

Sistema de monitoreo y gestión remota del clima en invernaderos

Lic. Martín Anibal Lacheski

Carrera de Especialización en Internet de las Cosas

Director: Mg. Lic. Leopoldo Alfredo Zimperz (FIUBA)

Jurados:

Jurado 1 (pertenencia)
Jurado 2 (pertenencia)
Jurado 3 (pertenencia)

Ciudad de Montecarlo, Misiones, junio de 2025

Resumen

La presente memoria describe el desarrollo de un prototipo para monitorear y controlar de manera remota las condiciones climáticas en los invernaderos de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Misiones. La solución propuesta integra sensores y actuadores conectados a un servidor remoto a través de una red inalámbrica y un protocolo de mensajería ligero, así como una aplicación web que permite la supervisión y el control a distancia del sistema.

Este trabajo permite optimizar el uso de recursos, mejorar la productividad y reducir costos operativos. Su implementación requirió conocimientos en sistemas embebidos, sensores, protocolos de comunicación, desarrollo de software, técnicas de seguridad y la implementación de soluciones cloud.

Agradecimientos

Esta sección es para agradecimientos personales y es totalmente **OPCIONAL**.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Problemática actual	1
1.2. Motivación	2
1.3. Estado del arte	2
1.4. Objetivos y alcance	3
1.4.1. Objetivo principal	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.4.3. Alcance del trabajo	3
1.5. Requerimientos	4
2. Introducción específica	7
2.1. Protocolos de comunicación	7
2.1.1. Wi-Fi	7
2.1.2. MQTT	7
2.1.3. TLS	8
2.2. Componentes de hardware	8
2.2.1. Microcontrolador	8
2.2.2. Sensor de temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica	9
2.2.3. Sensor de luz digital	9
2.2.4. Sensor de dióxido de carbono	9
2.2.5. Sensor de detección de pH	10
2.2.6. Sensor de conductividad eléctrica	10
2.2.7. Sensor de sólidos disueltos totales	10
2.2.8. Sensor de temperatura digital sumergible	10
2.2.9. Sensor ultrasónico	11
2.2.10. Sensor de medición de consumo eléctrico	11
2.2.11. Módulo Relay	11
2.3. Desarrollo de firmware	12
2.3.1. MicroPython	12
2.4. Desarrollo Backend y API	12
2.4.1. FastAPI	12
2.4.2. MongoDB	12
2.5. Desarrollo Frontend	12
2.5.1. React	12
2.6. Infraestructura y despliegue	13
2.6.1. Docker	13
2.6.2. AWS IoT Core	13
2.6.3. AWS EC2	13
2.7. Herramientas de desarrollo	13

2.7.1. Visual Studio Code	13
2.7.2. Postman	14
2.7.3. Github	14
3. Diseño e implementación	15
3.1. Arquitectura del sistema	15
3.1.1. Capa de percepción	16
3.1.2. Capa de red	16
3.1.3. Capa de aplicación	16
3.2. Modelo de datos	17
3.2.1. Pruebas iniciales de sensores	17
3.2.2. Diseño del modelo de datos	17
3.3. Servidor IoT	19
3.3.1. Tecnologías utilizadas	19
Backend	19
Base de datos	19
Frontend	19
Despliegue	19
3.3.2. Arquitectura del servidor	20
Backend	20
Capa de datos	21
Frontend	21
3.4. Desarrollo del backend	21
3.4.1. Diseño de la API	22
3.4.2. Autenticación y autorización	23
3.4.3. Persistencia de datos	24
3.4.4. Comunicación con el broker MQTT	25
Pasos en AWS IoT Core	25
Implementación de MQTT en FastAPI	26
Comunicación con MQTT en FastAPI	26
3.4.5. Implementación de WebSockets	28
3.5. Desarrollo del frontend	28
3.6. Desarrollo de nodos sensores y actuadores	28
3.7. Despliegue del sistema	28
A. Resumen de endpoints de la API	29
B. Autenticación con JWT	33
C. Conexión al broker MQTT con FastAPI y AWS IoT SDK para Python	35
Bibliografía	39

Índice de figuras

1.1. Diagrama en bloques del sistema.	4
2.1. Arquitectura del protocolo MQTT.	8
2.2. Microcontrolador ESP-WROOM-32.	9
2.3. Sensor BME280.	9
2.4. Sensor BH1750.	9
2.5. Sensor MHZ19C.	9
2.6. Sensor PH-4502C.	10
2.7. Sensor CE.	10
2.8. Sensor TDS.	10
2.9. Sensor de temperatura DS18B20.	11
2.10. Sensor HC-SR04.	11
2.11. Sensor de medición de consumo eléctrico.	11
2.12. Relay de 2 Canales 5 V 10 A	11
3.1. Arquitectura de la solución propuesta.	15
3.2. Modelo de datos implementado.	18
3.3. Arquitectura del servidor del sistema IoT.	20
3.4. Esquema de autenticación y autorización.	23
3.5. Ejemplo de políticas de acceso en AWS IoT Core.	25
3.6. Pruebas en Postman. Test de conexión al broker MQTT.	26
3.7. Pruebas en Postman. Publicación de un mensaje en un tópico.	27
3.8. Cliente MQTT en FastAPI.	27
3.9. Datos almacenados en MongoDB.	28

Índice de tablas

1.1. Características de la competencia.	2
3.1. Principales sensores y librerías utilizadas	17
3.2. Resumen de principales endpoints de la API	22
A.1. Resumen de principales endpoints de la API	29
A.2. Resumen de principales endpoints de la API	30
A.3. Resumen de principales endpoints de la API	31

Dedicado a... [OPCIONAL]

Capítulo 1

Introducción general

Este capítulo presenta una visión general de los sistemas de gestión y monitoreo en invernaderos, se abordan los desafíos actuales y las oportunidades de mejora en el ámbito de la agricultura. Se describe la problemática relacionada con la falta de optimización en los sistemas de cultivo tradicionales. Además, se describen la motivación, los objetivos, el alcance y los requerimientos asociados a los diferentes componentes del sistema.

1.1. Problemática actual

La agricultura enfrenta desafíos crecientes en la optimización de la productividad y la eficiencia, especialmente en regiones con condiciones climáticas adversas y variables. Según la FAO (del inglés, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*) [1], para el año 2050, se estima que la población superará los 9 mil millones de personas, lo que demandará un aumento del 60 % en la producción de alimentos. Para abordar este desafío, es fundamental optimizar el uso del agua, mejorar la productividad agrícola y fomentar prácticas que contribuyan a la sostenibilidad ambiental.

Ante estos retos, los cultivos hidropónicos han surgido como una solución prometedora debido a su capacidad para utilizar los recursos de manera más eficiente. Entre sus principales ventajas se destacan la reducción en el consumo de agua [2], la posibilidad de cultivar durante todo el año en entornos controlados y un aumento significativo en la productividad, gracias a la mayor velocidad de crecimiento y rendimiento de los cultivos.

En la provincia de Misiones, la producción hidropónica ha experimentado un crecimiento notable en los últimos años [3], [4]. No obstante, persisten desafíos en la gestión eficiente de los recursos esenciales. Actualmente, la mayoría de los productores emplean sistemas de control basados en temporizadores programables, los cuales no consideran las variaciones ambientales. Esto implica la necesidad de intervenciones manuales frecuentes y mediciones directas, limitando la eficiencia del proceso.

La ausencia de un monitoreo en tiempo real impacta negativamente en la calidad y el rendimiento de los cultivos, aumentando los costos operativos y afectando la sostenibilidad ambiental debido a la implementación de prácticas poco optimizadas.

1.2. Motivación

La motivación de este trabajo radica en el desarrollo e implementación de un sistema basado en IoT (del inglés, *Internet of Things*) y de bajo costo, que permite monitorear en tiempo real y controlar de manera remota los invernaderos de la Facultad de Ciencias Forestales (FCF) de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM).

Este sistema posibilita el registro continuo de diversas variables de interés, como temperatura ambiente, humedad relativa, dióxido de carbono (CO_2), niveles de nutrientes, y consumo de agua y energía, entre otros. Los datos generados están disponibles para docentes, estudiantes e investigadores, para su uso en la realización de tesis, investigaciones y trabajos académicos.

Así, el proyecto no solo tiene un impacto directo en la producción, sino también en la formación académica y el avance científico. Proporciona una plataforma de datos para el análisis y el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas, alineadas con las demandas actuales de sostenibilidad ambiental y seguridad alimentaria [5].

1.3. Estado del arte

En el mercado actual, existen diversas empresas que ofrecen soluciones comerciales para optimizar la gestión de invernaderos. Estas herramientas permiten el control automatizado de variables clave como temperatura, humedad, ventilación y circulación de nutrientes o riego. La tabla 1.1 presenta una comparación de algunas de las soluciones disponibles y sus características más relevantes.

TABLA 1.1. Características de la competencia.

Empresa	Características
Hidroponía FIL [6]	Ofrece servicios en comodato de sensores y actuadores para monitorear y controlar en tiempo real variables críticas como temperatura ambiente, humedad relativa, conductividad eléctrica, pH, riego e iluminación.
Hidrosense [7]	Ofrece productos para automatizar la inyección de nutrientes en el sistema de riego a través del control del nivel de la conductividad eléctrica, la temperatura y el nivel de pH. Ofrece una plataforma para la visualización del estado, reportes y el envío de alertas.
iPONIA [8]	Ofrece productos y una plataforma para monitorear y controlar el invernadero hidropónico. Integra sensores para medir el nivel de pH, conductividad eléctrica, temperatura de la solución, temperatura ambiente y humedad relativa del aire. También ofrece dosificadores para inyectar los fertilizantes a la solución nutritiva.
Growcast [9]	Ofrece productos y una plataforma para controlar cultivos a través de sensores y actuadores que procesan y reportan datos en tiempo real. Integra sensores para medir temperatura ambiente, humedad relativa y CO_2 . Realiza el control del riego, la iluminación y la ventilación.

1.4. Objetivos y alcance

1.4.1. Objetivo principal

Diseñar y desarrollar un prototipo de sistema para el monitoreo y control remoto de las condiciones climáticas en invernaderos, mediante sensores y actuadores conectados a través de Wi-Fi, un servidor IoT en la nube y una aplicación web, con el fin de optimizar el uso de los recursos, reducir costos operativos y mejorar la sostenibilidad ambiental, además de servir como plataforma de datos para la investigación académica y científica.

1.4.2. Objetivos específicos

- Implementar una arquitectura IoT basada en Wi-Fi para monitorear sensores y actuadores en tiempo real.
- Desarrollar un servidor IoT en la nube para la recolección, almacenamiento y procesamiento de los datos obtenidos.
- Diseñar una aplicación web que permita la visualización en tiempo real y el control remoto de las condiciones del invernadero.
- Facilitar el acceso a los datos generados para su uso en investigaciones académicas, trabajos finales y estudios específicos.

1.4.3. Alcance del trabajo

El alcance del trabajo incluyó las siguientes tareas:

- Diseño e implementación de nodos IoT.
 - Selección de sensores, actuadores y microcontroladores.
 - Configuración de conexión Wi-Fi en nodos sensores y actuadores.
 - Desarrollo de firmware para la adquisición de datos de los sensores y el control de los actuadores.
- Comunicación y Protocolos.
 - Configuración de un servidor IoT para gestión de mensajes entre nodos y aplicaciones.
 - Transmisión de datos al servidor IoT mediante MQTT (del inglés, *Message Queue Telemetry Transport*).
 - Cifrado de comunicaciones mediante TLS (del inglés, *Transport Layer Security*).
- Desarrollo de Software.
 - Diseño e implementación de una base de datos para almacenar los datos recolectados por los sensores y permitir su consulta y análisis.
 - Diseño y desarrollo de una API (del inglés, *Application Programming Interface*) REST (del inglés, *Representational State Transfer*) que permita la comunicación con el sistema utilizando HTTP (del inglés, *Hypertext Transfer Protocol*), MQTT y WebSockets.

- Desarrollo de una aplicación web responsive para la visualización de datos en tiempo real y el control remoto de actuadores.
- Entregables.
 - Código fuente completo del sistema (sensores, actuadores, servidor IoT, API y aplicación web).
 - Guías de instalación, configuración y operación.

El trabajo no incluyó:

- Armado de PCB.
- Desarrollo de una aplicación móvil compatible con iOS y Android.

La figura 1.1 muestra el diagrama en bloques del sistema, que evidencia la integración de hardware, software y servicios en la nube.

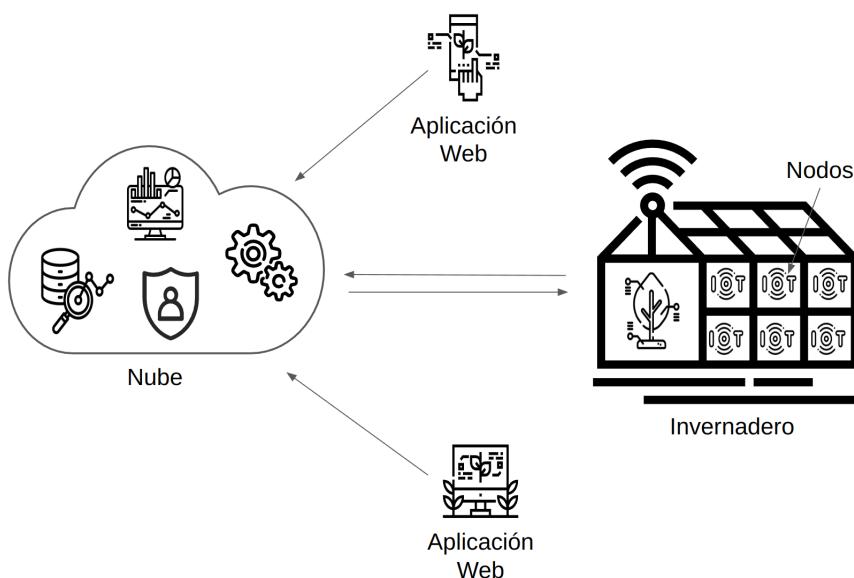


FIGURA 1.1. Diagrama en bloques del sistema.

1.5. Requerimientos

A continuación se detallan los requerimientos técnicos asociados a los diferentes componentes del sistema.

1. Requerimientos de los nodos:
 - a) Utilizar microcontroladores basados en ESP32.
 - b) Implementar certificados TLS para seguridad en las comunicaciones.
 - c) Permitir conexión Wi-Fi.
 - d) Identificador único por nodo dentro del sistema.
 - e) Configuración remota del intervalo de envío de datos.
 - f) Los nodos sensores deben transmitir al servidor IoT;

- 1) Nodos ambientales: temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica, nivel de luminosidad y nivel de CO_2 .
 - 2) Nodos de solución nutritiva: valores de pH (potencial de Hidrógeno), conductividad eléctrica (CE) y TDS (del inglés, *Total Dissolved Solids*); nivel y temperatura de la solución.
 - 3) Nodos de consumos: agua, nutrientes y energía eléctrica.
- g) Los nodos actuadores deben transmitir al servidor IoT:
- 1) Configuración remota de parámetros por cada canal.
 - 2) Reporte del estado de cada canal.
- h) Los nodos actuadores deben recibir desde el servidor IoT:
- 1) Comandos de activación/desactivación remota de canales.
2. Broker MQTT:
 - a) Soportar conexiones cifradas mediante TLS.
 - b) Poseer comunicación bidireccional (publicación/suscripción).
 - c) Implementar QoS (del inglés, *Quality of Service*) para garantizar entrega de mensajes.
 3. Frontend (aplicación web)
 - a) Interfaz intuitiva y responsive (accesible desde móviles y escritorio).
 - b) Autenticación de usuarios mediante credenciales.
 - c) Realización de las operaciones CRUD (Crear, Leer, Actualizar, Eliminar).
 - d) Visualización en tiempo real de datos de sensores y actuadores.
 - e) Envío remoto de comandos y configuraciones.
 - f) Acceso a datos históricos mediante gráficos y tablas.
 - g) Tablero interactivo para monitoreo y control centralizado.
 4. Backend:
 - a) Soportar conexiones seguras mediante TLS.
 - b) Implementar JWT (del inglés, *JSON Web Token*).
 - c) Persistencia de los datos.
 - d) Soporte para métodos HTTP (CRUD y reportes), WebSockets (datos en tiempo real) y MQTT (interacción con dispositivos).
 5. Requerimientos de documentación:
 - a) Se entregará el código del sistema, que incluye todos los componentes desarrollados (sensores, actuadores, broker MQTT, frontend, backend y API).
 - b) Se entregará las guías y diagramas de instalación, configuración y operación.

Capítulo 2

Introducción específica

En este capítulo se presentan los protocolos de comunicación, componentes de hardware y herramientas de software utilizados en el desarrollo del trabajo. Se detallan las características y sus especificaciones técnicas.

2.1. Protocolos de comunicación

En esta sección se describen los diferentes protocolos de comunicación utilizados en el desarrollo del trabajo.

2.1.1. Wi-Fi

Wi-Fi es el nombre comercial propiedad de la Wi-Fi Alliance para designar a su familia de protocolos de comunicación inalámbrica basados en el estándar IEEE 802.11 para redes de área local sin cables [10].

El estandar identifica dos modos principales de topología de red: infraestructura y ad-hoc.

- Modo infraestructura: los dispositivos se conectan a una red inalámbrica a través de un router o AP (del inglés, *Access Point*) inalámbrico, como en las WLAN. Los AP se conectan a la infraestructura de la red mediante el sistema de distribución conectado por cable o de manera inalámbrica.
- Modo ad-hoc: los dispositivos se conectan directamente entre sí sin necesidad de un punto de acceso.

2.1.2. MQTT

MQTT es un protocolo de mensajería estándar internacional OASIS [11] para Internet de las Cosas (IoT). Está diseñado como un transporte de mensajería de publicación/suscripción extremadamente ligero, ideal para conectar dispositivos remotos con un consumo de código reducido y un ancho de banda de red mínimo.

MQTT es un protocolo ligero basado en TCP/IP [12] que sigue un modelo de publicación/suscripción, donde:

- Broker: funciona como un servidor central que recibe los mensajes de los clientes y los distribuye a los suscriptores correspondientes, actúa como intermediario en la comunicación.

- Cliente: puede ser un dispositivo que publica mensajes en un tópico o que recibe mensajes al estar suscrito a un tópico.
- Tópico: es la dirección a la que se envían los mensajes en MQTT. El broker se encarga de distribuirlos a los clientes suscritos. Los temas se organizan en una estructura jerárquica de tópicos.

La figura 2.1 muestra la arquitectura del protocolo MQTT.

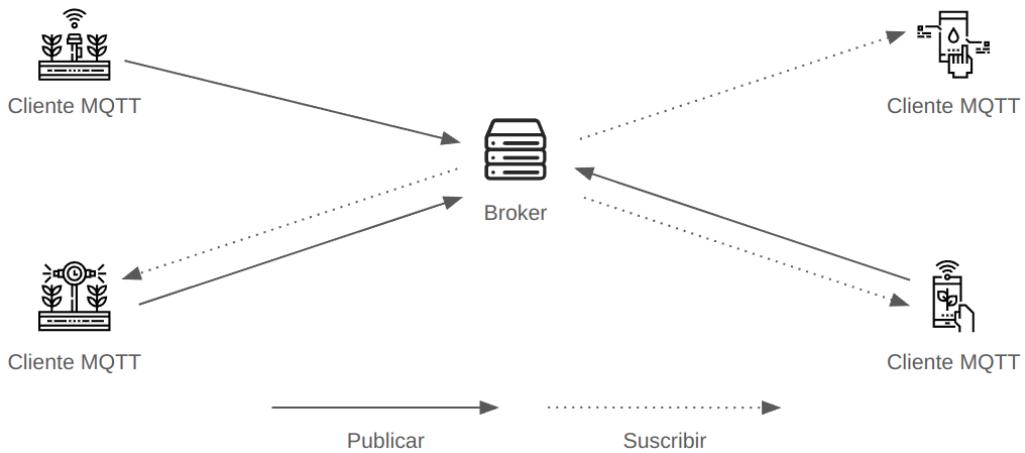


FIGURA 2.1. Arquitectura del protocolo MQTT.

2.1.3. TLS

TLS es un protocolo de seguridad criptográfica diseñado para garantizar la privacidad y la integridad de los datos en comunicaciones sobre redes, como Internet [13]. Opera sobre la capa de transporte y permite autenticación, cifrado de datos y protección contra manipulación.

TLS se utiliza para garantizar la confidencialidad de los protocolos de aplicación (MQTT [11], HTTP [14] y WebSocket [15]) [16].

2.2. Componentes de hardware

En esta sección se describen los diferentes elementos de hardware utilizados en el desarrollo del trabajo.

2.2.1. Microcontrolador

El microcontrolador ESP-WROOM-32 (figura 2.2), es un chip de tipo SoC (del inglés, *System on Chip*) de bajo costo y bajo consumo de energía que integra Wi-Fi, Bluetooth y Bluetooth LE en un solo paquete. El ESP-WROOM-32 [17] es un microcontrolador de 32 bits con una arquitectura Xtensa LX6 de doble núcleo, lo que le permite ejecutar dos hilos de ejecución simultáneos. Además, cuenta con una amplia gama de periféricos, como UART, I2C, SPI y ADC, que lo hace ideal para aplicaciones de IoT.



FIGURA 2.2. Microcontrolador ESP-WROOM-32.

2.2.2. Sensor de temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica

El BME280 (figura 2.3) es un sensor digital de alta precisión para la medición de temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica. Se comunica a través de las interfaces I2C y SPI y ofrece una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ para la temperatura ambiente, $\pm 3\%$ para la humedad relativa y $\pm 1 \text{ hPa}$ para la presión atmosférica [18].



FIGURA 2.3. Sensor BME280.

2.2.3. Sensor de luz digital

El BH1750 (figura 2.4) es un sensor digital de intensidad luminosa que mide la iluminación ambiental en lux. Utiliza la interfaz I2C para la comunicación y puede medir niveles de luz en un rango de 1 a 65.535 lux, con una precisión de 1 lux [19].

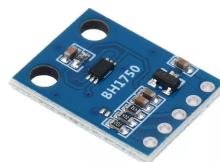


FIGURA 2.4. Sensor BH1750.

2.2.4. Sensor de dióxido de carbono

El sensor MH-Z19C (figura 2.5) es un detector de CO_2 por NDIR (del inglés, *Non Dispersive Infrared Detector*). Se comunica a través de la interfaz UART y es capaz de medir la concentración de CO_2 en un rango de 0 a 5000 ppm con una precisión de 50 ppm [20].



FIGURA 2.5. Sensor MH-Z19C.

2.2.5. Sensor de detección de pH

El sensor PH-4502C (figura 2.6) mide la acidez o alcalinidad del líquido mediante un electrodo de vidrio. Se comunica a través de la interfaz analógica y es capaz de medir el pH en un rango de 0 a 14 [21].



FIGURA 2.6. Sensor PH-4502C.

2.2.6. Sensor de conductividad eléctrica

El sensor de CE (figura 2.7) mide la capacidad de una solución para conducir electricidad, lo cual depende de la presencia de iones. A mayor concentración de iones, mayor es la conductividad [22]. Este sensor se comunica a través de una interfaz analógica y puede medir la conductividad en un rango de 0 a 20 mS/cm [23].



FIGURA 2.7. Sensor CE.

2.2.7. Sensor de sólidos disueltos totales

El sensor TDS (figura 2.8) mide la cantidad de sales, minerales y metales que se encuentran disueltos en el líquido [24]. Se comunica a través de la interfaz analógica y es capaz de medir la concentración de TDS en un rango de 0 a 1000 ppm [25].



FIGURA 2.8. Sensor TDS.

2.2.8. Sensor de temperatura digital sumergible

El DS18B20 (figura 2.9) es un sensor digital de temperatura sumergible en líquidos. Se comunica a través de la interfaz *OneWire* y puede medir la temperatura en un rango de -55 °C a 125 °C con una precisión de ±0.5 °C [26].



FIGURA 2.9. Sensor de temperatura DS18B20.

2.2.9. Sensor ultrasónico

El sensor HC-SR04 (figura 2.10) mide distancias por ultrasonido en un rango de 2 cm a 400 cm con una precisión de 3 mm. Se comunica a través de la interfaz GPIO [27].



FIGURA 2.10. Sensor HC-SR04.

2.2.10. Sensor de medición de consumo eléctrico

El sensor PZEM-004T (figura 2.11) es un módulo de medición de parámetros eléctricos que mide la tensión, corriente, potencia activa y energía consumida. Se comunica a través de la interfaz UART y es capaz de medir la tensión en un rango de 80 a 260 V, la corriente en un rango de 0 a 100 A, y la potencia en un rango de 0 a 22 kW [28].

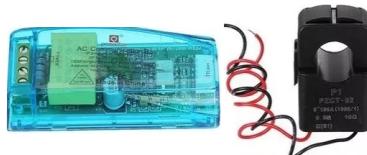


FIGURA 2.11. Sensor de medición de consumo eléctrico.

2.2.11. Módulo Relay

El módulo Relay (figura 2.12) es un actuador eléctrico de dos canales optocoplados que permite el control de encendido y apagado de dispositivos eléctricos. Se comunica a través de la interfaz GPIO y es capaz de controlar dispositivos de hasta 10 A y 250 VAC [29].



FIGURA 2.12. Relay de 2 Canales 5 V 10 A

2.3. Desarrollo de firmware

En esta sección se describe la herramienta de software utilizada para la programación de los microcontroladores ESP32.

2.3.1. MicroPython

MicroPython es una implementación optimizada de Python 3 para microcontroladores y sistemas embebidos. Está diseñado para ejecutarse en dispositivos con recursos limitados, como el ESP32, y proporciona una forma sencilla de programar microcontroladores utilizando un lenguaje de alto nivel como Python [30].

Su facilidad de uso, la amplia disponibilidad de bibliotecas y la reducción del tiempo de desarrollo lo convierten en una opción eficiente. Además, al ser un lenguaje interpretado, posibilita la ejecución interactiva de pruebas y depuración, facilitando la identificación y corrección de errores en el código [31].

2.4. Desarrollo Backend y API

En esta sección se presentan las herramientas de software utilizadas en el desarrollo del backend y la API REST.

2.4.1. FastAPI

FastAPI es un framework moderno para la construcción de APIs REST rápidas y escalables en Python. Está diseñado para ser fácil de usar, rápido de desarrollar y altamente eficiente en términos de rendimiento. FastAPI utiliza Python 3.6+ y aprovecha las características de tipado estático de Python para proporcionar una API autodocumentada y con validación de tipos integrada [32].

2.4.2. MongoDB

MongoDB es una base de datos NoSQL (del inglés, *Not Only SQL*) de código abierto y orientada a documentos que proporciona una forma flexible y escalable de almacenar y recuperar datos. Utiliza un modelo de datos basado en documentos que almacena datos en un formato similar a JSON (del inglés, *JavaScript Object Notation*) llamado BSON (del inglés, *Binary JSON*) que permite almacenar datos de forma anidada y sin esquema fijo, lo que facilita la manipulación y consulta de datos no estructurados [33].

2.5. Desarrollo Frontend

En esta sección se presentan las herramientas de software utilizadas en el desarrollo del frontend.

2.5.1. React

React es una biblioteca de JavaScript de código abierto para construir interfaces de usuario interactivas y reutilizables. Desarrollada por Facebook, React permite crear componentes de interfaz de usuario que se actualizan de forma eficiente

cambian los datos, lo que facilita la creación de aplicaciones web rápidas y dinámicas [34].

2.6. Infraestructura y despliegue

En esta sección se presentan las herramientas de software utilizadas en la infraestructura y despliegue del sistema.

2.6.1. Docker

Docker es una plataforma de código abierto que permite a los desarrolladores y a los equipos de operaciones construir, empaquetar y desplegar aplicaciones en contenedores. Los contenedores son unidades de software ligeros y portátiles que incluyen todo lo necesario para ejecutar una aplicación, incluidas las bibliotecas, las dependencias y el código [35].

Docker facilita la creación de entornos de desarrollo y despliegue consistentes y reproducibles, lo que garantiza que las aplicaciones se ejecuten de la misma manera en cualquier entorno.

2.6.2. AWS IoT Core

AWS IoT Core es un servicio de AWS (del inglés, *Amazon Web Services*) que permite a los dispositivos conectarse de forma segura a la nube y comunicarse entre sí a través de protocolos de comunicación estándar como MQTT y HTTP. Proporciona una infraestructura escalable y segura para la gestión de dispositivos, la recopilación de datos y la integración con otros servicios de AWS [36]. Utiliza TLS para cifrar la comunicación entre los dispositivos y la nube, garantizando la confidencialidad y la integridad de los datos.

2.6.3. AWS EC2

Amazon EC2 (del inglés, *Elastic Compute Cloud*) es un servicio de AWS que proporciona capacidad informática escalable en la nube. Permite a los usuarios lanzar instancias virtuales en la nube con diferentes configuraciones de CPU, memoria, almacenamiento y red, lo que facilita la implementación de aplicaciones escalables y de alta disponibilidad [37].

2.7. Herramientas de desarrollo

En esta sección se presentan las herramientas de software utilizadas en el desarrollo del sistema.

2.7.1. Visual Studio Code

Visual Studio Code, comúnmente abreviado como VS Code, es un entorno de desarrollo integrado (IDE, del inglés, *Integrated Development Environment*) de código abierto, altamente extensible y multiplataforma compatible con Windows, macOS y Linux [38].

VS Code es un editor de código ligero y rápido con soporte para cientos de lenguajes de programación y extensiones que permiten personalizar y mejorar la

funcionalidad del editor. Además, cuenta con herramientas de depuración integradas, control de versiones y terminal integrada.

2.7.2. Postman

Postman es una plataforma de colaboración para el desarrollo de APIs que permite a los desarrolladores diseñar, probar y documentar de forma rápida. Proporciona una interfaz gráfica intuitiva para enviar solicitudes HTTP a un servidor y visualizar las respuestas, lo que facilita la depuración y el desarrollo de APIs [39].

2.7.3. Github

Github es una plataforma de alojamiento de repositorios Git [40] que permite a los desarrolladores colaborar en proyectos de software de forma distribuida. Proporciona herramientas para gestionar el código fuente, realizar seguimiento de los cambios, revisar el código, realizar integración continua y despliegue automático [41].

Capítulo 3

Diseño e implementación

En este capítulo se describe el diseño y la implementación del sistema de monitoreo y control de invernaderos. Se detallan los componentes principales del sistema, las decisiones de diseño tomadas, y los pasos seguidos para su implementación.

3.1. Arquitectura del sistema

La figura 3.1 ilustra la arquitectura general del sistema y la interacción entre los diferentes componentes.

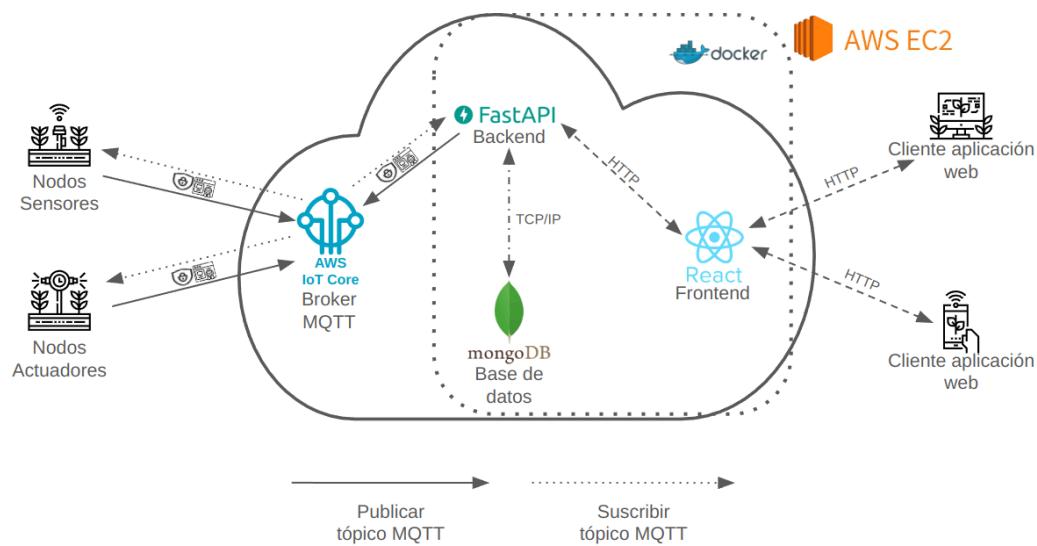


FIGURA 3.1. Arquitectura de la solución propuesta.

La arquitectura planteada para el desarrollo del trabajo sigue el modelo de tres capas típico de un sistema IoT: percepción, red y aplicación.

- Capa de percepción: formada por nodos sensores y actuadores que recopilan datos del entorno y ejecutan acciones de acuerdo con la configuración establecida.
- Capa de red: encargada de gestionar la comunicación entre los dispositivos IoT y el backend. Los sensores y actuadores transmiten datos a través de Wi-Fi, los cuales son gestionados por un broker MQTT.

- Capa de aplicación: plataforma en la nube responsable del procesamiento, almacenamiento y visualización de datos. Facilita la interacción con los dispositivos, la gestión de la información y la presentación de datos mediante una interfaz accesible para el usuario.

3.1.1. Capa de percepción

La capa de percepción está constituida por los nodos sensores y actuadores, que se encargan de recopilar datos del entorno y ejecutar acciones específicas en función de los parámetros configurados.

Cada nodo sensor incluye un microcontrolador ESP-WROOM-32, el cual se conecta a diversos sensores que miden parámetros ambientales como temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica, luminosidad, concentración de CO_2 , pH, conductividad eléctrica, temperatura de la solución nutritiva, nivel de líquidos, consumo eléctrico, entre otros. Los nodos actuadores, por su parte, cuentan con relés para controlar dispositivos como ventiladores, iluminación y sistemas de recirculación de nutrientes.

Los nodos están conectados a una red Wi-Fi local, lo que les permite establecer comunicación con otros dispositivos en la red y transmitir los datos de los sensores hacia el servidor IoT. La transmisión de datos se realiza con el protocolo MQTT.

3.1.2. Capa de red

La capa de red está compuesta por la infraestructura que gestiona la comunicación entre los nodos sensores y actuadores y la plataforma de backend. Los nodos sensores y actuadores se conectan a la red Wi-Fi local, lo que les permite acceder a internet y a la infraestructura de la nube. Una vez conectados, los dispositivos transmiten los datos a través del protocolo MQTT.

La comunicación entre los nodos y el broker MQTT se asegura mediante el uso de certificados de seguridad, los cuales garantizan la autenticación de los dispositivos y el cifrado de los datos.

El broker MQTT utilizado en este trabajo es AWS IoT Core, un servicio completamente gestionado que permite establecer una conexión segura y escalable entre los dispositivos IoT y la nube. Este broker actúa como intermediario para la transmisión de datos entre los nodos y la capa de aplicación.

3.1.3. Capa de aplicación

La capa de aplicación es responsable del procesamiento, almacenamiento y visualización de los datos recopilados por los nodos. Para esta capa, se implementó el servidor IoT en la nube utilizando el servicio AWS EC2, que permite ejecutar aplicaciones y servicios en instancias virtuales.

El procesamiento y la gestión de datos se realiza a través de un backend desarrollado con FastAPI, mientras que la base de datos MongoDB se utiliza para el almacenamiento de la información. Además, se implementó una interfaz gráfica de usuario en React para la visualización y gestión de los datos. Todos estos servicios fueron desplegados a través de contenedores Docker.

3.2. Modelo de datos

En esta sección se presenta el modelo de datos implementado en el sistema.

3.2.1. Pruebas iniciales de sensores

Para diseñar el modelo adecuado, se llevó a cabo una prueba inicial con los sensores y se registraron los datos generados por cada uno de ellos. La tabla 3.1 muestra los datos obtenidos de cada sensor, tal como lo devuelve la librería utilizada para su configuración y lectura.

TABLA 3.1. Principales sensores y librerías utilizadas

Componente	Datos
Sensor BME280	La librería utilizada [42] devuelve los valores de temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica como Float.
Sensor BH1750	La librería utilizada [43] devuelve el valor de lux como Float.
Sensor MH-Z19C	La librería utilizada [44] devuelve el valor de ppm de CO_2 como Int.
Sensor PH-4502	La librería utilizada [45] devuelve el valor de TDS como Float.
Sensor de CE	La librería utilizada [46] devuelve el valor de TDS como Float.
Sensor de TDS	La librería utilizada [47] devuelve el valor de TDS como Float.
Sensor DS18B20	La librería utilizada [48] devuelve el valor de la temperatura como Float.
Sensor HC-SR04	La librería utilizada [49] devuelve el valor de distancia en centímetros como Int.
Sensor PZEM-004T	La librería utilizada [50] devuelve los valores de voltaje, corriente, potencia, cálculo de potencia y factor de potencia como Float.

3.2.2. Diseño del modelo de datos

El diseño del modelo de datos se desarrolló de acuerdo a los tipos de datos proporcionados por los sensores, así como los requerimientos técnicos establecidos para el sistema.

La estructura se organizó en colecciones dentro de MongoDB, donde cada colección representa un tipo de dato específico. Cada colección contiene documentos que almacenan las lecturas de los sensores y actuadores, y también incluye colecciones relacionadas con usuarios, ambientes, tipos de ambientes, entre otros. Las colecciones se vinculan mediante identificadores únicos, lo que facilita la conexión entre las diferentes colecciones.

La figura 3.2 muestra el modelo de datos implementado en el sistema.

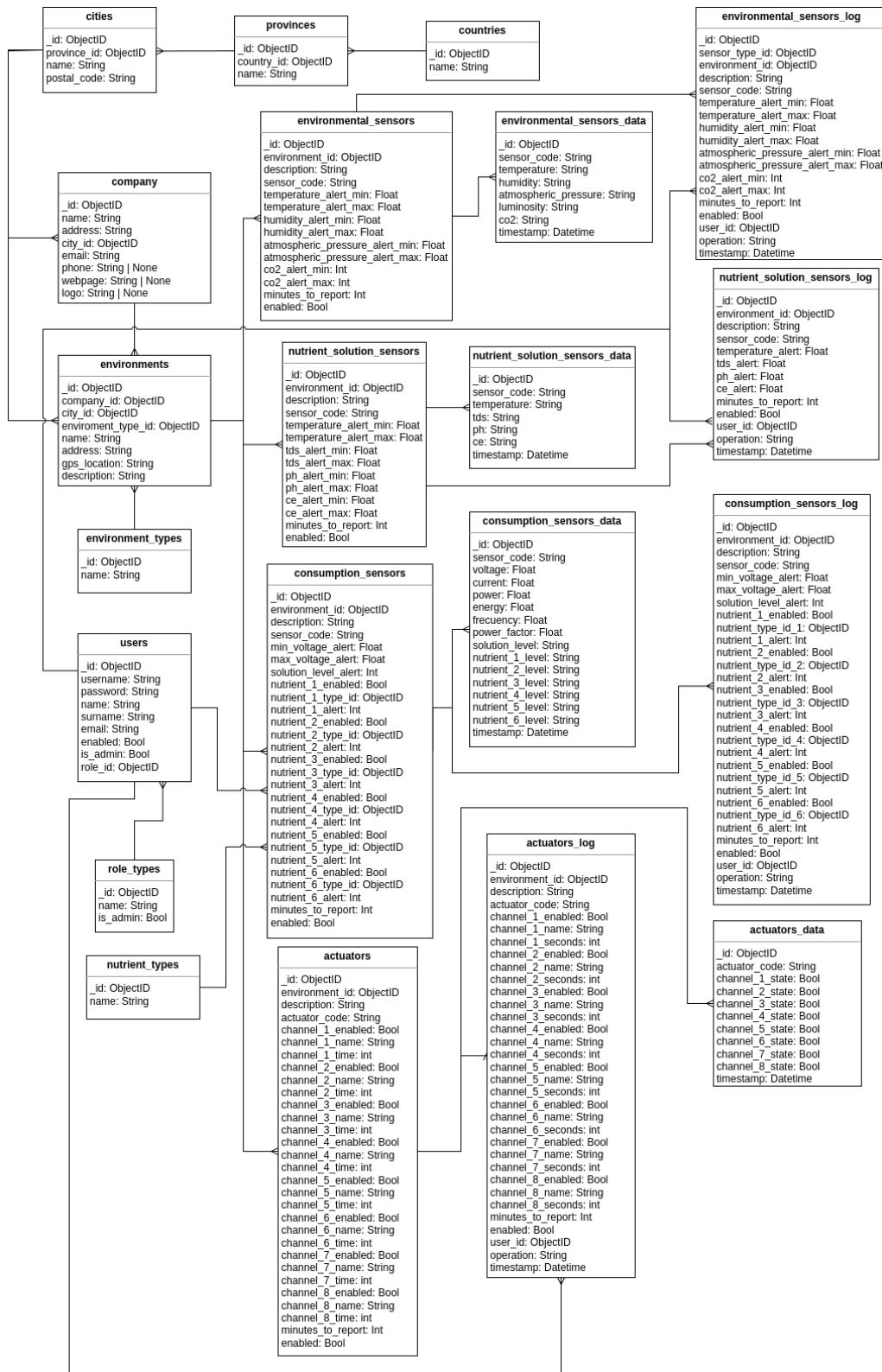


FIGURA 3.2. Modelo de datos implementado.

3.3. Servidor IoT

En esta sección se presenta la arquitectura del sistema y se detallan las tecnologías utilizadas y la arquitectura del servidor.

3.3.1. Tecnologías utilizadas

Backend

Para el desarrollo del backend se optó por utilizar el framework FastAPI basado en Python, que permite crear APIs RESTful de manera rápida y eficiente. La comunicación entre el frontend y el backend se realizó a través de la API REST expuesta con HTTP con el formato JSON para el intercambio de datos.

Para el envío de los datos en tiempo real desde el backend al frontend, se utilizó la librería Websocket [51] de FastAPI, que permite establecer una conexión bidireccional entre el servidor y el cliente.

La comunicación entre el backend y el broker MQTT se implementó mediante el SDK (del inglés, *Software Development Kit*) de AWS IoT para Python [52], que simplifica la integración de FastAPI con el protocolo MQTT. Este SDK permite gestionar la conexión con el broker, así como publicar y suscribirse a tópicos.

Base de datos

Como se mencionó anteriormente, se utilizó MongoDB como base de datos para almacenar los datos generados por los nodos sensores y actuadores, así como la información relacionada con los requerimientos del sistema.

La comunicación entre el backend y la base de datos se realizó a través de la librería Motor [53], que proporciona una interfaz asíncrona para interactuar con MongoDB. Además se utilizó el ODM (del inglés, *Object Document Mapper*), a través de la librería Beanie [54], que permite definir modelos y realizar consultas de manera sencilla.

Frontend

El frontend se desarrolló mediante la librería React de Facebook. Para el diseño de la interfaz, se utilizó la librería Bootstrap para React [55] lo que permitió crear una aplicación web responsive y fácil de usar.

La comunicación entre el frontend y el backend se realizó a través de los endpoints de la API REST. Para la visualización de los datos en tiempo real, se utilizó la librería Socket.IO [56], que permite establecer una conexión WebSocket entre el frontend y el backend.

Despliegue

Por último, para el despliegue del sistema se utilizó Docker, que permite crear contenedores para cada uno de los componentes del sistema. Esto facilita la gestión y el despliegue de la aplicación, ya que cada componente se ejecuta en su propio contenedor, lo que permite una mayor flexibilidad y escalabilidad.

3.3.2. Arquitectura del servidor

La arquitectura se diseñó para ser escalable, flexible y fácil de mantener. Está compuesta de los siguientes componentes principales:

- Backend.
 - API REST.
 - Autenticación y autorización.
 - Integración con la base de datos.
 - Conexión con el broker MQTT.
 - Comunicación con frontend en tiempo real con WebSocket.
- Capa de datos.
- Frontend.
 - Interfaz de usuario.
 - Comunicación con backend en tiempo real con WebSocket.

La figura 3.3 muestra la arquitectura del servidor del sistema IoT.

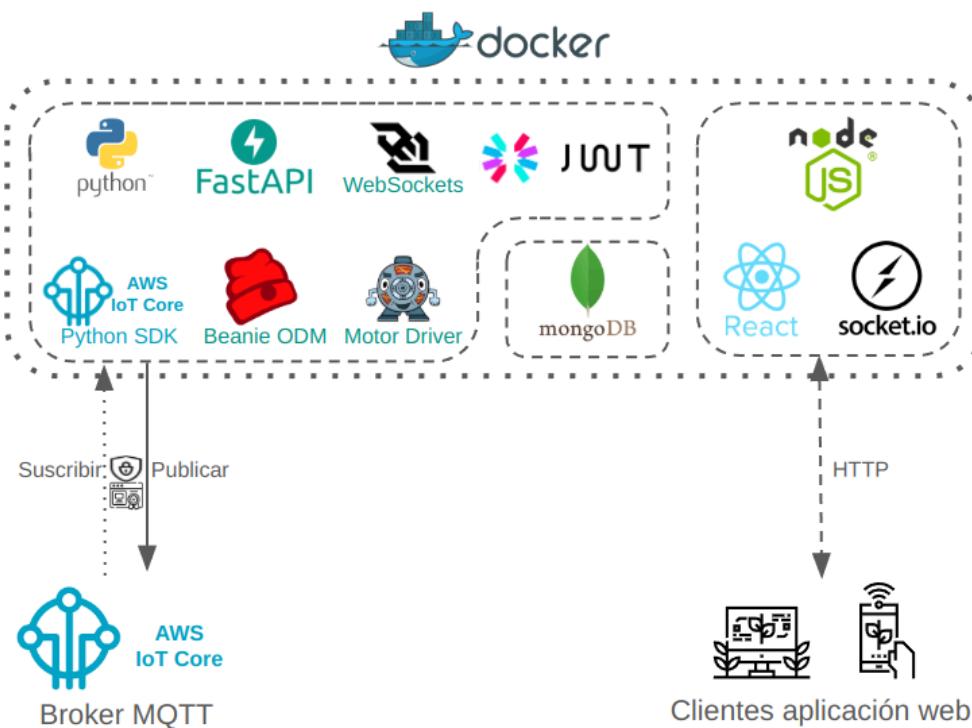


FIGURA 3.3. Arquitectura del servidor del sistema IoT.

A continuación, se describe brevemente cada uno de estos componentes:

Backend

API REST: Es el servicio principal que gestiona las peticiones del frontend. Permite la creación, lectura, actualización y eliminación de datos relacionados con los sensores, actuadores, ambientes y usuarios, entre otros.

La API REST posee los endpoints necesarios para realizar las operaciones de lectura de datos históricos y configuración de los nodos sensores y actuadores.

Para implementar el modelo de datos representado en la figura 3.2, se utilizó la librería Beanie, que permite definir modelos de datos de manera declarativa y realizar consultas de forma sencilla.

Autenticación y autorización: Es el componente encargado de gestionar la autenticación y autorización de los usuarios. Se implementó un sistema de autenticación basado en tokens JWT, que permite a los usuarios acceder a la API de manera segura. Se estableció una duración para los tokens de acceso y de refresco, lo que permitió que los usuarios mantengan su sesión activa sin necesidad de autenticarse nuevamente con sus credenciales.

Integración con la base de datos: Es la integración de FastAPI con MongoDB para persistir la información. Se utilizó la biblioteca Motor para la conexión asíncrona con la base de datos y realizar consultas. Beanie ODM proporciona una capa de abstracción sobre Motor, lo que facilita la interacción con la base de datos y permite definir modelos de datos de manera declarativa.

Conexión con el broker MQTT: Es el componente encargado de la comunicación bidireccional con los dispositivos IoT. Se implementó un cliente MQTT que se conecta a AWS IoT Core y gestiona la publicación y suscripción a los tópicos correspondientes.

Comunicación con frontend en tiempo real con WebSocket: Es el componente encargado de gestionar la comunicación en tiempo real entre el servidor y el cliente. Se implementó la librería WebSocket en el backend que permite a los clientes conectarse y recibir actualizaciones en tiempo real sobre los datos recopilados por los nodos.

Capa de datos

Es el componente encargado de persistir la información en la base de datos MongoDB. Se implementó un esquema de datos que permite almacenar los datos recopilados por los nodos sensores y actuadores, así como la información relacionada con los usuarios, ambientes y tipos de ambientes, entre otros. Los datos se almacenan en colecciones específicas, donde cada colección representa un tipo de dato.

Frontend

Es la interfaz de usuario desarrollada en React. Permite a los usuarios interactuar con el sistema, visualizar los datos en tiempo real y gestionar la configuración de los nodos sensores y actuadores. Se implementó una interfaz responsive que se adapta a diferentes dispositivos y tamaños de pantalla.

3.4. Desarrollo del backend

En esta sección se detallan los aspectos clave en el diseño y desarrollo del servidor backend, así como la lógica de negocio implementada.

3.4.1. Diseño de la API

El diseño se estructuró en base a las necesidades del sistema y los requerimientos funcionales y no funcionales establecidos. Se organizaron los archivos en carpetas de acuerdo a su funcionalidad.

La tabla 3.2 presenta un resumen de los principales endpoints de la API, junto con una breve descripción de la acción y el método HTTP utilizado.

TABLA 3.2. Resumen de principales endpoints de la API

Método	Endpoint	Acción
POST	/login	hacer login
GET	/renew-token	renovar token
GET	/users/	obtener usuarios
POST	/users/	crear usuario
PUT	/users/	actualizar usuario
GET	/users/{id}	obtener un usuario
DELETE	/users/{id}	eliminar usuario
GET	/environments/	obtener ambientes
POST	/environments/	crear ambiente
GET	/environments/{id}	obtener un ambiente
PUT	/environments/{id}	actualizar ambiente
DELETE	/environments/{id}	eliminar ambiente
GET	/actuators/	obtener actuadores
POST	/actuators/	crear actuador
GET	/actuators/{id}	obtener un actuador
PUT	/actuators/{id}	actualizar actuador
DELETE	/actuators/{id}	eliminar actuador
GET	/sensors/environmental/	obtener sensores
POST	/sensors/environmental/	crear sensor ambiental
GET	/sensors/environmental/{id}	obtener un sensor
PUT	/sensors/environmental/{id}	actualizar sensor
DELETE	/sensors/environmental/{id}	eliminar sensor
GET	/sensors/nutrients/solution/	obtener sensores
POST	/sensors/nutrients/solution/	crear sensor
GET	/sensors/nutrients/solution/{id}	obtener un sensor
PUT	/sensors/nutrients/solution/{id}	actualizar sensor
DELETE	/sensors/nutrients/solution/{id}	eliminar sensor
GET	/sensors/consumption/	obtener sensores
POST	/sensors/consumption/	crear sensor
GET	/sensors/consumption/{id}	obtener un sensor
PUT	/sensors/consumption/{id}	actualizar sensor
DELETE	/sensors/consumption/{id}	eliminar sensor
GET	/actuators/data/	datos históricos
GET	/sensors/environmental/data/	datos históricos
GET	/sensors/consumption/data/	datos históricos
GET	/sensors/nutrients/solution/data/	datos históricos

El listado completo de endpoints de la API se puede consultar en el apéndice A.

3.4.2. Autenticación y autorización

Se implementó un sistema de autenticación basado en JWT, que permite a los usuarios acceder a la API de manera segura. La autenticación se realiza mediante el envío de las credenciales del usuario en el cuerpo de la solicitud, y el servidor responde con un token JWT que se utiliza para autenticar las solicitudes posteriores.

El token JWT contiene la información del usuario, este token se envía en el encabezado de las solicitudes a la API. El servidor verifica la validez del token y permite o deniega el acceso a los recursos solicitados. El token se diseña para que tuviera vencimiento, por lo que se implementó un sistema de renovación que permite a los usuarios mantener su sesión activa sin necesidad de autenticarse nuevamente con sus credenciales.

El código de la implementación de la autenticación y autorización se puede consultar en el apéndice B.

La figura 3.4 muestra el esquema de autenticación, autorización y renovación de tokens implementado en el sistema.

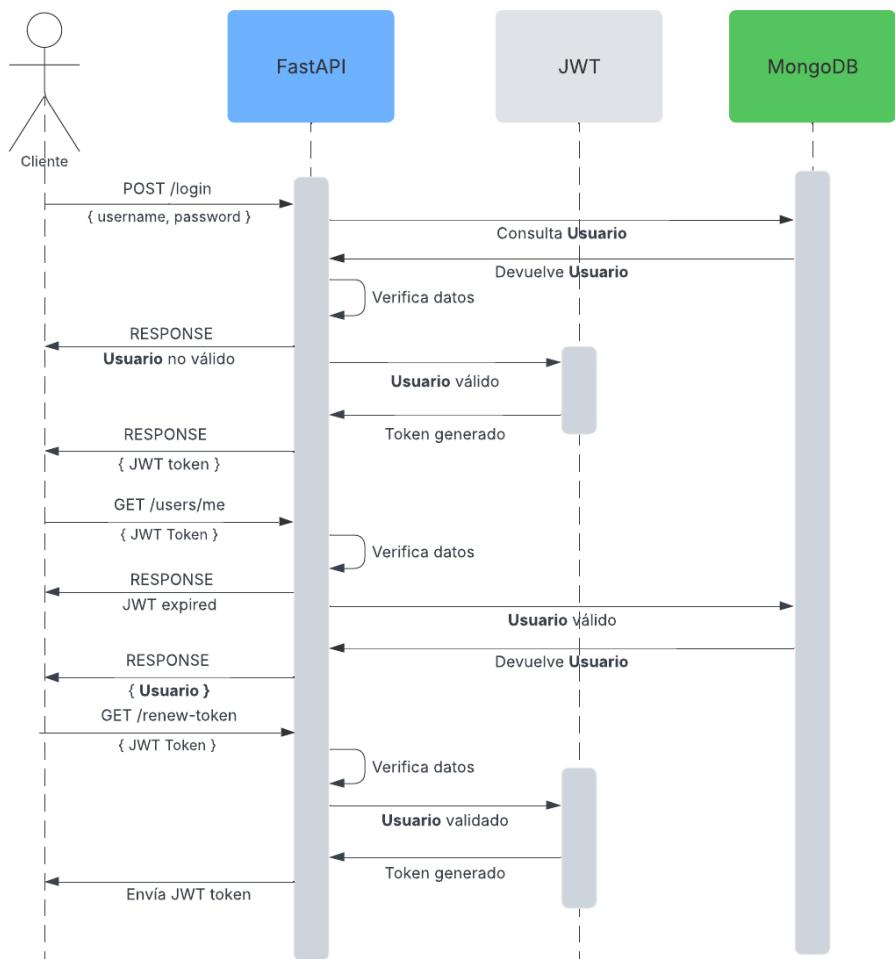


FIGURA 3.4. Esquema de autenticación y autorización.

3.4.3. Persistencia de datos

En FastAPI, cada modelo representa una colección en la base de datos e incluye los campos necesarios para almacenar la información requerida. Para su definición, se utilizó Beanie, que además permite establecer relaciones entre modelos, facilitando la creación de un esquema de datos estructurado y coherente.

El código 3.1 muestra un ejemplo de cómo se definen los modelos con Beanie y se ejemplifica una relación entre los modelos.

```

1 from beanie import Document, Link, PydanticObjectId
2 from typing import Optional
3 from models.environment import Environment
4
5 class EnvironmentalSensor(Document):
6     id: Optional[PydanticObjectId] = None
7     environment: Link[Environment]
8     description: str
9     sensor_code: str
10    temperature_alert_min: float
11    temperature_alert_max: float
12    humidity_alert_min: float
13    humidity_alert_max: float
14    atmospheric_pressure_alert_min: float
15    atmospheric_pressure_alert_max: float
16    co2_alert_min: float
17    co2_alert_max: float
18    minutes_to_report: int
19    enabled: bool
20
21 class Settings:
22     collection_name = "environmental_sensors"
```

CÓDIGO 3.1. Ejemplo de definición de modelos con Beanie

Como se mencionó anteriormente, los datos se almacenan en MongoDB. La conexión a la base de datos se estableció con Motor, un cliente asíncrono para MongoDB, y Beanie, que facilitó la inicialización de modelos y la ejecución de consultas. La cadena de conexión consta de una URL que incluye el nombre de usuario, la contraseña y la dirección del servidor.

El código 3.2 muestra un ejemplo de cómo establecer la conexión e inicializar los modelos con Beanie.

```

1 async def init_db():
2     client = AsyncIOMotorClient("mongodb://USER:PASSWORD@URL:PORT/?"
3                                 "authSource=admin")
4     db = client.get_database("envirosense")
5     await init_beanie(database=db, document_models=[
6         User, Role, Country, Province, City, Company, EnvironmentType,
7         Environment, NutrientType, ConsumptionSensor,
8         ConsumptionSensorData, ConsumptionSensorLog,
9         EnvironmentalSensor, EnvironmentalSensorData,
10        EnvironmentalSensorLog, NutrientSolutionSensor,
11        NutrientSolutionSensorData, NutrientSolutionSensorLog,
12        Actuator, ActuatorData, ActuatorLog
13    ])
```

CÓDIGO 3.2. Ejemplo de conexión a MongoDB

3.4.4. Comunicación con el broker MQTT

A continuación, se describe la implementación de la comunicación con el broker MQTT.

Pasos en AWS IoT Core

A continuación, se describen los pasos realizados en AWS IoT Core para configurar la conexión con el broker MQTT.

1. Se creó un objeto *Thing* en AWS IoT Core, que representa un dispositivo IoT. Este objeto se utiliza para gestionar la conexión y la comunicación con el broker.
2. Se generaron certificados de seguridad y claves privadas para el objeto *Thing*, que permiten autenticar la conexión y cifrar los datos transmitidos. Estos certificados son necesarios para establecer una conexión segura con el broker MQTT.
3. Se definieron las políticas de acceso necesarias para el objeto *Thing*, a fin de permitir publicar y suscribirse a los tópicos correspondientes.

La figura 3.5 muestra un ejemplo de cómo se definen las políticas de acceso en AWS IoT Core.

The screenshot shows the AWS IoT Core Policies page. The policy name is 'backend_connection-Policy'. The 'Detalles' section shows the ARN of the policy, version 2, and creation and update times. Below it, the 'Versión activa' section displays the JSON content of the policy:

```
{
  "Version": "2012-10-17",
  "Statement": [
    {
      "Effect": "Allow",
      "Action": [
        "iot:Publish",
        "iot:Receive",
        "iot:Subscribe",
        "iot:Connect"
      ],
      "Resource": "arn:aws:iot:*:*:*"
    }
  ]
}
```

FIGURA 3.5. Ejemplo de políticas de acceso en AWS IoT Core.

Políticas de acceso: determinan los permisos del cliente para publicar, suscribirse y recibir mensajes en los tópicos. Se aplican a los certificados generados para el cliente y controlan el acceso a los recursos de AWS IoT Core.

Definidas en formato JSON, estas políticas garantizan que solo los clientes autorizados puedan interactuar con los recursos y operar en los tópicos correspondientes. Además, pueden configurarse de manera específica para cada cliente, permitiendo un control granular sobre los permisos de acceso.

Implementación de MQTT en FastAPI

Una vez que se creó y se configuró el objeto *Thing* en AWS IoT Core, se procedió a la implementación de la conexión del broker con FastAPI. Para ello, se utilizó la SDK de AWS IoT para Python, que proporciona una interfaz sencilla para conectarse al broker y gestionar la comunicación con los dispositivos IoT.

Se implementó un cliente MQTT que se conecta al broker con los certificados generados previamente. Este cliente permite publicar y suscribirse a los tópicos correspondientes, lo que facilita la comunicación entre el servidor y los dispositivos IoT.

En la aplicación FastAPI se definieron dos rutas claves para la chequear la comunicación con AWS IoT Core:

1. Una ruta para verificar la conexión con el broker MQTT.
2. Una ruta para enviar mensajes a un tópico específico y comprobar la comunicación entre el servidor y el broker.

Comunicación con MQTT en FastAPI

Además de las rutas anteriores, en FastAPI se implementaron métodos para suscribirse a los tópicos, recibir mensajes de los nodos y publicar en los tópicos correspondientes.

Al iniciar el servicio, el cliente MQTT se conecta al broker y se suscribe a los tópicos configurados. Los mensajes recibidos se procesan, almacenan en MongoDB y notifican al frontend vía WebSocket para actualizar la interfaz en tiempo real.

El cliente MQTT, desarrollado como una clase, gestiona la conexión, publicación y suscripción a los tópicos, iniciándose junto con el servidor FastAPI para una comunicación eficiente.

La figura 3.6 muestra una prueba de conexión al broker MQTT con Postman.

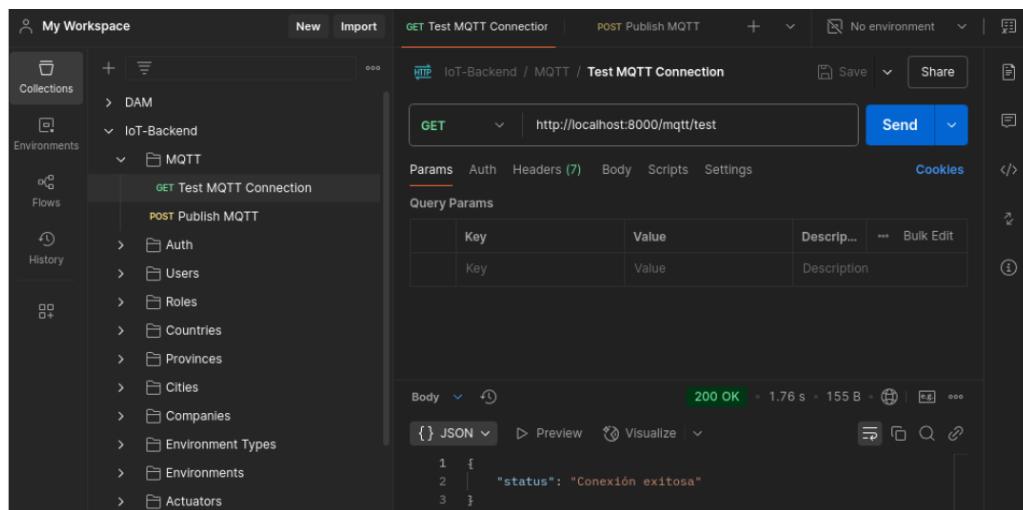


FIGURA 3.6. Pruebas en Postman. Test de conexión al broker MQTT.

La figura 3.7 muestra una prueba de publicación de un mensaje en un tópico con Postman.

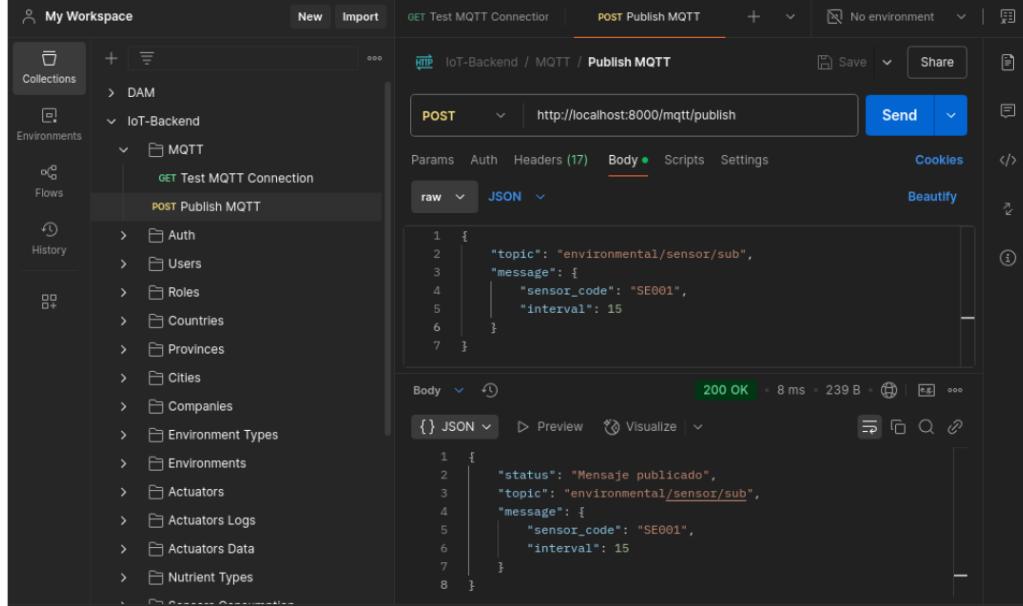


FIGURA 3.7. Pruebas en Postman. Publicación de un mensaje en un tópico.

Por otro lado, la figura 3.8 ilustra cómo la aplicación FastAPI se conecta al broker MQTT y se suscribe a los tópicos definidos. Se muestra la interacción del cliente MQTT con los mensajes recibidos desde los nodos sensores y actuadores, almacenándolos en la base de datos MongoDB.

En la misma figura, también se observa un ejemplo donde la aplicación monitorea y registra un nuevo intervalo de envío de datos de un sensor, destacando la interacción entre el cliente MQTT y el servidor FastAPI.

```

BACKEND
└── mqtt
    ├── certificates.py
    ├── aws_config.py
    ├── aws_mqtt_crypt.py
    └── aws_mqtt.py
        ├── __pycache__
        ├── actuator_data.py
        ├── actuator_log.py
        ├── actuator.py
        ├── client.py
        ├── environment.py
        ├── environment_types.py
        ├── environments.py
        ├── log.py
        ├── nutrient_types.py
        ├── provinces.py
        ├── regions_consumption_data.py
        ├── sensors_consumption_log.py
        ├── sensors_consumption.py
        ├── sensors_environmental_data.py
        ├── sensors_environmental_log.py
        ├── sensors_environmental.py
        ├── sensors_environmental_solution_data.py
        ├── sensors_environmental_solution_log.py
        ├── sensors_nutrient_solution.py
        ├── sensors_nutrient_solution_log.py
        ├── users.py
        └── static
            └── __pycache__
                ├── authentication.py
                ├── aws_publish.py
                ├── aws_subscribe.py
                ├── config.py
                ├── dependencies.py
                ├── main_crypt.py
                └── main.py
    └── LINEA DE TIEMPO

```

FIGURA 3.8. Cliente MQTT en FastAPI.

Para finalizar, la figura 3.9 muestra los datos almacenados en la base de datos MongoDB, que refleja la información presentada en la Figura 3.8.

The screenshot shows the Compass MongoDB interface. On the left, the 'Connections' sidebar lists 'localhost:27017' with its subcollections: admin, config, envirosense (which is expanded to show Actuator, ActuatorLog, City, Company, ConsumptionSensor, ConsumptionSensorLog, Country, Environment, EnvironmentType, EnvironmentalSensor, EnvironmentalSensorData, EnvironmentalSensorLog, NutrientSolutionSensor, NutrientSolutionSensorLog, NutrientType, Province), and ...'. The main area displays the 'EnvironmentalSensorData' collection with three documents. Each document is represented by a card containing the following data:

```

_id: ObjectId('67ef055dce39a57f514f4d05')
sensor_code : "SE001"
temperature : 28.52
humidity : 56.43
atmospheric_pressure : 992.88
luminosity : 69.17
co2 : 857
datetime : 2025-04-03T22:02:04.000+00:00

```

```

_id: ObjectId('67ef056dce39a57f514f4d06')
sensor_code : "SE001"
temperature : 28.52
humidity : 56.48
atmospheric_pressure : 992.83
luminosity : 69.17
co2 : 824
datetime : 2025-04-03T22:02:20.000+00:00

```

```

_id: ObjectId('67ef0577ce39a57f514f4d07')
sensor_code : "SE001"
temperature : 28.52
humidity : 56.56
atmospheric_pressure : 992.84
luminosity : 68.33
co2 : 833
datetime : 2025-04-03T22:02:30.000+00:00

```

FIGURA 3.9. Datos almacenados en MongoDB.

El código completo de la implementación de la conexión con el broker MQTT se encuentra en el Apéndice C.

3.4.5. Implementación de WebSockets

La implementación de WebSockets se realizó utilizando la librería Websocket de FastAPI, que permitió enviar datos en tiempo real desde el servidor al cliente. Se implementaron métodos para establecer la conexión WebSocket y enviar datos al cliente cuando se reciben nuevos datos de los nodos sensores y actuadores.

FALTA DESARROLLAR ESTA IMPLEMENTACIÓN

3.5. Desarrollo del frontend

En esta sección se describe el diseño y desarrollo de la interfaz de usuario, enfocada en la visualización de datos en tiempo real y la gestión de dispositivos.

3.6. Desarrollo de nodos sensores y actuadores

Explicación del desarrollo del firmware para los nodos sensores y actuadores basados en el microcontrolador ESP32.

3.7. Despliegue del sistema

Esta sección describe el proceso de implementación y configuración del sistema en el entorno de prueba.

Apéndice A

Resumen de endpoints de la API

Las siguientes tablas presentan un resumen de los endpoints implementados en la API, junto con una breve descripción de la acción y el método HTTP utilizado.

TABLA A.1. Resumen de principales endpoints de la API

Método	Endpoint	Acción
GET	/api/	ruta por defecto
POST	/login	hacer login
GET	/renew-token	renovar token
GET	/roles/	obtener roles
POST	/roles/	crear rol
GET	/roles/{id}	obtener un rol
PUT	/roles/{id}	actualizar rol
DELETE	/roles/{id}	eliminar rol
GET	/users/	obtener usuarios
POST	/users/	crear usuario
PUT	/users/	actualizar usuario
GET	/users/{id}	obtener un usuario
DELETE	/users/{id}	eliminar usuario
PATCH	/users/	actualizar username
PATCH	/users/password	actualizar password
GET	/users/me	obtener un usuario
PATCH	/users/change/password	actualizar 'username'
GET	/countries/	obtener países
POST	/countries/	crear país
GET	/countries/{id}	obtener un país
PUT	/countries/{id}	actualizar país
DELETE	/countries/{id}	eliminar país
GET	/provinces/	obtener provincias
POST	/provinces/	crear provincia
GET	/provinces/{id}	obtener una provincia
PUT	/provinces/{id}	actualizar provincia
DELETE	/provinces/{id}	eliminar provincia

TABLA A.2. Resumen de principales endpoints de la API

Método	Endpoint	Acción
GET	/cities/	obtener ciudades
POST	/cities/	crear ciudad
GET	/cities/{id}	obtener una ciudad
PUT	/cities/{id}	actualizar ciudad
DELETE	/cities/{id}	eliminar ciudad
GET	/company/	obtener empresas
POST	/company/	crear empresa
GET	/company/{id}	obtener una empresa
PUT	/company/{id}	actualizar empresa
DELETE	/company/{id}	eliminar empresa
POST	/company/uploadLogo	subir logo empresa
GET	/environments/types/	obtener tipos de ambientes
POST	/environments/types/	crear tipo de ambiente
GET	/environments/types/{id}	obtener un tipo de ambiente
PUT	/environments/types/{id}	actualizar tipo de ambiente
DELETE	/environments/types/{id}	eliminar tipo de ambiente
GET	/environments/	obtener ambientes
POST	/environments/	crear ambiente
GET	/environments/{id}	obtener un ambiente
PUT	/environments/{id}	actualizar ambiente
DELETE	/environments/{id}	eliminar ambiente
GET	/actuators/	obtener actuadores
POST	/actuators/	crear actuador
GET	/actuators/{id}	obtener un actuador
PUT	/actuators/{id}	actualizar actuador
DELETE	/actuators/{id}	eliminar actuador
GET	/actuators/log/	obtener logs de actuadores
POST	/actuators/log/	crear log de actuador
GET	/actuators/data/	obtener datos históricos
POST	/actuators/data/	crear dato histórico
GET	/actuators/data/{id}	obtener un dato histórico
GET	/nutrients/types/	obtener tipos de nutrientes
POST	/nutrients/types/	crear tipo de nutriente
GET	/nutrients/types/{id}	obtener un tipo de nutriente
PUT	/nutrients/types/{id}	actualizar tipo de nutriente
DELETE	/nutrients/types/{id}	eliminar tipo de nutriente
GET	/sensors/consumption/	obtener sensores
POST	/sensors/consumption/	crear sensor
GET	/sensors/consumption/{id}	obtener un sensor
PUT	/sensors/consumption/{id}	actualizar sensor
DELETE	/sensors/consumption/{id}	eliminar sensor
GET	/sensors/consumption/log/	obtener logs de sensor
POST	/sensors/consumption/log/	crear log de sensor
GET	/sensors/consumption/data/	obtener datos históricos
POST	/sensors/consumption/data/	crear dato histórico
GET	/sensors/consumption/data/{id}	obtener un dato histórico

TABLA A.3. Resumen de principales endpoints de la API

Método	Endpoint	Acción
GET	/sensors/environmental/	obtener sensores
POST	/sensors/environmental/	crear sensor ambiental
GET	/sensors/environmental/{id}	obtener un sensor
PUT	/sensors/environmental/{id}	actualizar sensor
DELETE	/sensors/environmental/{id}	eliminar sensor
GET	/sensors/environmental/log/	obtener logs de sensor
POST	/sensors/environmental/log/	crear log de sensor
GET	/sensors/environmental/data/	obtener datos históricos
POST	/sensors/environmental/data/	crear dato histórico
GET	/sensors/environmental/data/{id}	obtener un dato histórico
GET	/sensors/nutrients/solution/	obtener sensores
POST	/sensors/nutrients/solution/	crear sensor
GET	/sensors/nutrients/solution/{id}	obtener un sensor
PUT	/sensors/nutrients/solution/{id}	actualizar sensor
DELETE	/sensors/nutrients/solution/{id}	eliminar sensor
GET	/sensors/nutrients/solution/log/	obtener logs de sensor
POST	/sensors/nutrients/solution/log/	crear log de sensor
GET	/sensors/nutrients/solution/data/	obtener datos históricos
POST	/sensors/nutrients/solution/data/	crear dato histórico
GET	/sensors/nutrients/solution/data/{id}	obtener un dato histórico

Apéndice B

Autenticación con JWT

El control de acceso se realiza mediante la verificación de un token JWT que se envía en las solicitudes. Si el token es válido, se permite el acceso a los recursos protegidos; de lo contrario, se devuelve un error de autenticación.

El código utiliza la biblioteca `passlib` para el manejo de contraseñas y `bcrypt` para el cifrado. Además, se utiliza `fastapi.security` para manejar la autenticación y autorización.

El siguiente código es un ejemplo de cómo implementar el control de acceso en una API REST utilizando FastAPI y JWT.

```

1 from fastapi import APIRouter, Depends, HTTPException, status
2 from fastapi.security import OAuth2PasswordBearer
3 from passlib.context import CryptContext
4 import jwt
5 import bcrypt
6 from models.user import User
7 KEY = "colocar_clave_secreta_aquí"
8 ALG = "HS256"
9 ACCESS_TOKEN_EXPIRE_MINUTES = 30
10 oauth2 = OAuth2PasswordBearer(tokenUrl="login")
11 crypt = CryptContext(schemes=[ "bcrypt" ], deprecated="auto")
12 async def auth_user(token: str = Depends(oauth2)):
13     exception = HTTPException(
14         status_code=status.HTTP_401_UNAUTHORIZED,
15         detail="Credenciales de autenticacion inválidas",
16         headers={"WWW-Authenticate": "Bearer"},
17     )
18     try:
19         user = jwt.decode(token, KEY, algorithms=[ALG]).get("username")
20         if user is None:
21             raise exception
22     except:
23         raise exception
24     user = await User.find_one({ "username": username })
25     if not user:
26         raise exception
27     return user
28     async def current_user(user: User = Depends(auth_user)):
29         if not user.enabled:
30             raise HTTPException(
31                 status_code=status.HTTP_400_BAD_REQUEST, detail="Usuario
32 deshabilitado"
33         )
34         return user

```

CÓDIGO B.1. Pseudocódigo del control de acceso

Apéndice C

Conexión al broker MQTT con FastAPI y AWS IoT SDK para Python

La conexión al broker MQTT se realiza para permitir la comunicación entre el servidor IoT y el broker MQTT.

El código C.1 muestra el proceso de conexión a AWS IoT Core y la implementación de la lógica de publicación y suscripción a los tópicos.

En este código, se definen los métodos para conectar al broker, publicar y suscribirse a tópicos, y manejar los mensajes recibidos. Se implementó un cliente MQTT que interactúa con AWS IoT Core, gestionando la comunicación con los nodos sensores y actuadores. Además, se incorporaron métodos para recibir datos de estos dispositivos, enviarles comandos y almacenar la información en la base de datos MongoDB.

```

1  import asyncio
2  import json
3  import os
4  from AWSIoTPythonSDK.MQTTLib import AWSIoTMQTTClient
5  from models.sensor_environmental_data import EnvironmentalSensorData
6  from mqtt.aws_config import AWS_ENDPOINT, MQTT_CLIENT_ID
7
8  # Método asíncrono para insertar datos en la base de datos
9  async def insert_sensor_data(payload):
10     try:
11         sensor_data = EnvironmentalSensorData(**payload)
12         await sensor_data.insert()
13         print("Datos guardados en la base de datos.")
14     except Exception as e:
15         print("Error al guardar datos en la base de datos:", e)
16
17  # Método para procesar mensajes de sensores y actuadores
18  async def process_sensor_message_pub(topic, payload):
19      try:
20          print(f"Mensaje recibido desde {topic}")
21          print(f"Data: {payload}")
22
23          if topic in [
24              "environmental/sensor/pub",
25              "nutrient_solution/sensor/pub",
26              "consumption/sensor/pub",
27              "actuators/pub",
28          ]:
29              print(f"Procesando mensaje de {topic}")

```

```

30             await insert_sensor_data(payload)
31     except Exception as e:
32         print(f"Error inesperado: {e}")
33
34     # Método para procesar mensajes de control de sensores
35     def process_sensor_message_sub(topic, payload):
36         try:
37             sensor_code = payload.get("sensor_code")
38             interval = payload.get("interval")
39
40             print(f"Mensaje recibido desde {topic}")
41             print(f"Sensor: {sensor_code}, Intervalo: {interval}")
42
43             if str(interval) == "OK":
44                 print("Nuevo intervalo de tiempo establecido")
45             # else:
46             #     print("Error al establecer el intervalo de tiempo.")
47         except Exception as e:
48             print(f"Error inesperado: {e}")
49
50     class AWSMQTTClient:
51         def __init__(self):
52             CERTS_DIR = os.getenv("CERTS_DIR", "mqtt/certificates")
53             self.ROOT_CRT = os.path.join(CERTS_DIR, "root.crt")
54             self.CLIENT_CRT = os.path.join(CERTS_DIR, "client.crt")
55             self.CLIENT_KEY = os.path.join(CERTS_DIR, "client.key")
56
57             # Verificar existencia de certificados
58             for cert in [self.ROOT_CRT, self.CLIENT_CRT, self.CLIENT_KEY]:
59                 if not os.path.exists(cert):
60                     raise FileNotFoundError(f"El archivo {cert} no fue"
61                                         f"encontrado.")
62
63             # Configurar cliente MQTT
64             self.client = AWSIoTMQTTClient(MQTT_CLIENT_ID)
65             self.client.configureEndpoint(AWS_ENDPOINT, 8883)
66             self.client.configureCredentials(self.ROOT_CRT, self.
67             CLIENT_KEY, self.CLIENT_CRT)
68             self.client.configureConnectDisconnectTimeout(10)
69             self.loop = asyncio.get_event_loop()
70
71         def connect(self):
72             print("Estableciendo conexión con AWS IoT Core.")
73             self.client.connect()
74             print(" Cliente MQTT Conectado.")
75
76         def disconnect(self):
77             self.client.disconnect()
78             print("Cliente Desconectado")
79
80         def publish(self, topic, message):
81             payload = json.dumps(message) if isinstance(message, dict)
82             else str(message)
83             self.client.publish(topic, payload, 0)
84             print(f"Mensaje enviado a {topic}: {payload}")
85
86         def subscribe(self, topic, callback):
87             def wrapper(client, userdata, message):
88                 try:
89                     payload_str = message.payload.decode()
90                     payload = json.loads(payload_str)
91                     if topic in [ "environmental/sensor/sub",

```

```
89             "nutrient_solution/sensor/sub",
90             "consumption/sensor/sub",
91             "actuators/sub"]:
92         process_sensor_message_sub(topic, payload)
93     else:
94         self.loop.create_task(process_sensor_message_pub(
95             message.topic, payload))
96     except json.JSONDecodeError:
97         print("Error al decodificar el mensaje JSON.")
98     except Exception as e:
99         print(f"Error inesperado en wrapper: {e}")
100
101     self.client.subscribe(topic, 1, wrapper)
102     print(f"Suscripto a {topic}")
103
104     def unsubscribe(self, topic):
105         self.client.unsubscribe(topic)
106         print(f"Desuscripto de {topic}")
```

CÓDIGO C.1. Cliente MQTT

Bibliografía

- [1] Global Agricultural Productivity (GAP). *2016 Global Agricultural Productivity Report*. Inf. téc. Documento en línea. Global Agricultural Productivity, 2016. URL: https://globalagriculturalproductivity.org/wp-content/uploads/2019/01/2016_GAP_Report.pdf (visitado 20-03-2025).
- [2] Raquel Salazar-Moreno, Abraham Rojano-Aguilar e Irineo Lorenzo López-Cruz. «La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada». En: *Tecnología y ciencias del agua* 5.2 (2014). Documento en línea, págs. 177-183. URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000200012&lng=es&tlang=es (visitado 20-03-2025).
- [3] Misiones Online. *Horticultura en Misiones*. URL: <https://misionesonline.net/2024/06/14/horticultura-en-misiones-2/> (visitado 20-03-2025).
- [4] Primera Edición. *Misiones: la hidroponía, cada vez más presente*. Primera Edición. URL: <https://www.primeraedicion.com.ar/nota/100627758/misiones-la-hidroponia-cada-vez-mas-presente/> (visitado 20-03-2025).
- [5] Lucas A. Garibaldi et al. «Seguridad alimentaria, medio ambiente y nuestros hábitos de Consumo». En: *Ecología Austral* 28.3 (2018), págs. 572-580. URL: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2018000400011&lng=es&tlang=es (visitado 20-03-2025).
- [6] Hidropónia FIL. URL: <https://hidroponiafil.com.ar/> (visitado 20-03-2025).
- [7] Hidrosense. URL: <https://www.hidrosense.com.br/> (visitado 20-03-2025).
- [8] iPonia. URL: <https://iponia.com.br/> (visitado 20-03-2025).
- [9] Growcast. URL: <https://www.growcast.io/> (visitado 20-03-2025).
- [10] Shanna Li. «Comparative analysis of infrastructure and Ad-Hoc wireless networks». En: *ITM Web of Conferences*. Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing, Communication & Information Technologies (ICICCI 2018) 25 (2019). Article number 01009, pág. 01009. ISSN: 2271-2097. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20192501009>. URL: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/02/itmconf_icicci2018_01009.pdf.
- [11] OASIS Open. *Foundational IoT Messaging Protocol MQTT Becomes International OASIS Standard*. OASIS Open. URL: <https://www.oasis-open.org/2014/11/13/foundational-iot-messaging-protocol-mqtt-becomes-international-oasis-standard/> (visitado 25-03-2025).
- [12] Amazon Web Services. ¿Qué es MQTT? AWS. URL: <https://aws.amazon.com/es/what-is/mqtt/> (visitado 25-03-2025).
- [13] E. Rescorla. *The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3*. Internet Requests for Comments. RFC. DOI: [10.17487/RFC8446](https://doi.org/10.17487/RFC8446). URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8446>.
- [14] IBM Corporation. *Protocolos TCP/IP*. International Business Machines (IBM). URL: <https://docs.aws.amazon.com/iot/latest/developerguide/transport-security.html> (visitado 25-03-2025).
- [15] I. Fette y A. Melnikov. *The WebSocket Protocol*. Inf. téc. IETF. DOI: [10.17487/RFC6455](https://doi.org/10.17487/RFC6455). URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6455>.

- [16] Amazon Web Services. *Transport Security in AWS IoT Core*. URL: <https://docs.aws.amazon.com/iot/latest/developerguide/transport-security.html> (visitado 25-03-2025).
- [17] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. *ESP32-WROOM-32 Datasheet*. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (visitado 26-03-2025).
- [18] Bosch Sensortec. *BME280 - Combined humidity, pressure and temperature sensor*. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/> (visitado 26-03-2025).
- [19] ROHM Semiconductor. *BH1750 - Ambient Light Sensor (ALS) - Datasheet*. URL: https://www.mouser.com/catalog/specsheets/Rohm_11162017_ROHMS34826-1.pdf (visitado 26-03-2025).
- [20] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd. *MH-Z19C NDIR CO₂ Sensor - Terminal Type Manual*. URL: https://www.mouser.com/datasheet/2/1398/Soldered_108994_co2_sensor_mh_z19-3532446.pdf (visitado 26-03-2025).
- [21] DFRobot. *Datos técnicos del sensor de pH líquido PH-4502C*. URL: <https://image.dfrobot.com/image/data/SEN0161/PH%20composite%20electrode%20manual.pdf> (visitado 26-03-2025).
- [22] METTLER TOLEDO. *Sensores de Conductividad*. METTLER TOLEDO International Inc. URL: <https://www.mt.com/es/es/home/products/Process-Analytics/conductivity-resistivity-analyzers/conductivity-sensor.html> (visitado 26-03-2025).
- [23] EC Buying. *Datos técnicos del sensor de CE*. URL: https://es.aliexpress.com/item/1005003479288815.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.40.42e8194dYjUbr1&gatewayAdapt=glo2esp (visitado 26-03-2025).
- [24] Hach Company. *Sólidos (totales y disueltos)*. URL: <https://es.hach.com/parameters/solids/> (visitado 26-03-2025).
- [25] DFRobot. *Datos técnicos Sensor TDS*. URL: <https://www.dfrobot.com/product-1662.html?srsltid> (visitado 26-03-2025).
- [26] Dallas Semiconductor. *Datos técnicos Sensor DS18B20*. URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf> (visitado 26-03-2025).
- [27] Sparkfun Electronics. *Datos técnicos del sensor ultrasónico*. URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf> (visitado 26-03-2025).
- [28] Unit Electronics. *Datos técnicos del sensor de energía eléctrica PZEM-004T*. URL: <https://uelectronics.com/wp-content/uploads/2024/06/AR4189-AR4190-Medidor-de-Energia-Electrica-AC-100A-Manual.pdf> (visitado 26-03-2025).
- [29] Songle Relay. *Datos técnicos del Relay Songle*. URL: https://datasheet4u.com/pdf-down/S/R/D/SRD-12VDC-xx-x_ETC.pdf (visitado 26-03-2025).
- [30] Damien P. George y contributors. *MicroPython*. URL: <https://micropython.org/> (visitado 26-03-2025).
- [31] CTA Electronics. *MicroPython - Recursos y Guías*. URL: <https://www.ctaelectronics.com/es/micropython/> (visitado 26-03-2025).
- [32] Tiangolo. *FastAPI*. URL: <https://fastapi.tiangolo.com/> (visitado 26-03-2025).
- [33] MongoDB, Inc. *MongoDB Documentation*. URL: <https://www.mongodb.com/> (visitado 26-03-2025).
- [34] Meta (formerly Facebook) and contributors. *React: Biblioteca de JavaScript para interfaces de usuario*. URL: <https://es.react.dev/> (visitado 26-03-2025).

- [35] Docker, Inc. *Docker: Desarrollo acelerado de aplicaciones en contenedores*. URL: <https://www.docker.com/> (visitado 26-03-2025).
- [36] Amazon.com, Inc. *AWS IoT Core*. URL: <https://aws.amazon.com/es/iot-core/> (visitado 26-03-2025).
- [37] Amazon.com, Inc. *EC2, Nube de cómputo elástica de Amazon*. URL: <https://aws.amazon.com/es/ec2/> (visitado 26-03-2025).
- [38] Microsoft Corporation. *Visual Studio Code*. URL: <https://code.visualstudio.com/> (visitado 26-03-2025).
- [39] Postman, Inc. *Postman API Platform*. URL: <https://www.postman.com/> (visitado 26-03-2025).
- [40] Git. *Sistema de control de versiones Git*. URL: <https://git-scm.com/> (visitado 26-03-2025).
- [41] GitHub, Inc. *GitHub*. URL: <https://github.com/> (visitado 26-03-2025).
- [42] Robert Hammelrath. *MicroPython Driver for BME280 Sensor*. URL: <https://github.com/robert-hh/BME280> (visitado 10-12-2024).
- [43] PinkInk. *BH1750 Light Sensor Library for MicroPython*. URL: <https://github.com/PinkInk/upylib/tree/master/bh1750> (visitado 10-12-2024).
- [44] overflo23. *MH-Z19 CO₂ Sensor Library for MicroPython*. URL: https://github.com/overflo23/MH-Z19_MicroPython (visitado 10-12-2024).
- [45] vezorgoat. *TDS Sensor Library for MicroPython*. URL: <https://github.com/vezorgoat/-Raspberry-Pi-TDS-Sensor> (visitado 10-12-2024).
- [46] GreenPonik. *EC Sensor Library for MicroPython*. URL: https://github.com/GreenPonik/GreenPonik_EC_Python (visitado 10-12-2024).
- [47] vezorgoat. *TDS Sensor Library for MicroPython*. URL: <https://github.com/vezorgoat/-Raspberry-Pi-TDS-Sensor> (visitado 10-12-2024).
- [48] Robert Hammelrath. *MicroPython DS18B20 OneWire Library*. URL: https://github.com/robert-hh/Onewire_DS18X20 (visitado 10-12-2024).
- [49] Roberto Sánchez C. *MicroPython Library for HC-SR04 Ultrasonic Sensor*. URL: <https://github.com/rsc1975/micropython-hcsr04r> (visitado 10-12-2024).
- [50] Jacopo Rodeschini. *PZEM-004T Library for MicroPython*. URL: <https://github.com/jacopoRodeschini/PZEM-004T> (visitado 10-12-2024).
- [51] *FastAPI WebSockets Reference*. URL: <https://fastapi.tiangolo.com/reference/websockets/> (visitado 02-04-2025).
- [52] Amazon Web Services. *AWS IoT SDKs - Guía del desarrollador*. URL: https://docs.aws.amazon.com/es_es/iot/latest/developerguide/iot-sdks.html (visitado 02-04-2025).
- [53] Inc. MongoDB. *Motor: Asynchronous Python driver for MongoDB*. URL: <https://motor.readthedocs.io/en/stable/index.html> (visitado 01-04-2025).
- [54] Beanie. *Asynchronous Python ODM for MongoDB*. URL: <https://beanie-odm.dev/> (visitado 01-04-2025).
- [55] React-Bootstrap. *Bootstrap components built with React*. URL: <https://react-bootstrap.netlify.app/> (visitado 02-04-2025).
- [56] Socket.IO. *Real-time application framework*. URL: <https://socket.io/> (visitado 02-04-2025).