muy húmedos y muestra una variabilidad interna ligeramente mayor que la estación HOBO.

Para reducir la permanencia en saturación ($\sim 90\%$ HR) se requiere disminuir la condensación y el microclima húmedo alrededor del sensor. En la práctica, esto se logra mejorando la ventilación del abrigo, evitando ingreso de agua/rocío y usando membranas hidrofóbicas o protecciones adecuadas; con ello el sensor recupera su respuesta y vuelve a reflejar transiciones de humedad de forma más continua, reduciendo mesetas y retardos dentro del rango que opera el DHT11.

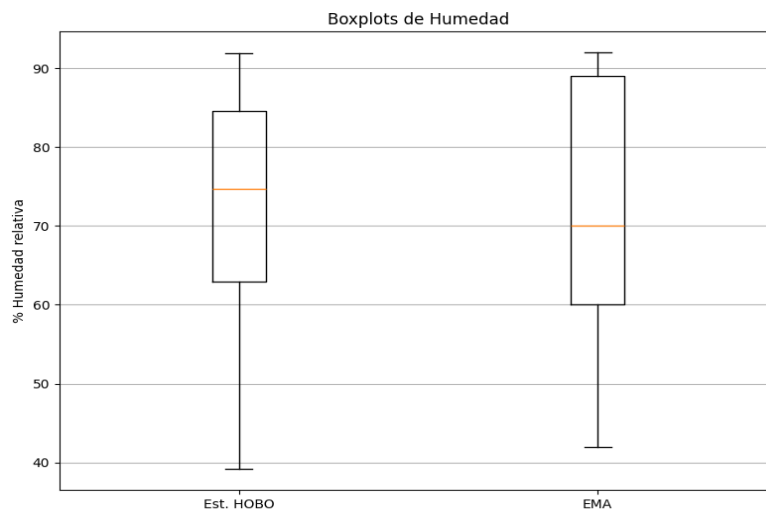


Fig. 5.10 Diagrama de cajas para la humedad registrada por ambas estaciones.

Si se examinan las gráficas obtenidas en la última experimentación para el caso de la humedad, se identifica que la Fig. 4.10 corresponde a un periodo con mayor estabilidad higrotérmica que el registrado al extender la prueba durante intervalos más prolongados. En estas pruebas aparecieron fenómenos dinámicos significativos: retardos variables de hasta 10 minutos entre sensores, histéresis entre los ciclos de aumento y disminución de la humedad, y saturación del sensor EMA al aproximarse al 90 % HR. Bajo estas condiciones, un mismo valor reportado por la EMA puede asociarse a múltiples valores distintos en la estación de referencia, lo que impide establecer una relación funcional única y afecta severamente cualquier ajuste lineal global. Debido a estas limitaciones, los valores superiores al 80 % HR deben interpretarse con cautela.

Para obtener una calibración algo más representativa, para fines de este informe se decidió trabajar exclusivamente con datos registrados durante condiciones cercanas al equilibrio higrotérmico, en las cuales el comportamiento dinámico y los efectos de histéresis son mínimos. Utilizando los datos de la primera calibración se aplicó un filtrado para eliminar los intervalos con cambios bruscos de humedad, pues en ellos aparecen comportamientos erráticos, no lo suficientemente comprendido (posible saturación/recorte, histéresis o efectos asociados a condiciones de alta humedad y a la carcasa), lo que limita la obtención de una calibración robusta.

Este criterio de selección consistió en conservar únicamente los puntos donde la variación de humedad entre mediciones consecutivas de 5 minutos fue inferior al 2 % como se describe en la ecuación (12). Este umbral fue obtenido de forma experimental y se justifica porque representa un cambio suficientemente pequeño para considerar que ambos sensores tienen tiempo de alcanzar su

equilibrio higrotérmico sin efectos transitorios significativos. Valores de variación mayores indican que la humedad está cambiando demasiado rápido y, por lo tanto, los sensores se encuentran en diferentes estados dinámicos (subida, bajada o saturación), lo que altera la relación entre ellos.

$$|H(t) - H(t-5\text{min})| < 2\% \quad (12)$$

Seguidamente, en la Fig. 5.11, se presenta la comparación entre la humedad medida por la EMA y la registrada por la estación HOBO durante periodos en equilibrio higrotérmico. En esta se observa que, al trabajar únicamente con los datos filtrados correspondientes a estos intervalos, se obtiene una relación lineal clara y consistente entre ambos sensores. El coeficiente de determinación $R^2 = 0,716$ se considera adecuado para sensores económicos de humedad relativa. Por esta razón, la calibración final se realizó exclusivamente a partir de estos intervalos en equilibrio, en los cuales la relación entre ambos instrumentos representa de manera más fiel su comportamiento en condiciones estacionarias.

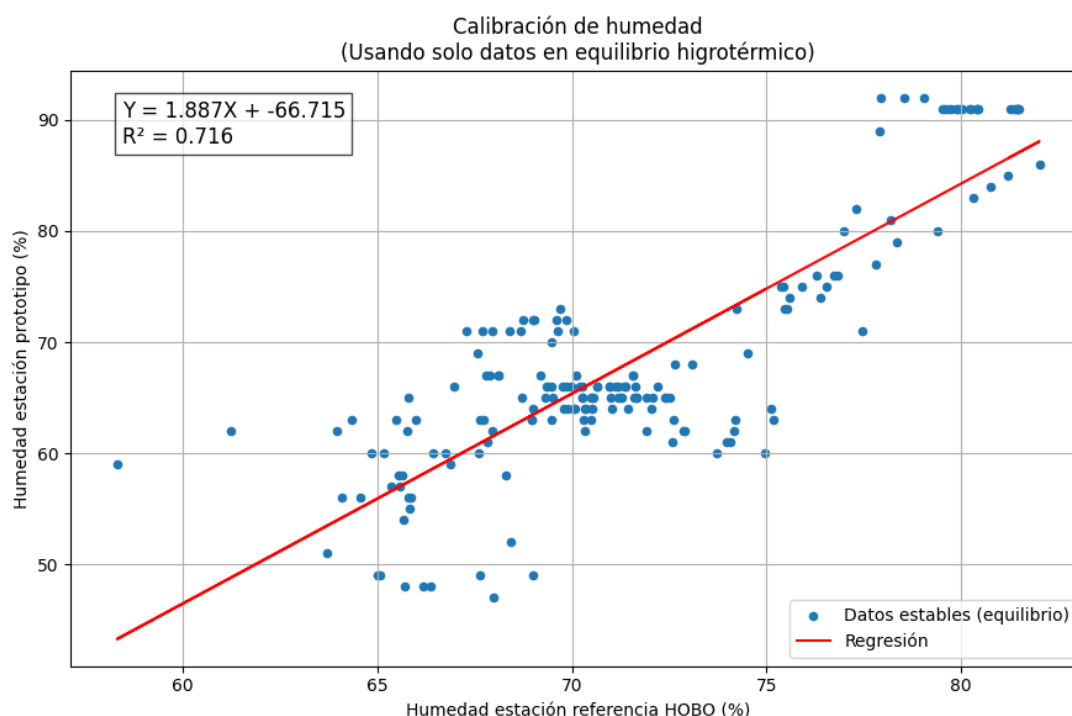


Fig. 5.11 Relación entre humedad EMA y HOBO bajo condiciones de equilibrio.

5.4 Visualización Remota de Datos en Adafruit IO

Para el monitoreo remoto y la visualización de los datos generados por la estación meteorológica desarrollada en este prototipo, se requiere una plataforma que facilite la recolección, el almacenamiento y la presentación de información en tiempo real. En este contexto, Adafruit IO se presenta como una solución accesible, confiable y especialmente diseñada para proyectos de IoT. Su integración sencilla con dispositivos como microcontroladores y módulos Wi-Fi, su compatibilidad con el protocolo MQTT y la posibilidad de crear paneles personalizados para visualizar variables ambientales, hacen de esta herramienta una opción adecuada para el proyecto.

En la Fig. 5.12 se aprecia el panel de monitoreo en tiempo real diseñado para la EMA [52]. En él se visualizan los valores instantáneos de temperatura ambiente, humedad relativa, presión barométrica y porcentaje de agua del sensor de lluvia. Además, se incluyen un gráfico temporal de velocidad del viento, un registro de la dirección del viento y un panel de precipitación. El mapa satelital permite geolocalizar la estación y verificar su entorno inmediato.



Fig. 5.12 Panel de monitoreo de estación meteorológica en tiempo real 15/11/25.

Si bien la plataforma admite la representación gráfica de todas las variables almacenadas (incluida la radiación UV), en este dashboard solo se muestran aquellas con calibración validada, priorizando una visualización clara y ordenada de los parámetros con comportamiento fiable.

5.5 Costos del Prototipo

Para determinar la viabilidad económica del sistema propuesto, es fundamental identificar los costos involucrados en su construcción, los cuales corresponden a costos de producción. La estimación de estos costos se realizó considerando un enfoque simplificado, basado en los principios de la Ingeniería Económica [54], desglosando los costos en directos (materia prima, mano de obra) e indirectos (uso de equipamiento y depreciación de maquinaria). En consecuencia, el costo de producción se calculó como la suma de los costos directos e indirectos.

$$\text{Costo Producción} = C.Materia Prima + C.Mano de obra + C.Indirectos \quad (13)$$

A continuación, en la Tabla 6.1 se detallan los componentes empleados y sus respectivos valores, información que servirá como referencia para el costo de materia prima directa.

TABLA 5.1 Componentes y Costos asociados a la Estación Meteorológica

Componente/Material	Medida	Cantidad	Precio unitario	Total
ESP 8266	Unidad	1	\$ 8.477	\$ 8.477
Sensor DHT11	Unidad	1	\$ 1.810	\$ 1.810
Sensor ML8511	Unidad	1	\$ 2.000	\$ 2.000
Kit que incluye Anemómetro, pluviómetro y veleta	Unidad	1	\$ 119.990	\$ 119.990
Arduino Nano	Unidad	1	\$ 5.900	\$ 5.900
GPS NEO 6M	Unidad	1	\$ 7.990	\$ 7.990
Pantalla LCD 16x2	Unidad	1	\$ 2.400	\$ 2.400
LED Wifi	Unidad	1	\$ 100	\$ 100
Batería litio 3.7V	Unidad	6	\$ 1.500	\$ 9.000
Panel solar 20W	Unidad	1	\$ 13.900	\$ 13.900
MCP73871	Unidad	1	\$ 4.400	\$ 4.400
Step Up MT3608	Unidad	1	\$ 1.390	\$ 1.390
Step Down Lm2596	Unidad	1	\$ 1.600	\$ 1.600
CP10CC cable plano multicolor	10 VIAS 1.27mm AWG28 x 1m	2	\$ 1.340	\$ 2.680

Conectores RJ11 6P4C 90°	Unidad	2	\$ 960	\$ 1.920
Conectores dupont	Kit	1	\$ 3.850	\$ 3.850
Filamento PETG	Rollo de 1Kg	2	\$ 10.990	\$ 21.980
Filamento PLA	223g	1	\$ 2.228	\$ 2.228
Perfil tabiques canal metalcom	61x20x0.5mm 3m	4	\$ 1.580	\$ 6.320
Perfil tabiques montante económico metalcom	38x38x2.4m	2	\$ 1.420	\$ 2.840
Tornillo autoperforante cabeza hexagonal metal	1-1/2 " 12 mm 4 unidades	1	\$ 990	\$ 990
Tornillo autoperforante cabeza lenteja metal	1/2 " 8 mm 100 Unidades x Caja	1	\$ 2.258	\$ 2.258
Total				\$ 224.023

Nota: El método de imputación de costos de filamentos varía según el nivel de consumo efectivo de cada material. En el caso del PLA su uso es parcial por lo que se estima un costo en función del peso utilizado.

Para el cálculo del costo de la mano de obra, se realiza en primer lugar una estimación de las horas efectivas de trabajo dedicadas al desarrollo y construcción del prototipo. Estas horas consideran únicamente actividades asociadas al prototipo funcional final (diseño final, fabricación y ensamblaje, integración electrónica, programación, supervisión de impresión, pruebas y calibración). Dado que no se registró un control horario durante todo el desarrollo, se utilizaron rangos de horas basados en la duración observada de las actividades principales y un criterio de horas efectivas para pruebas/calibración. Las actividades de aprendizaje no se incluyen en el costo de fabricación del prototipo final.

TABLA 5.2 Estimación de horas efectivas de trabajo por actividad

Actividad	Descripción	Horas efectivas (h)
Diseño conceptual	Diseño de la estructura y planificación del sistema	4
Diseño mecánico	Modelado 3D de las piezas	8
Integración electrónica	Conexión de sensores y circuitos	2
Programación	Ajuste del código del sistema	25
Impresión 3D	Preparación, supervisión y postproceso de piezas	3
Fabricación soportes y ensamblaje	Montaje de la estructura	14
Calibración	Ajuste y validación de sensores	40
Total		96

El tiempo total de mano de obra efectiva asociado a la construcción e implementación del prototipo funcional final se estimó en aproximadamente 96 horas. El valor de la mano de obra

estudiantil se fijó en \$5.000/h, mientras que la mano de obra de apoyo durante la fabricación de soportes y el ensamblaje se consideró en \$4.500/h. En consecuencia, el costo correspondiente a la mano de obra directa es el siguiente:

$$MOD = \left(96h * \frac{\$5000}{h} + 14h * \frac{\$4500}{h} \right) = \$543.000 \quad (14)$$

Para el costo indirecto de fabricación se considera al “uso del laboratorio” como “uso de equipamiento productivo”, este se estimó mediante una tarifa horaria compuesta por la depreciación del equipo, el consumo eléctrico y los costos de mantenimiento, aplicado en función de las horas efectivas de impresión registradas durante la fabricación de las piezas del prototipo. No se incorporan otros costos indirectos, ya que aquellos no fueron cuantificables ni atribuibles directamente al proceso de fabricación del prototipo, se encuentran fuera del alcance del análisis de costos definido para este estudio.

TABLA 5.3 Horas de impresión por impresora

Impresora	Material	Horas de impresión (h)
Bambulab P1S	PETG	28,3163
	PLA	12,0167
Creality Ender S1	PETG	3,6833
	PLA	0,7131
Total		46,5628

En los casos de las impresoras 3D, los fabricantes no suelen indicar la vida útil específica en horas, ya que no se considera un bien consumible y su durabilidad depende del mantenimiento/condiciones de uso. En foros oficiales de las marcas [55], se señala que con el mantenimiento adecuado estas pueden funcionar durante miles de horas de impresión antes de requerir reemplazo de partes menores. Por lo que para calcular este valor se considera para ambas impresoras una vida útil estándar de 5 años con un uso promedio de 6h diarias.

$$Vida\ útil = (6\ h * 5\ días * 52\ semanas) * 5\ años = \frac{1560h}{año} * 5\ años = 7800h \quad (15)$$

Así, la vida útil para ambas impresoras se estima en 7800 horas de impresión, considerando que estas operan bajo un uso académico en ambos laboratorios con funcionamiento de lunes a viernes.

Para calcular la depreciación anual de manera simplificada se emplea el método de línea recta, utilizando el precio actual de mercado para ambas impresoras. Además, es necesario definir el valor residual, entendido como el valor estimado del equipo al término de su vida útil. En este caso, dado que no se dispone de información sobre el valor residual de ninguna de las impresoras, se asume un valor residual nulo, considerando una depreciación total asociada a la obsolescencia tecnológica y al desgaste por uso. De este modo, se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Depreciación anual}_{Bambulab} &= \frac{\text{Costo impresora} - \text{Valor residual}}{\text{Vida útil}} \\ &= \frac{\$999.990 - 0}{7800h} = \$128,2/h \\ \text{Depreciación anual}_{Crealty} &= \frac{\$299.990 - 0}{7800h} = \$38,5/h \end{aligned} \quad (16)$$

En cuanto al mantenimiento de la máquina, se considera que corresponde a un 5% de los costos de la impresora durante un año de uso:

$$\begin{aligned} \text{Mantenimiento por hora}_{Bambulab} &= \frac{\text{Costo impresora} * 5\%}{\text{horas de uso anual}} = \frac{\$999.990 * 0,05}{1560h} \\ &= \$32/h \\ \text{Mantenimiento por hora}_{Crealty} &= \frac{\$299.990 * 0,05}{1560h} = \$9,62/h \end{aligned} \quad (17)$$

Para el caso del consumo eléctrico, como la UCSC opera bajo el régimen de cliente regulado, el costo de la energía eléctrica se estimó utilizando un valor de referencia de \$177,85/kWh, consistente con los datos publicados [56] para el costo de electricidad de empresas (incluido consumo, transmisión y distribución). Mientras que la potencia eléctrica de las impresoras se obtuvo a partir de la información proporcionada por el fabricante, siendo el mismo valor para ambas impresoras.

$$\begin{aligned} \text{Consumo eléctrico}_{Bambulab} &= \text{Consumo eléctrico}_{Crealty} \\ &= P_{\text{impresora}} * C_{\text{electricidad}} = 0,35kW * \$177,85/kWh \\ &= \$62,25/h \end{aligned} \quad (18)$$

Finalmente, los costos por el uso de las impresoras son:

$$\begin{aligned} \text{Costo por uso}_{Bambulab} &= (\$128,27/h + \$32/h + \$62,25/h) * 40,333h \\ &= \$222,42/h * 40,333h = \$8974,9 \\ \text{Costo por uso}_{Crealty} &= (\$38,5/h + \$9,62/h + \$62,25/h) * 4,3964h \\ &= \$110,37/h * 4,3964h = \$485,2 \end{aligned} \quad (19)$$

TABLA 5.4 Costos de producción estimados para el prototipo

Costos de Producción	Detalle	Monto
Materia prima directa	Componentes electrónicos y materiales	\$ 224.023
Mano de obra directa	Encargado principal del proyecto y apoyo en construcción de soportes	\$ 543.000
Costo indirecto de fabricación	Uso de la impresora BambuLab	\$ 8.975
Costo indirecto de fabricación	Uso de la impresora 3D Creality	\$ 485
Total		\$ 776.485

5.5.1 Comparación cuantitativa de costos

Para evaluar la viabilidad económica de la estación meteorológica desarrollada, se comparó el costo total estimado de producción con el precio de mercado de la estación comercial ATMOS 41W con el objetivo de entregar una estimación comparativa a nivel de componentes y enmarcar el costo del desarrollo dentro de valores típicos del mercado. Esta estación comercial integra funcionalidades equivalentes como conectividad inalámbrica (WiFi) y geolocalización (GPS), tiene un valor de mercado de \$4.044.858 CLP [58]. Cabe aclarar que tanto en la Tabla 6.1 como en la comparación no se consideran los recargos asociados a importaciones y envíos.

El análisis se realizó a partir del coeficiente de costo relativo (costo de oportunidad) [57], que consiste en un indicador para comparar el costo de dos sistemas, permitiendo expresar cuántas veces más costosa es una alternativa respecto de otra. La fórmula general es:

$$Pr = \left[\frac{Px}{Py} \right] \quad (20)$$

Donde Pr es el coeficiente de costo relativo (precio relativo), Px corresponde al precio del primer producto/servicio y Py al precio del segundo producto/servicio. En este caso la formula queda:

$$Pr = \left[\frac{P_{estación\ comercial}}{P_{estación\ desarrollada}} \right] = \frac{4044858}{776.485} \approx 5,21$$

Esto sugiere que, en términos referenciales, el precio de la estación comercial ATMOS 41W es aproximadamente 5 veces el costo de fabricación del prototipo desarrollado. Expresado como razón costo/precio, el prototipo representa cerca del 19 % del valor de dicha estación, es decir, una diferencia relativa del 81 % respecto del precio de mercado del equipo comercial.

De manera análoga, si se compara con la estación de referencia HOBO serie RX3004 (Kit Básico), con un precio aproximado de \$3.412.616 CLP [59], este valor corresponde a cerca de 4,39 veces el costo de fabricación del prototipo; en este caso, el prototipo equivale aproximadamente al 22,75% del valor del equipo comercial, con una diferencia relativa del 77,25%.

En consecuencia, el costo de producción estimado del prototipo resulta considerablemente menor que el precio de mercado de estaciones comerciales de características similares. Cabe aclarar que los resultados deben interpretarse como una comparación referencial y no como una equivalencia económica directa.

Capítulo 6 Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

Desde el punto de vista técnico, la estación propuesta incorpora sensores discretos para medir variables meteorológicas esenciales: temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar (UV), velocidad y dirección del viento, así como precipitación, a través de un conjunto de sensores comerciales de bajo costo. Además, incluye un módulo GPS para posicionamiento geográfico y un microcontrolador con conectividad WiFi (ESP8266), lo que permite la transmisión remota de datos hacia plataformas en la nube como Adafruit IO.

No obstante, es importante señalar que las limitaciones del diseño se relacionan principalmente con la precisión, resolución y estabilidad a largo plazo de los sensores empleados. A diferencia de la ATMOS 41W y la HOBO RX3004, cuyos sensores cuentan con certificaciones industriales y rangos de operación extendidos, los componentes utilizados en la estación DIY pueden presentar desviaciones significativas por su formato simple de operación, entendidas en este trabajo como discrepancias cuantificadas mediante el RMSE tras la calibración, del orden de 0,863 °C (temperatura), 0,66 hPa (presión) y 0,578 m/s (viento).

Es por eso que los resultados obtenidos permiten afirmar que la hipótesis planteada se cumple de manera parcial dentro del alcance del proyecto. Debido a que el prototipo logró medir y comparar adecuadamente 3 de las 5 variables registradas por la estación de referencia: temperatura del aire, presión atmosférica y velocidad del viento. En cambio, la humedad relativa y la dirección del viento no alcanzaron el mismo nivel de concordancia con la referencia, por lo que su comparación se consideró limitada en el contexto de este estudio. Esto permitió verificar parcialmente la coherencia y confiabilidad del prototipo dentro de las limitaciones propias de los sensores utilizados.

En cuanto a la transmisión de datos, esta presentó un desfase temporal respecto a la estación de referencia debido a limitaciones propias del sistema IoT utilizado. El Arduino Nano al no contar con un reloj en tiempo real (RTC) genera su temporización interna mediante ciclos de programa, lo que provoca pequeñas derivas acumuladas en el tiempo. Se evaluó utilizar la hora del GPS para corregir este aspecto; sin embargo, durante las pruebas el módulo presentó desconexiones intermitentes al operar dentro de la carcasa, lo que reducía la confiabilidad de emplearlo como fuente estable de tiempo. Por otra parte, plataformas como Adafruit IO registran la marca temporal del

momento en que los datos son recibidos y no necesariamente cuando fueron aumentando el corrimiento. En conjunto, estos factores explican que las mediciones aparezcan desplazadas en el tiempo, pese a que el comportamiento general de las variables se mantuvo coherente durante las pruebas.

La alimentación del sistema demostró ser funcional, reflejando las restricciones del uso de una batería de capacidad acotada. Si bien el prototipo logró operar en condiciones controladas y sostener el funcionamiento de los microcontroladores y sensores por periodos largos de aproximadamente de 17-19 horas, la autonomía se vió afectada por factores como la variabilidad de la radiación solar, el consumo simultáneo del Arduino Nano y el ESP8266 que se mantenía conectado permanentemente a Wi-Fi sin poder entrar en modo sleep debido a sus características y funciones acotadas. No obstante, la configuración utilizada es coherente con el enfoque de bajo costo del proyecto y proporciona una base válida para su implementación inicial.

Además, el rendimiento energético estuvo condicionado por la capacidad real de las baterías disponibles, las cuales no siempre garantizan el suministro continuo esperado en proyectos de monitoreo remoto. Este aspecto evidencia la necesidad de evaluar de manera más rigurosa la calidad, el ciclo de vida y el comportamiento en carga/descarga de las baterías empleadas, ya que su degradación prematura puede afectar directamente la fiabilidad del sistema y su capacidad para operar en escenarios prolongados sin intervención.

Si se considera el contexto agrícola chileno; caracterizado por pequeños y medianos productores con recursos limitados; el acceso a estaciones meteorológicas profesionales sigue siendo reducido debido a sus altos costos y requerimientos técnicos. En la Región del Biobío, este problema se acentúa debido a su variabilidad climática a cortas distancias, influenciada por diferencias topográficas, proximidad al mar y cambios locales de vegetación. Esto provoca que los datos de una sola estación no siempre representen fielmente las condiciones reales de un predio.

En este escenario, la estación meteorológica de bajo costo desarrollada en este proyecto representa una alternativa viable para la agricultura de pequeña escala, ya que representa la oportunidad de instalar múltiples puntos de medición a un costo accesible, logrando una base de datos más representativa del microclima local. Además, la integración de GPS permite asociar cada medición a una ubicación precisa, lo cual es útil para asociar predios con variaciones microclimáticas.

En conclusión, si bien la estación comercial ofrece un desempeño aceptable en términos de robustez y precisión, la estación desarrollada demuestra que es posible construir una solución funcional y de bajo costo para el monitoreo ambiental, útil en contextos educativos, experimentales o de investigación aplicada con recursos limitados.

6.2 Trabajos Futuros

El desarrollo de esta estación meteorológica permite continuar explorando mejoras técnicas y nuevas líneas de investigación. Así, el prototipo desarrollado reveló oportunidades para optimizar el diseño, ampliar sus capacidades y fortalecer su confiabilidad en escenarios reales. A partir de esta experiencia, surgen diversas proyecciones de trabajo que pueden enriquecer tanto la adquisición de datos como la integración de tecnologías adicionales. Entre ellas están:

- Completar la validación de aquellos sensores que no pudieron ser comprobados en terreno o comparados directamente con instrumentos certificados. Esto incluye repetición de mediciones controladas, aplicación de metodologías para calibración más robustas y, de ser posible, incorporar instrumentos de referencia con trazabilidad. En caso de persistir desviaciones sistemáticas o limitaciones asociadas al desempeño del sensor, plantear como alternativa reemplazarlos por otros de mayor precisión y estabilidad, con el objetivo de fortalecer la capacidad de la estación para generar datos más precisos y comparables con equipos profesionales.
- Se plantea la optimización del consumo energético para el sistema, ya que es posible que la mayor parte del gasto provenga de los dos microcontroladores utilizados, especialmente del ESP8266 que permanece conectado permanentemente a Internet. Una estrategia clave consiste en rediseñar el firmware para reducir el tiempo activo del módulo Wi-Fi, implementando ciclos de despertar periódico, transmisión rápida y retorno inmediato a modos de ahorro energético como *deep sleep*. De igual manera, se puede reemplazar la arquitectura actual por un dispositivo que integre ambas funciones, como un Arduino con conectividad Wi-Fi nativa o un módulo ESP en su versión estándar. Estas mejoras permitirían extender la autonomía nocturna del sistema sin incrementar el tamaño del panel solar, lo que da oportunidad a la integración de otros sensores o componentes.
- Futuras versiones del prototipo deberían considerar baterías certificadas, de mayor densidad energética y con mejor desempeño frente a variaciones térmicas, con el fin de asegurar una

operación más confiable y sostenida en el tiempo, además de un monitoreo del estado de la batería mediante sensores.

- La integración de un módulo RTC (Real Time Clock) con sincronización NTP también puede eliminar el corrimiento temporal observado en la transmisión de datos. Al contar con un reloj de tiempo real independiente del ciclo de programa y robusto frente a los retrasos de red, la estación podría registrar marcas temporales precisas e independientes del momento en que los datos llegan al servidor, lo que facilitaría procesos de calibración comparativa. Como alternativa, también puede utilizarse la hora provista por el GPS como referencia temporal, si se asegura una recepción estable de satélites mediante una antena de mayor sensibilidad y una instalación que favorezca la visibilidad del cielo. De este modo, la marca de tiempo se mantendría precisa incluso ante variaciones en la latencia de transmisión.
- Asimismo, una mejora importante para futuras versiones del sistema puede ser la incorporación de un módulo lector de tarjeta SD que permita almacenar localmente las mediciones cuando no exista conexión Wi-Fi o cuando la señal sea intermitente. Actualmente, la estación depende completamente de la disponibilidad de red para transmitir los datos en tiempo real, lo que genera pérdidas de información en periodos sin conectividad. Integrar almacenamiento local permitiría registrar todas las variables en formato CSV o similar, garantizando la continuidad del historial de mediciones y facilitando su recuperación posterior. Esta característica, además de aumentar la confiabilidad del sistema, permitiría sincronizar los datos con la plataforma en línea una vez restablecida la conexión, asegurando una trazabilidad completa.

Además de las mejoras técnicas del sistema, este proyecto contribuye a la generación de una base de datos meteorológica propia lo que deja abierto un conjunto de posibilidades de investigación como:

Explorar la caracterización micro climática de zonas agrícolas, la estimación de evapotranspiración, la detección de patrones estacionales, el desarrollo de modelos predictivos basados en aprendizaje automático. Esta información también puede utilizarse para evaluar la relación entre condiciones meteorológicas y productividad agrícola, comparar el desempeño de cultivos bajo distintos escenarios ambientales o incluso complementar redes existentes de monitoreo climático. En este sentido, el prototipo se convierte en un punto de partida para múltiples líneas de estudio orientadas a comprender y gestionar mejor las dinámicas ambientales locales.

Capítulo 7 Bibliografía

- [1] V. D. Velasco Martínez, F. G Flores García, G. González Cervantes, M. Flores Medina, y H. A. Moreno Casillas, “*Desarrollo y validación de una estación meteorológica automatizada de bajo costo dirigida a agricultura*”, Rev. Mex. Cienc. Agrícolas, vol. 6, n. ° 6, pp. 1253–1264, septiembre de 2015.
- [2] H. Martínez, “*Sistema inteligente para la medida y monitorización en agricultura inteligente*” in SAAEI2018 - Libro de Actas, Barcelona, 2018, pp. 250–256.
- [3] “*Estación meteorológica inteligente para control de riego y mitigación de heladas*”, RTE, vol. 34, no. 3, pp. 46–57, Nov. 2022, doi: 10.37815/rte.v34n3.948.
- [4] Konstantinos Ioannou, Dimitris Karampatzakis, Petros Amanatidis, Vasileios Aggelopoulos and Ilias Karmiris. “*Low-Cost Automatic Weather Stations in the Internet of Things*”. En: Information, vol. 12, no. 4, p. 146 (marzo 2021).
- [5] N. Granda, J. Monga, C. Barreno, y F. Quilumba, “*Desarrollo de una estación meteorológica y una herramienta computacional para la evaluación de los recursos eólico y solar*”, re, vol. 18, n.º 2, pp. PP. 113–123, ene. 2022.
- [6] W. A. Zuñiga Vinueza, A. P. Risquet, y A. S. Nagy, “*Prototipo de mini estación meteorológica automática inalámbrica*”, Revista Publicando, vol. 3, no. 7, pp. 20-32, 2016.
- [7] C. Morón, J. P. Díaz, D. Ferrández, and P. Saiz, “*Design, Development and Implementation of a Weather Station Prototype for Renewable Energy Systems*”, Energies, vol. 11, no. 9, p. 2234, 2018.
- [8] E. Betancur Villamil, “*Desarrollo De Estación Meteorológica Con Iot, Redundante A Fallos Y Para Condiciones Ambientales De Alta Montaña*”, UNIVERSIDAD EIA, EIA, Antioquia, Colombia, 2021.
- [9] R. D. Ferrer Sanabria, “*Desarrollo de una estación meteorológica autónoma de bajo costo*”, Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás, USTA, Bucaramanga, Colombia, 2017.
- [10] M. A. Ponce-Jara, C. Velásquez-Figueroa, D. Tonato-Peralta, y G. Paredes-Morillo, “*Diseño de una estación meteorológica automática para registrar las variables solar y eólica*”, Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía, vol. 5, no. 10, pp. 937-957, Jul.-Dec. 2020.
- [11] J. A. Botero-Valencia, C. A. Mejía-Herrera, y J. M. Pearce, “*Low cost climate station for smart agriculture applications with photovoltaic energy and wireless communication*,” HardwareX, vol. 11, e00296, 2022, doi:10.1016/j.ohx.2022.e00296.

- [12] D. García Hernández, D. S. Fernández Reynoso, T. M. González Martínez, J. D. Ríos Berber y L. González Hernández, "Evaluación de la partición de lluvia en dos especies arbóreas con Arduino", *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 15, núm. 85, pp. 70–96, 2024, doi: 10.29298/rmcf.v15i85.1459.
- [13] K. Malek, E. Ortiz Rodríguez, Y.-C. Lee, J. Murillo, A. Mohammadkhorasani, L. Vigil, S. Zhang, and F. Moreu, "Design and implementation of sustainable solar energy harvesting for low-cost remote sensors equipped with real-time monitoring systems," *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, vol. 2, p. 100051, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.iintel.2023.100051.
- [14] R. M. Rodríguez Jiménez, A. B. Capa, A. Portela Lozano. *Meteorología y Climatología*. FECYT. 2004.
- [15] Organización Meteorológica Mundial, “*Guía de instrumentos y métodos de observación*”. vol. I. Ed. 2023. Suiza: OMM-N° 8. 2023.
- [16] Organización Meteorológica Mundial, “*Guía de instrumentos y métodos de observación*”. vol. III. Ed. 2021. Suiza: OMM-N° 8. 2021.
- [17] Organización Meteorológica Mundial, “*Manual del Sistema Mundial Integrado de Observación de la OMM*”. Anexo VIII. Ed 2023. Suiza: OMM-N°1160. 2023.
- [18] “Sinopsis”. Organización Meteorológica Mundial. [Online]. Disponible: <https://wmo.int/es/sinopsis>
- [19] I. Maldonado, R. Ruiz, M. Fuentes B, “*Manual de instalación de estaciones meteorológicas automáticas*”. Chillán, Chile: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 198. 2010.
- [20] AristaSur (2019, mayo 31). *Norte magnético, Norte geográfico y Norte de cuadrícula*. [Online]. Disponible en: <https://www.aristasur.com/contenido/norte-magnetico-norte-geografico-y-norte-de-cuadrícula>
- [21] “*Implementación De Un Prototipo De Estación Meteorológica Portátil*” (2022). Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24220>
- [22] Dirección Meteorológica de Chile, Subdepartamento Climatología y Meteorología Aplicada Sección Meteorología Agrícola. “*Manual De Agrometeorología*”. Ed. 2. Santiago. 2022.
- [23] Groth, D.; Skandier, T. Guía de estudio de Network+, 4ª ed.; Sybex: Sedona, Arizona, EE. UU., 2005; ISBN 978-0-7821-4406-2.

- [24] BlueData, “¿Qué Es Un Datalogger?” [Online]. Disponible en: <https://www.bluedata.cl/pages/que-es-un-data-logger>
- [25] Aula21, “Modbus: Qué es y cómo funciona”. Disponible en: <https://www.cursosaula21.com/modbus-que-es-y-como-funciona/#:~:text=El%20protocolo%20Modbus%20RTU%20es,en%20serie%20utilizando%20este%20protocolo.>
- [26] IBM, “Protocolos TCP/IP”, (actualizado el 2021-03-03) Disponible en: https://www.ibm.com/docs/es/ssw_aix_71/network/tcpip_protocols.html
- [27] W. Worku, A. Mishra and R. Priyadarshini, "*Qualitative analysis for sensors and wireless communications modules for development of weather station monitoring system*", 2019 *International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, Greater Noida, India, 2019, pp. 435-438, doi: 10.1109/ICCCIS48478.2019.8974486
- [28] AVSystem, “IoT Protocols & Standards Guide - Protocols of the Internet of Things”, (2024). Disponible en: <https://avsystem.com/blog/iot/iot-protocols-and-standards>
- [29] UNAM, “Capítulo 2: Estándar Ieee 802.15.1 “Bluetooth”. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/229/A5.pdf?sequence=5&isAllowed=y#:~:text=Bluetooth%20se%20denomina%20al%20protocolo,encuentran%20dentro%20de%20su%20alcance.>
- [30] Akamai, “¿Qué es HTTPS?”, Disponible en: <https://www.akamai.com/es/glossary/what-is-https>
- [31] GPS.GOV, “El Sistema de Posicionamiento Global” [Online]. Disponible en: <https://www.gps.gov/systems/gps/spanish.php>
- [32] M. Palacios, “Sistema De Posicionamiento Global (Gps) Tecnología Satelital En Sus Manos”. Capítulo 16. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/482d4cb6-af86-4f4c-acd3-be67d4ecf997/content>
- [33] A. Rodríguez, “La Altitud en los GPS's” [Online]. Disponible en: <https://www.elgps.com/documentos/altitudgps.html>. Consultado: 27- Dic-2025.
- [34] ECO, “Altura elipsoidal vs altura ortométrica: ¿qué diferencia hay y por qué importa en la topografía?”, [Online]. Disponible en: <https://www.ecotopografia.com/noticias/detalle/66>. Consultado: 27- Dic-2025.

- [35] A. Gallardo, J. Herrera, S. Sandoval et al., “*Internet De Las Cosas Teoría Y Práctica*”. Colima, México. 2023.
- [36] VAISALA, “*YL-83 Rain Detector*” [Online]. Disponible en: https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2018/04/yl-83-rain-detector-datasheet_low.pdf
- [37] SparkFun Electronics, *Weather Meter Kit SEN-15901 Datasheet*, Niwot, CO, USA. [En línea]. Disponible en: https://cdn.sparkfun.com/assets/d/1/e/0/6/DS-15901-Weather_Meter.pdf.
- [38] Microchip Technology Inc., “MCP73871 Li-Ion/Li-Polymer Charge Management Controller Data Sheet,” DS20002090E, Microchip Technology Inc., [En línea]. Disponible en: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP73871-Data-Sheet-20002090E.pdf>. Consultado: 12-May-2025.
- [39] Monolithic Power Systems Inc., “MT3608 High Efficiency Step-Up Converter Datasheet,” [En línea]. Disponible en: <https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-PWR-3608/resources/MT3608.pdf>. Consultado: 12-May-2025.
- [40] Texas Instruments, “LM2596 Simple Switcher® 3A Step-Down Voltage Regulator Datasheet,” [En línea]. Disponible en: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>. Consultado:12-May-2025.
- [41] BOSCH Sensortec, “Data sheet BMP180 Digital pressure sensor”. [En línea]. Disponible en: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>. Consultado:2-Oct-2025.
- [42] Ministerio de Energía, “*Guía de Evaluación Inicial de Edificios para la Instalación de Sistemas Fotovoltaicos*” Santiago, Chile: Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Jun. 2016.
- [43] Ministerio de Energía, “Reporte Recurso Solar y datos meteorológicos”. [En línea]. Disponible en: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>. Consultado: 26-May-2025.
- [44] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.
- [45] Florentin M.J. Bulot, Steven J. Ossont, Andrew K.R. Morris, Philip J. Basford, Natasha H.C. Easton, Hazel L. Mitchell, Gavin L. Foster, Simon J. Cox, Matthew Loxham, “*Characterisation and calibration of low-cost PM sensors at high temporal resolution to reference-grade performance*”, Heliyon, Volume 9, Issue 5, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15943.

- [46] Y. Pichugina, B. Banta, N. Kelley, “LLLJP Wind Shear Formula (Power law)”, National Oceanic & Atmospheric Administration –Earth System Research Laboratories, Chemical Sciences Laboratory, [En línea]. Disponible en: <https://csl.noaa.gov/projects/lamar/windshearformula.html>. Consultado:03-Nov-2025.
- [47] X. Yang y Z. Zeng, “Wind power law exponent alpha data,” SciDB Scientific Data Platform, dataset ID: 7af9cf86ecb44a949a549110ee42f1a5, 10 Ago. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.57760/sciencedb.10067>. Consultado: 03-Nov- 2025.
- [48] ArcGIS, “Aplicar un desplazamiento de tiempo a los datos,” esri, 2025. [En línea]. Disponible en:<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/mapping/time/apply-a-time-offset-on-data.htm>. Consultado: 03-Nov-2025.
- [49] inbestMe, “Desviación estándar, volatilidad, riesgo, movimientos esperados e inesperados”, *inbestme.com*, 9-Nov-2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.inbestme.com/es/es/blog/desviacion-estandar-volatilidad-riesgo/>. Consultado: 30-Dic-2025.
- [50] A. K. Overton, “*A Guide to the Siting, Exposure and Calibration of Automatic Weather Stations for Synoptic and Climatological Observations*”, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.rmets.org/sites/default/files/2019-02/aws-guide.pdf>. Consultado: 10-Nov-2025.
- [51] B. J. Lake, “*Calibration Procedures and Instrumental Accuracy Estimates for Humidity Sensors*,” NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, 2003. [En línea]. Disponible: https://tao.ndbc.noaa.gov/proj_overview/pubs/PDF/lake2569.pdf. Consultado: 21-Nov-2025.
- [52] Adafruit IO, *Dashboard EMA Camila Vallejos*. [En línea]. Disponible en: <https://io.adafruit.com/Labredsis/dashboards/ema-camila-vallejos>. Consultado: 21-nov-2025.
- [53] LI-COR Cloud, “Station data dashboard”, [En línea]. Disponible en: <https://www.licor.cloud/>.
- [54] L. Blank y A. Tarquin, *Ingeniería Económica*, 7.^a ed., McGraw-Hill, 2012.
- [55] Lifespan or average print hours, “BambuLab Forum, 13-ago-2023”. [En línea]. Disponible en: <https://forum.bambulab.com/t/lifespan-or-average-print-hours/24096>. Consultado: 06-Ene-2026.
- [56] GlobalPetrolPrices.com, “Chile electricity prices” [En línea]. Disponible en: https://www.globalpetrolprices.com/Chile/electricity_prices/. Consultado: 07-Ene-2026.
- [57] F. Federico, “Precio Relativo,” *Econlink*, 24-oct-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.econlink.com.ar/precio-relativo>. Consultado: 23-Nov-2025.

- [58] METER, “ATMOS 41 Wireless Remote Weather Station,” METER Group, [En línea]. Disponible en: <https://metergroup.com/es/products/atmos-41-wireless-remote-weather-station/>. Consultado: 23-Nov-2025.
- [59] Hydrocultura, “HOBO RX3004-SYS-KIT-81 Kit Básico de Estación Meteorológica Remota”, HYDROCULTURA Agricultura Protegida, [En línea]. Disponible: https://hydrocultura.com/products/hobo-rx3004-sys-kit-813-kit-basico-de-estacion-meteorologica-remota?pr_prod_strat=e5_desc&pr_rec_id=114f2777f&pr_rec_pid=6892769509485&pr_ref_pid=8999663567134&pr_seq=uniform. Consultado: 23-Nov-2025.
- [60] Adafruit Industries, “Adafruit IO”, [En línea]. Disponible: <https://io.adafruit.com>.

Anexo A Registros de las variables meteorológicas

A.1 Figuras complementarias

A.1.1 Figuras: Determinación del desfase temporal (lag) para el sensor DHT11

En este anexo se presentan las figuras Fig. A.1 y Fig. A.2 correspondientes la búsqueda del desfase temporal durante la calibración descrita en la sección 4.2.6.

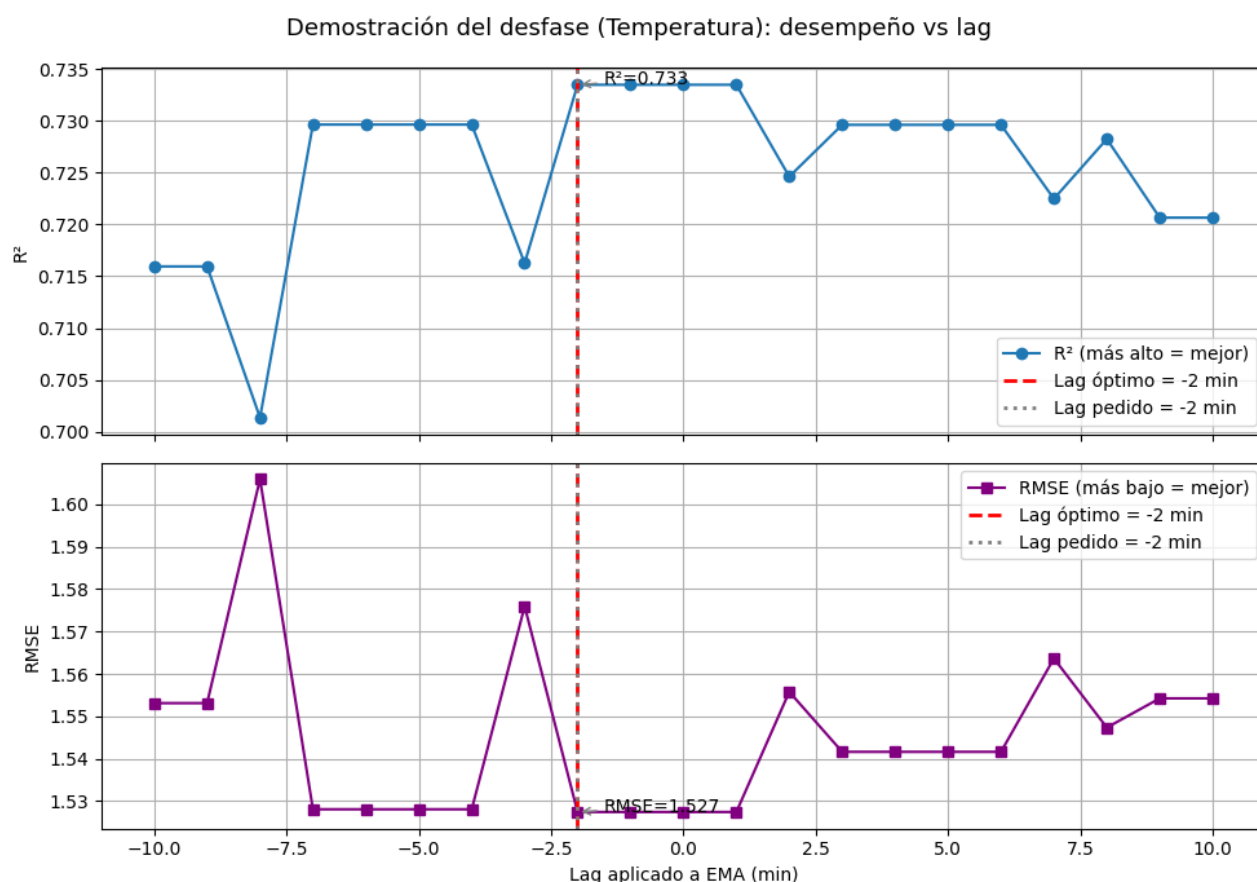


Fig. A. 1 Determinación del lag óptimo para alineación temporal de temperatura EMA vs HOBO.

La gráfica de la Fig. A.1 muestra cómo cambia la calidad del ajuste entre la temperatura de la estación prototipo (EMA) y la estación de referencia (HOBO) cuando se aplica un corrimiento temporal “lag” a la serie de la EMA. En el eje X se prueban distintos lags en minutos, y en los paneles se evalúa el resultado con dos métricas: arriba el R^2 (mientras más alto, mejor) y abajo el RMSE (mientras más bajo, mejor). La línea vertical marcada en -2 min indica el lag seleccionado, y se observa que justamente en ese valor se obtiene el mejor desempeño (R^2 máximo y RMSE mínimo o

muy cercano al mínimo), lo que evidencia que la serie de la EMA presenta un desfase aproximado de 2 minutos respecto a la referencia y que al corregirlo se logra la mejor alineación entre ambas mediciones.

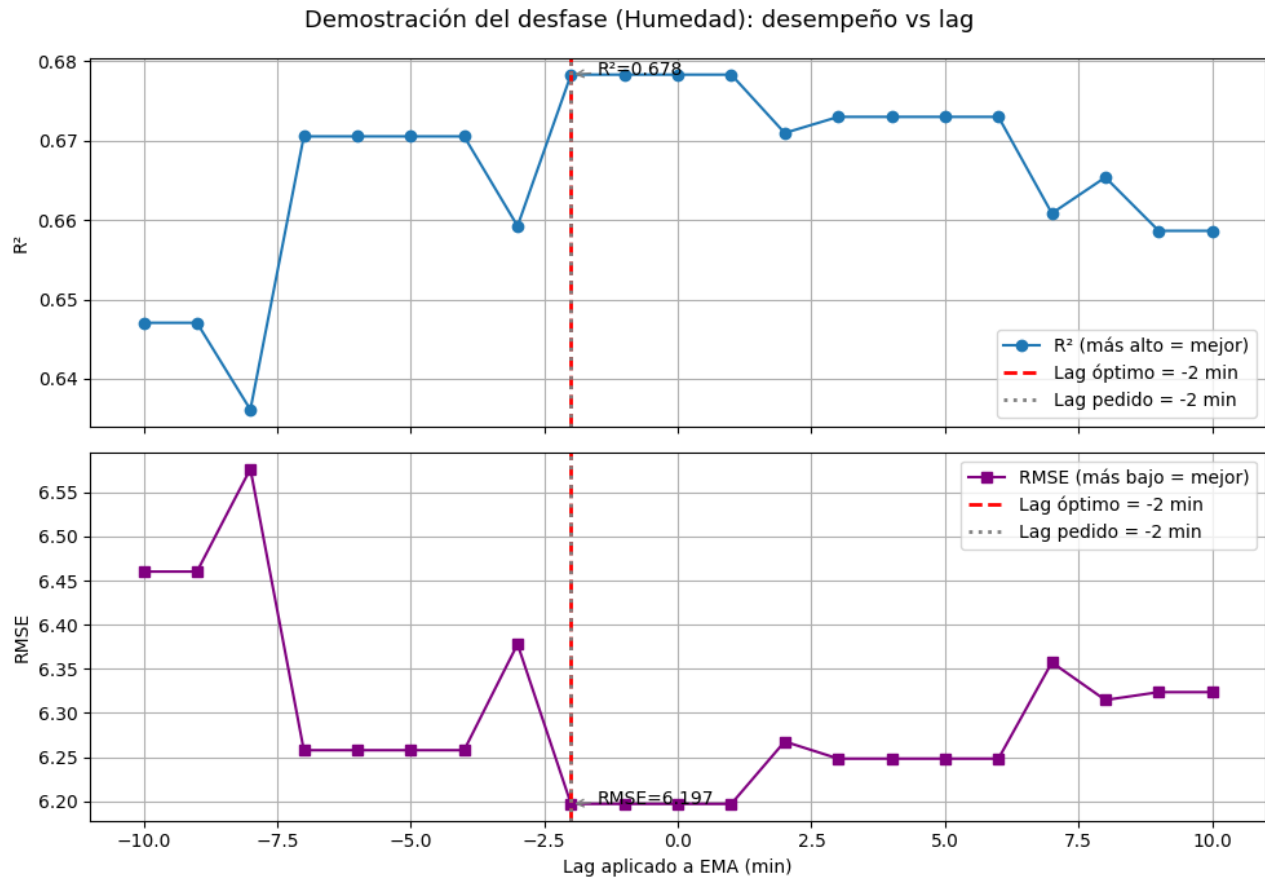


Fig. A. 2 Determinación del lag óptimo para alineación temporal de humedad EMA vs HOBO.

En cuanto a la humedad relativa, el análisis de desempeño vs lag muestra que el mejor ajuste se obtiene en torno a -2 min, donde se observa el R^2 más alto y el RMSE más bajo. Sin embargo, la mejora es moderada y se aprecia una meseta de desempeño para lags cercanos, lo que indica que el desfase es consistente con -2 min pero con baja sensibilidad a variaciones pequeñas del lag.

A.1.2 Figuras: Datos crudos obtenidos durante la experimentación

En este anexo se presentan las figuras Fig. A.3, Fig. A.4, Fig. A.5, Fig. A.6, Fig. A.7 y Fig. A.8 correspondientes a los registros originales de las variables meteorológicas obtenidas durante la campaña de mediciones descrita en el capítulo 5, sección 5.3, etapa en la que la estación desarrollada fue instalada junto a la estación de referencia. Estos datos se muestran sin ningún tipo de procesamiento, filtrado o corrección posterior, y no incorporan el ajuste temporal aplicado

previamente para efectos de comparación entre ambas estaciones. Por lo tanto, las visualizaciones incluidas en este anexo corresponden exclusivamente a los valores crudos registrados por los sensores en terreno.

Además, se incluyen las gráficas correspondientes a otras variables como la radiación UV, el porcentaje de agua (%).

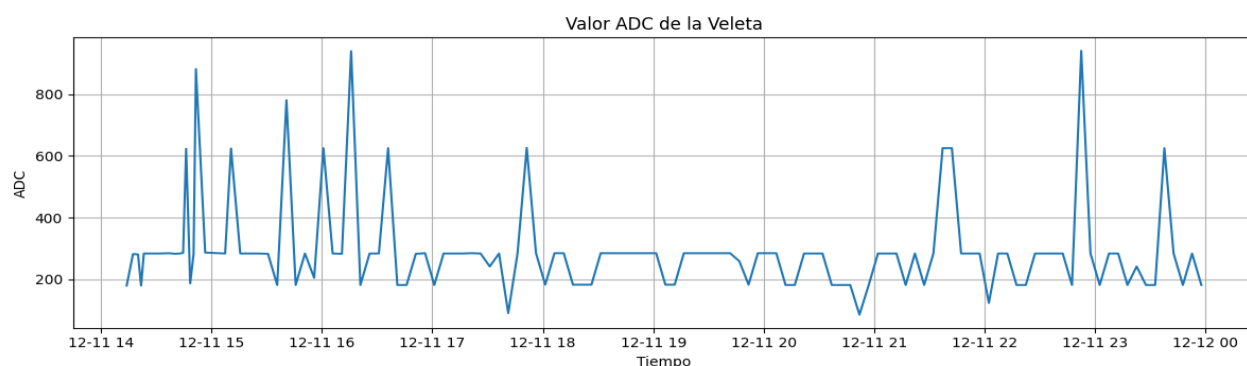


Fig. A. 3 Variación temporal del valor ADC registrado.

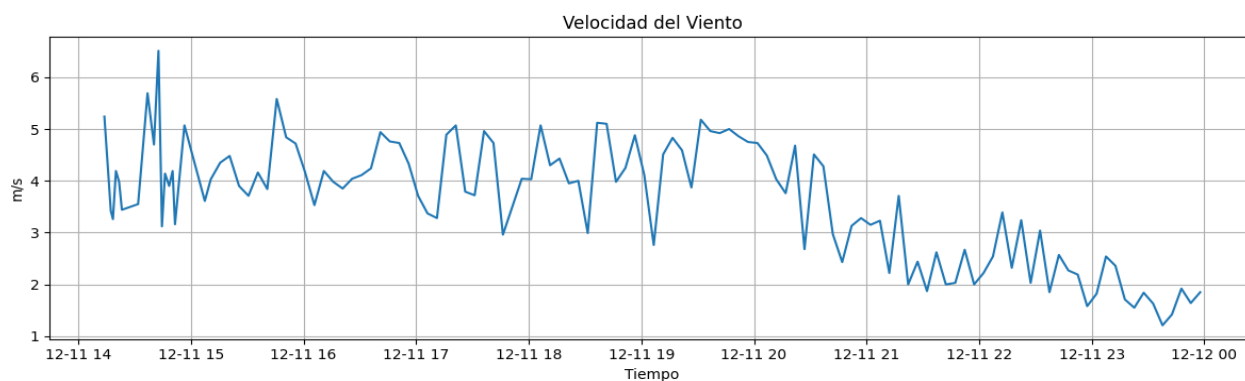


Fig. A. 4 Variación temporal de la velocidad del viento registrada.

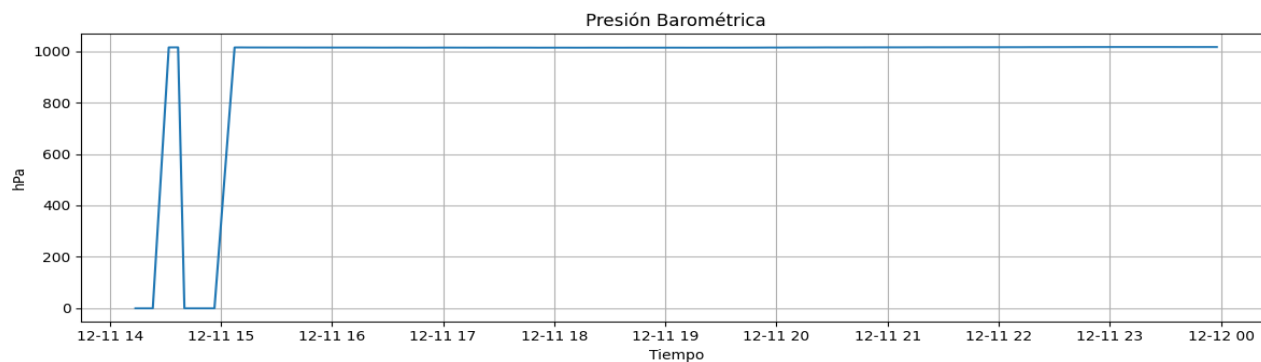


Fig. A. 5 Variación temporal de la presión barométrica registrada.

El descenso repentino a valores cercanos a cero observado en la Fig. A.3 se debe a lecturas inválidas generadas por el sensor BMP180 durante su proceso de inicialización. Este sensor requiere un breve período de estabilización tras energizarse o reiniciarse; durante este intervalo, puede entregar valores anómalos, incluyendo presiones extremadamente bajas o incluso igual a cero, antes de comenzar a reportar datos correctos. Este fenómeno es ampliamente conocido en sensores barométricos de la familia BMP180/BMP085 y suele ocurrir cuando el módulo se reinicia, se energiza de forma intermitente o enfrenta dificultades momentáneas de comunicación I2C. Una vez completada la inicialización, el sensor entrega valores estables y coherentes, como se aprecia posteriormente en el registro.

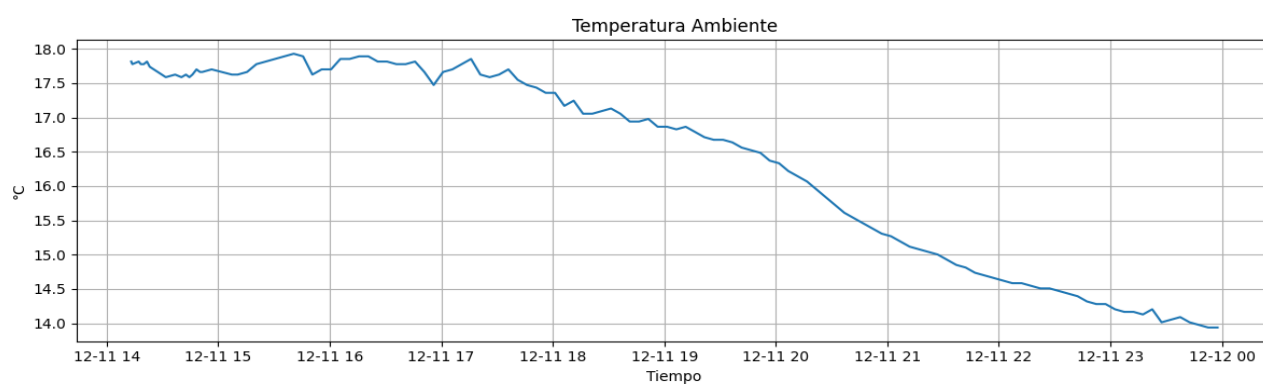


Fig. A. 6 Variación temporal de la temperatura ambiente registrada.

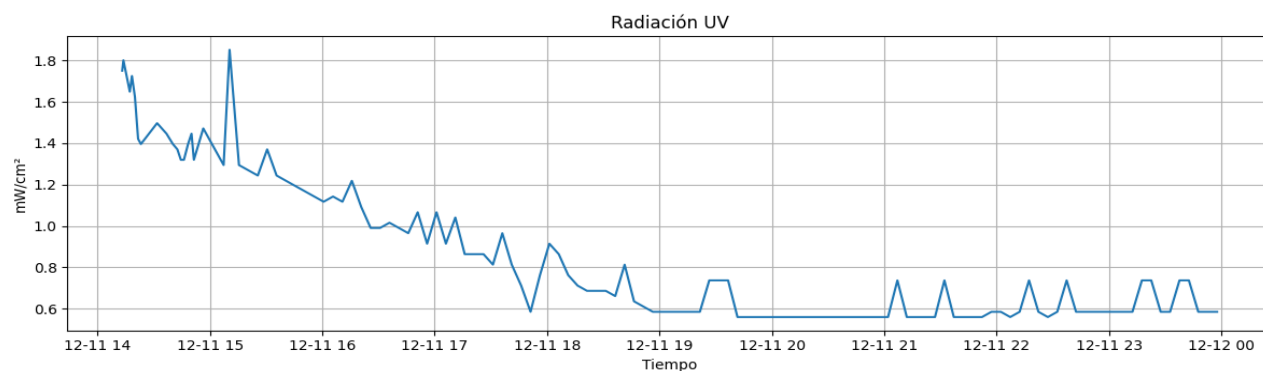


Fig. A. 7 Variación temporal de la radiación UV registrada.

Los valores reducidos observados en la radiación UV de la Fig. A.5 se deben principalmente al uso de la mica acrílica que protege al sensor, la cual actúa como un filtro óptico que atenúa parte del espectro ultravioleta incidente. Esto provoca una disminución de la señal medida incluso bajo condiciones de alta irradiancia. Adicionalmente, durante las horas de la tarde, la presencia de sombras parciales, obstáculos cercanos y la variación del ángulo de incidencia solar reducen aún más la radiación que llega directamente al detector. A ello se suma la limitación espectral del sensor ML8511, que no cubre completamente el rango UV. En conjunto, estos factores explican que las mediciones

obtenidas sean inferiores a las que se registrarían con un sensor expuesto directamente y con un espectro de medición más amplio.

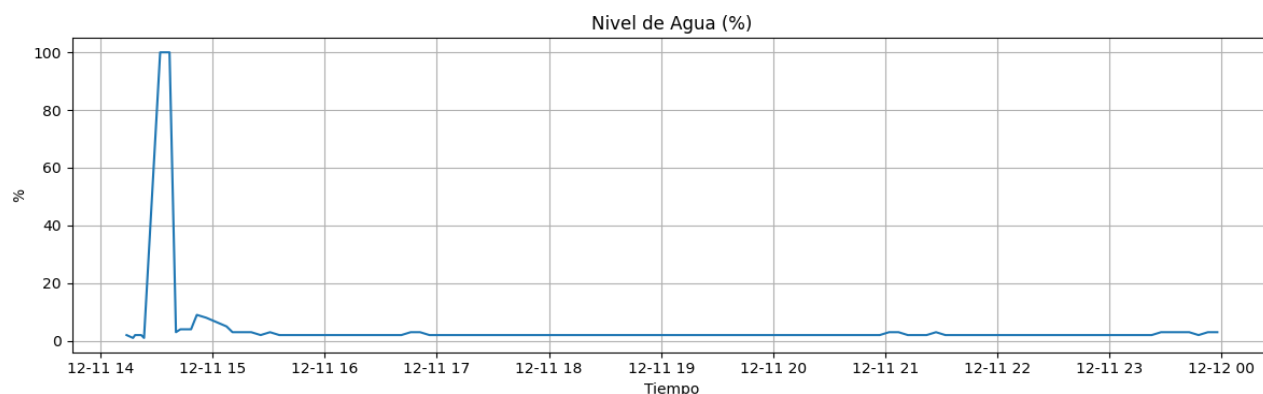


Fig. A. 8 Variación temporal del porcentaje de lluvia registrado.

En el caso del sensor de lluvia tipo placa resistiva utilizado, el aumento puntual al 100% en la Fig. A.6 se explica por una variación abrupta en su conductividad superficial. Al detectar agua midiendo la disminución de la resistencia entre sus pistas metálicas, una película muy delgada de humedad ambiental, condensación o una microgota aislada puede cerrar parcialmente el circuito y ser interpretada como saturación, aún cuando no exista lluvia real. Dado que la placa es altamente sensible a cambios de humedad, temperatura y a fenómenos como rocío o condensación instantánea, se pueden observar picos breves de señal máxima en condiciones ambientales sin precipitación.