

**CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN
INTERNET DE LAS COSAS**

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

**Monitoreo y gestión remota de
controladores de clima y riego**

Autor:
Ing. Martín A. Brocca

Director:
Mg. Ing. Juan Carlos Brocca

Jurados:
A ser designado
A ser designado
A ser designado

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires,
entre junio de 2022 y mayo de 2023.*

Resumen

En la presente memoria se describe el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de control y monitoreo de clima y riego para un invernadero de tipo hogareño. El trabajo se compone de una colección de sensores y actuadores basados en hardware de bajo costo y una plataforma de software de código abierto que permite automatizar el proceso y adaptarlo a diferentes cultivos.

Para completar este proyecto se utilizaron técnicas de selección e integración de circuitos, desarrollo de firmware, evaluación de software y diseño de automatizaciones.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Resumen | I |
| 1. Introducción general | 1 |
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Motivación | 1 |
| 1.3. Estado del arte | 2 |
| 1.4. Objetivos y alcance | 5 |
| 2. Introducción específica | 7 |
| 2.1. Tecnologías de comunicación | 7 |
| 2.1.1. Protocolo MQTT | 7 |
| 2.1.2. Protocolo HTTP | 8 |
| 2.1.3. Protocolo SSL/TLS | 8 |
| 2.1.4. Tecnologías Wi-Fi | 9 |
| 2.2. Componentes de hardware utilizado | 10 |
| 2.2.1. Raspberry Pi | 10 |
| 2.2.2. Módulos ESP | 11 |
| 2.2.3. Sensores y actuadores | 12 |
| 2.3. Tecnologías de software aplicadas | 12 |
| 2.3.1. ThingsBoard | 12 |
| 2.3.2. Arduino IDE | 13 |
| 2.3.3. Telegram | 13 |
| 2.4. Requerimientos | 13 |
| 3. Diseño e implementación | 15 |
| 3.1. Arquitectura de la solución | 15 |
| 3.1.1. Detalle de los sistemas | 16 |
| 3.1.2. Protocolos de comunicación | 16 |
| 3.2. Detalle de los módulos de hardware | 17 |
| 3.2.1. Módulos sensores de humedad del suelo | 17 |
| 3.2.2. Módulos controladores de riego | 19 |
| 3.2.3. Módulos sensores de temperatura y humedad | 19 |
| 3.2.4. Módulos controladores de clima | 19 |
| 3.3. Detalle del firmware desarrollado | 19 |
| 3.3.1. Programación del microcontrolador de medición de clima | 19 |
| 3.4. Detalle del firmware desarrollado | 19 |
| 3.5. Selección y configuración del software | 19 |
| 3.6. Ciberseguridad del sistema | 19 |
| 4. Ensayos y resultados | 21 |
| 4.1. Banco de pruebas | 21 |
| 4.2. Pruebas unitarias | 21 |
| 4.3. Pruebas de sistema | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4. Comparativa con el estado de arte | 21 |
| 5. Conclusiones | 23 |
| 5.1. Resultados obtenidos | 23 |
| 5.2. Trabajo futuro | 23 |
| Bibliografía | 25 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 1.1. Invernadero hogareño | 2 |
| 1.2. Invernadero inteligente controlado por IoT | 3 |
| 1.3. Sistema de control de irrigación de Growlink | 4 |
| 1.4. Sistema multisensor de Grodan | 4 |
| 2.1. Ubicación de los protocolos de IoT en la pila TCP/IP | 7 |
| 2.2. Arquitectura del protocolo MQTT | 8 |
| 2.3. Proceso de autenticación de TLS | 9 |
| 2.4. Raspberry Pi | 10 |
| 2.5. Módulo de desarrollo ESP empleados en el proyecto | 11 |
| 2.6. Principales sensores y actuadores empleados en el invernadero | 12 |
| 3.1. Arquitectura del sistema. | 15 |
| 3.2. Protocolos de comunicación entre módulos. | 17 |
| 3.3. Conexión del sensor de humedad del suelo | 17 |
| 3.4. Módulos de sensores de humedad de suelo empleados en el proyecto | 18 |
| 3.5. Conexión del modulo de control de riego | 18 |
| 3.6. Conexión del sensor de temperatura y humedad | 19 |
| 3.7. Modulo completo en su caja protectora | 19 |
| 3.8. Conexión del modulo de control de clima | 20 |
| 3.9. Módulo de control del clima | 20 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 1.1. Análisis del estado del arte | 4 |
| 2.1. Especificaciones técnicas de la Raspberry Pi 4B | 10 |
| 2.2. Especificaciones de los microcontroladores ESP | 11 |

Capítulo 1

Introducción general

En este capítulo se introducen conceptos asociados al uso de Internet de las Cosas (IoT) en invernaderos, la motivación del cliente y cuál es el estado del arte. Asimismo, se explican los objetivos y el alcance establecidos.

1.1. Introducción

El término Internet de las Cosas (IoT) se refiere a escenarios en los que la conectividad de red y la capacidad de cómputo se extienden a objetos, sensores y artículos de uso diario que habitualmente no se consideran computadoras, permitiendo que estos dispositivos generen, intercambien y consuman datos con una mínima intervención humana [1]. IoT tiene una amplia variedad de campos de aplicación, entre los cuales se destaca la agricultura inteligente aplicada a invernaderos.

Los invernaderos modernos son sistemas de cultivo intensivo diseñados para alcanzar una alta eficiencia y productividad. Debido a su capacidad para mantener las condiciones ambientales en niveles óptimos o subóptimos, facilitan la producción de plantas a lo largo de todo el año en forma independiente a las condiciones climáticas externas [2].

La aplicación de IoT a invernaderos ha demostrado una mejora sustancial en la eficiencia de la gestión de los cultivos al mismo tiempo que ha logrado acelerar la producción y reducir sus costos [3]. Además de las ventajas mencionadas, los invernaderos pueden impactar de forma positiva a los entusiastas de la jardinería, ya que proporcionan beneficios tanto físicos como anímicos especialmente durante las temporadas invernales o de baja temperatura [4].

1.2. Motivación

El cliente de este proyecto es un jubilado reciente que decidió comenzar una nueva vida en una finca rural. Su intención es convertir la propiedad en una residencia sustentable, capaz de producir diferentes tipos de plantas: por un lado, hortalizas para abastecer el consumo familiar y por otro, especies de árboles para reforestación.

Para lograrlo con mínima intervención humana en el proceso, surge la necesidad de instalar un invernadero que automatice el control de los cultivos y además tenga la capacidad de adaptar las condiciones climáticas y de riego a los diversos tipos de plantas a sembrar.

En la figura 1.1 se observa un vivero hogareño típico de producción y dimensiones similares al propuesto.



FIGURA 1.1. Invernadero hogareño¹.

1.3. Estado del arte

Los invernaderos son estructuras diseñadas para controlar y proteger a las plantas del clima y otros factores ambientales adversos. Tradicionalmente, la temperatura, humedad e iluminación se controlaban de forma manual, lo que requería una gran cantidad de mano de obra y recursos.

Sin embargo, debido a los avances tecnológicos se ha popularizado el desarrollo de invernaderos capaces de ajustar las condiciones ambientales mediante el uso de sensores, actuadores y controladores. Estos dispositivos responden en función de configuraciones preprogramadas o a partir de datos en tiempo real.

Así el despliegue de este tipo de sistemas, denominados invernaderos inteligentes, se ha extendido enormemente en los últimos años debido a la eficiencia obtenida durante la producción y al incremento en la resiliencia de los cultivos [5].

Algunas posibles aplicaciones de IoT en viveros incluyen:

- Monitoreo y control del clima: distintos sensores miden la temperatura, humedad, iluminación y otros factores ambientales en el invernadero, para que luego diferentes actuadores automáticos ajusten el clima y creen las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas.
- Riego a demanda: la medición continua de la humedad del suelo permite activar sistemas de riego automatizados para mantener los niveles óptimos de humedad. Se logra así reducir el desperdicio de agua y disminuir los costos asociados.
- Seguimiento del crecimiento de las plantas: los sensores IoT pueden medir el crecimiento de las plantas y proporcionar información útil para la gestión del cultivo. Esto puede ayudar a identificar problemas de crecimiento temprano y a tomar medidas que eviten problemas mayores a futuro.

¹Imagen bajo licencia de <https://www.istockphoto.com/>

- Control de plagas y enfermedades: monitorear sus niveles en el vivero y activar sistemas de control cuando se detecten problemas ayuda a reducir el uso de pesticidas y otros productos químicos.
- Fertirrigación: el sistema puede administrar fertilizantes o nutrientes al suelo de forma optimizada y precisa a través del riego, en base a configuraciones acordes a la plantación en curso o mediante sensores que midan las características del agua, el pH o la conductividad eléctrica entre otras.
- Automatización de tareas: los sistemas IoT pueden automatizar muchas tareas en el vivero, como la siembra, el trasplante y la recolección de plantas. Esto puede reducir los costos de mano de obra y mejorar la eficiencia de la producción.

En la figura 1.2 se representa un invernadero inteligente con sus respectivos sensores y actuadores.



FIGURA 1.2. Invernadero inteligente controlado por IoT².

En el mercado internacional se encuentran diferentes proveedores que ofrecen soluciones para el desarrollo de invernaderos inteligentes. A la hora de comparar distintas opciones es necesario considerar los niveles de automatización requeridos, la facilidad de uso y las opciones de personalización. Adicionalmente, se debe considerar el costo y la compatibilidad con la infraestructura existente.

En la tabla 1.1 se observa una breve comparación entre los principales proveedores comerciales de servicios. Allí se observa que en general las soluciones presentadas ofrecen características similares siendo el costo el mayor diferenciador.

²Imagen adaptada de *Internet of Things Empowered Smart Greenhouse Farming* [6].

TABLA 1.1. Análisis del estado del arte.

| Funcionalidad | Argus Controls [7] | Grodan [8] | Growlink [9] |
|--------------------|--------------------|------------|--------------|
| Gestión de clima | Sí | Sí | Sí |
| Control de riego | Sí | Sí | Sí |
| Fertirrigación | Sí | Sí | Sí |
| Gestión de energía | No | Sí | Sí |
| Tamaño de mercado | Grande | Grande | Pequeño |
| Costo | \$\$\$\$ | \$\$\$ | \$\$ |

A manera de ejemplo, algunas soluciones comerciales ofrecen kits que pueden costar más de USD 200 por sensor, con gastos adicionales asociados al transporte y almacenamiento de datos. De esta forma, las redes inalámbricas de sensores pueden llegar a requerir presupuestos mayores a USD 10 000 por invernadero [10]. Las figuras 1.3 y 1.4 muestran diferentes soluciones que se encuentran en el mercado.

FIGURA 1.3. Sistema de control de irrigación de Growlink³.FIGURA 1.4. Sistema multisensor de Grodan⁴.

Una solución alternativa es utilizar kits de IoT como los provistos por Arduino

³Imagen bajo licencia de <https://www.growlink.com/>

⁴Imagen bajo licencia de <https://www.grodan.com/>

[11], una plataforma de hardware y software de código abierto. Además, es necesario contar con una comunidad de usuarios que colaboren en el proceso de desarrollo. En contrapartida, para aplicar esta solución se requieren conocimientos de programación y electrónica no siempre disponibles para el cultivador promedio [10].

1.4. Objetivos y alcance

El propósito de este trabajo es el desarrollo de una plataforma capaz de controlar el clima y riego de un invernadero mediante el uso de sensores y actuadores. Estos dispositivos se comunican con una aplicación instalada en un servidor local que administra los parámetros y las alarmas del sistema.

Durante el proyecto se construyó un prototipo completo de invernadero con los siguientes elementos:

- Aplicación para el monitoreo, control de dispositivos, gestión de alarmas y automatización.
- Control de usuarios, permisos y accesos a la plataforma.
- Interfaz gráfica para acceso y control de la plataforma.
- Análisis, investigación y elección del hardware para los sensores y actuadores.

El trabajo no incluyó:

- Instalación en sitio de los sistemas desarrollados.
- Implementación de métodos de control basados en condiciones climatológicas externas.
- Desarrollo o implementación de modelos analíticos o predictivos de las condiciones del vivero.
- Diseño o instalación de conexiones que no sean por Wi-Fi (LTE/5G).

Capítulo 2

Introducción específica

En este capítulo se describen las tecnologías y los protocolos de comunicación, los componentes de hardware, las herramientas de software y los requerimientos para la realización del proyecto.

2.1. Tecnologías de comunicación

Los principales protocolos de IoT empleados en el trabajo son: MQTT [12], HTTP [13], SSL/TLS [14] e IEEE 802.11 [15]. Según el modelo TCP/IP [16] los tres primeros se encuentran en la capa de aplicación mientras que el cuarto se ubica en la capa de enlace. La figura 2.1 esquematiza el posicionamiento en ese modelo.

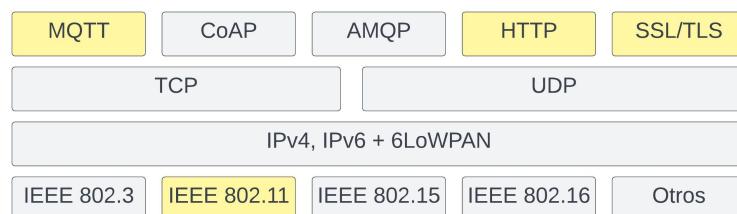


FIGURA 2.1. Ubicación de los protocolos de IoT en la pila TCP/IP¹.

2.1.1. Protocolo MQTT

MQTT fue desarrollado en 1999 con el objetivo principal de crear un protocolo muy eficiente desde el punto de vista del uso del ancho de banda y de muy bajo consumo de energía. Por estas razones es adecuado para el uso en IoT [18].

Su funcionamiento se basa en el paradigma de publicación-suscripción, que consiste en desvincular un cliente que publica un mensaje (publicador) de otros clientes que reciben el mensaje (suscriptores). Otra característica importante a mencionar es que, al ser un protocolo asincrónico, el cliente puede seguir operando mientras espera un nuevo mensaje.

Un componente principal del protocolo es el *broker* cuya función primaria es la de recibir los mensajes de los publicadores y enviarlos a los suscriptores. Para realizar esta tarea, el *broker* utiliza temas o *topics* para agrupar clientes que necesitan recibir los mismos mensajes. De esta manera el *topic* es un canal virtual que conecta a los publicadores con sus suscriptores [18].

¹Gráfico creado modificando una imagen tomada de [17]

En la figura 2.2 se observa la arquitectura del protocolo.

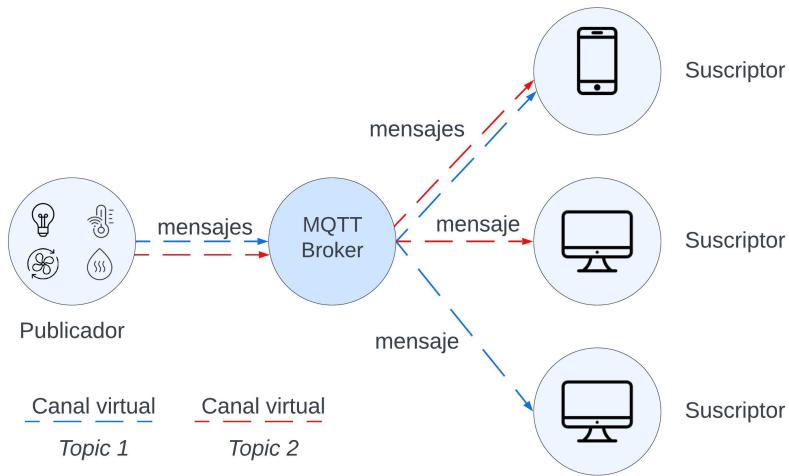


FIGURA 2.2. Arquitectura del protocolo MQTT.

2.1.2. Protocolo HTTP

El *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP)[\[19\]](#) es un protocolo utilizado en la Web para el desarrollo de aplicaciones y está basado en el paradigma cliente-servidor. Aquí el cliente emplea un agente intermediario (por lo general un *browser*) para realizar un pedido de información y el servidor proporciona una respuesta. Esto se conoce con el nombre de modelo *request/response*.

HTTP es un protocolo que no guarda información de estado, esto significa que el servidor no es capaz de reconocer la relación entre múltiples pedidos de un mismo usuario [\[20\]](#).

En la actualidad, HTTP se utiliza en conjunto con la arquitectura REST (*Representational State Transfer*) [\[21\]](#) para facilitar la interacción entre distintas entidades sobre servicios basados en red. Esta asociación permite que los dispositivos interactúen mediante funciones estándares de tipo CRUD (*create, read, update, delete*) [\[22\]](#). Dichas funciones a su vez se traducen en los métodos HTTP POST, GET, PUT y DELETE respectivamente [\[23\]](#).

2.1.3. Protocolo SSL/TLS

Secure Socket Layer/Transport Layer Security (SSL/TLS) es un protocolo criptográfico que proporciona seguridad de extremo a extremo de los datos enviados entre aplicaciones a través de Internet. TLS evolucionó a partir de *Secure Socket Layer* (SSL), que fue desarrollado originalmente por Netscape Communications Corporation en 1994 para proteger las sesiones web.

Cabe señalar que TLS no protege los datos en los sistemas finales, simplemente garantiza la entrega segura de datos a través de Internet y al mismo tiempo evita posibles escuchas y/o alteraciones del contenido. TLS normalmente se implementa sobre TCP [\[24\]](#) para cifrar los protocolos de la capa de aplicación, como por ejemplo HTTP.

TLS utiliza una combinación de criptografía simétrica y asimétrica que proporciona un buen compromiso entre rendimiento y seguridad al momento de transmitir la información [25]. Para mayor protección es deseable que un cliente que se conecta a un servidor pueda validar la veracidad de la clave pública ofrecida por este. Normalmente dicha verificación se lleva a cabo por medio de un certificado digital X.509 [26] emitido por un tercero de confianza denominado Autoridad Certificadora (CA). Dicha CA está encargada de afirmar la autenticidad de la clave pública. En los casos en los que no se dispone de una CA, un servidor puede usar un certificado autofirmado en el que el cliente debe confiar explícitamente [25].

En la figura 2.3 se detalla el esquema de autenticación y verificación con certificados e inicio de una conexión segura.

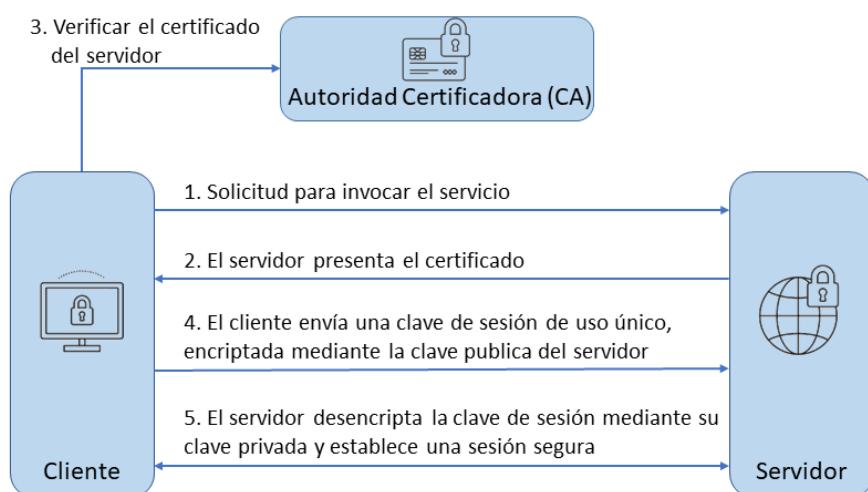


FIGURA 2.3. Proceso de autenticación de TLS².

2.1.4. Tecnologías Wi-Fi

El estándar IEEE 802.11 para redes inalámbricas de área local (WLAN) es conocido comercialmente como Wi-Fi y presenta dos modos de operación [27]:

- Infraestructura: uno o más *access points* (AP) actúan como puente entre la red cableada y la red inalámbrica. Todas las comunicaciones entre los dispositivos conectados a la red se realizan a través de los APs.
- Ad-hoc: cada nodo puede realizar una conexión directa con otro, sin necesidad de un AP central. En este caso, los nodos se organizan en una red donde todos son capaces de enrutar los paquetes.

²Gráfico creado en base a una imagen tomada de <http://www.herongyang.com/PKI/HTTPS-Communication-Data-Encryption.html>

2.2. Componentes de hardware utilizado

2.2.1. Raspberry Pi

Se denomina así a una serie de computadoras monoplaca o computadoras de placa simple (SBC, por *Single Board Computer*) de bajo costo desarrolladas por la Raspberry Pi Foundation [28]. Una de sus principales características es proveer un conjunto de pines de GPIO (*general purpose input/output*) que permiten controlar componentes electrónicos y otros dispositivos en el ámbito de Internet de las Cosas. A pesar de su reducido tamaño, la Raspberry Pi ofrece una capacidad de procesamiento comparable a una computadora de escritorio y es por ello que su uso se ha expandido en proyectos que incluyen domótica, *edge computing* y aplicaciones industriales [29].

En la figura 2.4 se muestra una Raspberry Pi modelo 4B similar a la utilizada en el trabajo y en la tabla 2.1 se listan sus principales características:

TABLA 2.1. Especificaciones técnicas de la Raspberry Pi 4B.

| Categoría | Especificación[30] |
|--------------------------|---|
| Procesador | Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64 bits SoC @ 1,8 GHz |
| Memoria SDRAM | 1, 2, 4 u 8 GB LPDDR4-3200 |
| Wi-Fi | 2,4 GHz y 5,0 GHz IEEE 802.11ac |
| Bluetooth | 5.0 y BLE |
| Ethernet | Gigabit, con soporte opcional para POE |
| USB | 2 puertos 3.0 y 2 puertos 2.0 |
| GPIO | Conector de 40 pines |
| HDMI | 2 puertos micro-HDMI |
| Alimentación | 5 V USB y GPIO |
| Temperatura de operación | 0 °C a 50 °C |



FIGURA 2.4. Raspberry Pi³.

2.2.2. Módulos ESP

ESP es una familia de microcontroladores de baja potencia desarrollada por la empresa china Espressif. Estos chips cuentan con una amplia variedad de usos en IoT tanto en el ámbito profesional o industrial como en el de los aficionados [31] [32].

En la tabla 2.2 se observa una comparación entre los modelos ESP32-WROOM-32 y ESP8266 utilizados en este trabajo.

TABLA 2.2. Especificaciones de los microcontroladores ESP.

| Características | ESP32 [31] | ESP8266 [32] |
|--------------------------|------------------------|------------------------|
| Procesador | 2 x Xtensa 32 bits LX6 | Tensilica L106 32 bits |
| Memoria ROM | 448 KB | No dispone |
| Memoria SRAM | 520 KB | 160 KB |
| Wi-Fi | 802.11 b/g/n | 802.11 b/g/n |
| Bluetooth | 4.2, BLE | No dispone |
| GPIOs | 34 pines | 17 pines |
| Consumo normal | ~500 mA | ~80 mA |
| Temperatura de operación | -40 °C a 85 °C | -40 °C a 125 °C |
| Sistema operativo | freeRTOS | freeRTOS |
| Costo en USD | \$ 6 a \$ 12 | \$ 3 a \$ 6 |

El modelo ESP8266 es una versión anterior y con menores prestaciones que el ESP32 y constituye una opción económica para soluciones en las que los requerimientos de conectividad, cantidad de periféricos y demandas computacionales no son tan exigentes.

En la figura 2.5a se observa un módulo de desarrollo de la familia ESP32, mientras que el ESP8266 puede verse en la figura 2.5b.



(A) Módulo de desarrollo ESP32.



(B) Módulo de desarrollo ESP8266.

FIGURA 2.5. Módulo de desarrollo ESP empleados en el proyecto.

³Imagen tomada de <https://datasheets.raspberrypi.com/>.

2.2.3. Sensores y actuadores

Los principales sensores y actuadores empleados en el sistema del invernadero inteligente son los siguientes:

- DHT22: módulo básico y económico para determinar los valores de temperatura y humedad en forma digital. Utiliza un sensor de humedad capacitivo y un termistor para medir el aire circundante y entrega una señal digital en el pin de datos de acuerdo al valor calculado. Funciona con una alimentación de 3,3 a 6 VDC y su rango de medición es de -40 °C a 80 °C y de 0 a 100 % de humedad relativa [33].
- Sensor capacitivo de humedad del suelo: módulo analógico compuesto de un material resistente a la corrosión que mide la humedad del suelo indirectamente por medio de la capacidad observada. Opera con una alimentación de 3,3 a 5,5 VDC y entrega un valor de tensión que varía entre 0V para un suelo seco a aproximadamente 3,15 V en un suelo completamente húmedo [34].
- Válvula solenoide de dos vías: dispositivo neumático para controlar el flujo de líquidos o gases que se acciona eléctricamente. Para poder operarlo, se utiliza un relé que es un instrumento electromecánico que actúa como interruptor controlado por un circuito eléctrico [35][36].

La figura 2.6 muestra imágenes de los componentes listados previamente.



FIGURA 2.6. Principales sensores y actuadores empleados en el invernadero.

2.3. Tecnologías de software aplicadas

2.3.1. ThingsBoard

ThingsBoard es una plataforma de código abierto que permite el desarrollo, administración y expansión de proyectos de IoT. Esta aplicación permite la gestión de las comunicaciones, el almacenamiento y la visualización de los datos que provienen de los sensores u otros dispositivos que forman parte del sistema [37]. Se ofrece en las siguientes versiones:

- Professional Edition: es la versión comercial, con varios tipos de licenciamiento y costos según sea el sistema a implementar. Esta edición posee soporte técnico, ilimitada cantidad de dispositivos a conectar y soporte para almacenamiento híbrido entre otras funcionalidades.

- Cloud: similar a la edición profesional, pero alojada en la nube de Things-Board. En este caso el proveedor se encarga del manejo de los componentes de la plataforma.
- Community edition: es la edición libre de licenciamientos y la que se utilizó en este trabajo. Si bien no tiene limitaciones en cuanto a la cantidad de dispositivos a conectar, carece de ciertas funcionalidades como por ejemplo la descarga de datos de dispositivos desde la interfaz web o la ejecución programada de tareas (*scheduler*).

2.3.2. Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) es un software de código abierto que se utiliza para escribir y cargar código a placas Arduino. Sin embargo por medio de la instalación de paquetes de expansión, el IDE soporta hardware de terceros entre los que encuentran las módulos ESP32/ESP8266 [38] empleados en este proyecto.

El código de los programas se realiza en lenguaje C o C++ y los archivos resultantes se denominan *sketches*. Estos son compilados y cargados en las placas desde el mismo IDE [39].

Este software es una herramienta fácil de utilizar tanto por usuarios experimentados como por principiantes. Es frecuentemente empleada por aquellos que se inician en la programación electrónica y la robótica o al momento de construir prototipos interactivos [40].

2.3.3. Telegram

Telegram es una aplicación de mensajería multiplataforma rápida, simple y gratuita. Está basada en la nube y cuenta con sincronización constante, lo que significa que se puede acceder a los mensajes desde diferentes dispositivos simultáneamente.

Tanto el código de los clientes de Telegram como el de su API son abiertos, lo que permite crear otras aplicaciones a partir de ellos. Adicionalmente cuenta con una API para *bots* que facilita la implementación de herramientas basadas en Telegram, la integración de servicios o la realización pagos [41].

2.4. Requerimientos

A continuación se listan los principales requerimientos funcionales, no funcionales y de documentación del proyecto:

- Requerimientos funcionales:
 1. El estado del sistema podrá ser consultado desde Internet.
 2. La aplicación soportará múltiples usuarios de forma concurrente.
 3. La aplicación permitirá crear roles de usuarios con diferentes permisos.
- Requerimientos no funcionales:
 1. El rango de tensión de alimentación de los nodos será de 3,3 a 5 VDC.

2. El sistema de riego operará con una tensión de alimentación de 12 VDC.
 3. El sistema estará basado en software de código abierto.
 4. El firmware deberá desarrollarse en plataformas de código abierto.
 5. El trabajo se realizará sobre dispositivos de bajo costo y fácil reposición.
 6. Los datos se almacenarán localmente.
 7. La aplicación soportará MQTT.
 8. Los sensores de humedad del suelo tendrán una protección IP65 [42].
- Requerimientos de documentación:
 1. Los manuales y/o guías estarán redactados en inglés.

Capítulo 3

Diseño e implementación

En este capítulo se presentan los detalles del diseño de los nodos sensores y actuadores que conforman el trabajo, como así también los de la implementación de la aplicación Thingsboard.

3.1. Arquitectura de la solución

Para la implementación del prototipo propuesto en el trabajo se requirió la construcción de diferentes subsistemas encargados de las múltiples funciones dentro del invernadero inteligente. En forma general, cada uno de estos módulos opera en forma independiente del resto y se comunican por medio de una red inalámbrica con una aplicación central.

Para garantizar el acceso de los usuarios desde Internet se desarrolló una interfaz segura que no involucra costos al cliente y no requiere cambios de configuración en su red hogareña.

En la figura 3.1 se observa la arquitectura diseñada con los subsistemas implementados.

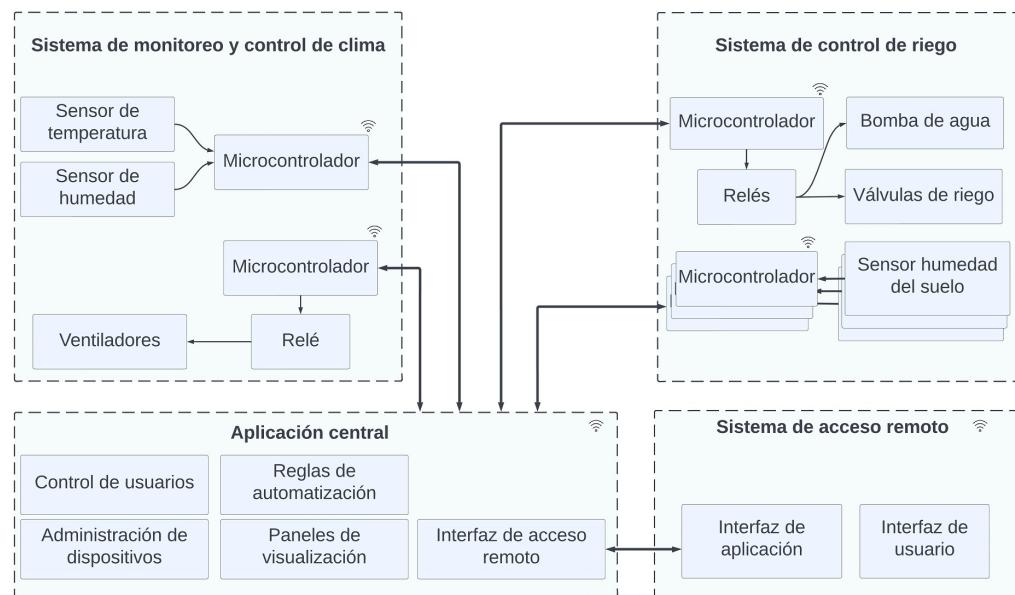


FIGURA 3.1. Arquitectura del sistema.

3.1.1. Detalle de los sistemas

A continuación se detallan los subsistemas implementados en el trabajo:

- Sistema de monitoreo y control de clima: es responsable de medir la temperatura y humedad ambiente en el invernadero y enviar estas variables a la aplicación central. En base a los valores recibidos, la aplicación determina si es necesario enviar la señal de encender los ventiladores al microcontrolador correspondiente, y generar una alerta de aviso a los usuarios.
- Sistema de control de riego: está compuesto por múltiples sensores de humedad de suelo con sus respectivos microcontroladores que se distribuyen conforme a los circuitos de riego configurados. Los sensores proceden a enviar las mediciones a la aplicación central en donde se procesan los valores y en caso de ser necesario se dispara la señal de encendido a la válvula del circuito que corresponda, y luego a la bomba de agua para así comenzar el riego. Al mismo tiempo, el usuario recibe un alerta de accionamiento de la bomba.
- Aplicación Central: constituye el cerebro del invernadero y es la encargada de almacenar los parámetros de configuración de los diversos sensores y actuadores, procesar los mensajes recibidos, disparar acciones y alertas y visualizar el estado general.
- Sistema de acceso remoto: permite el acceso de usuarios a reportes del sistema en forma segura desde Internet.

3.1.2. Protocolos de comunicación

En esta sección se describe cómo se comunican los sistemas con la aplicación central y los protocolos usado en cada caso.

Si bien tanto los módulos de hardware como el software soportan una gran variedad de protocolos, basados en los requerimientos del proyecto, se buscó implementar MQTT.

En la figura 3.2 se ilustran los diferentes protocolos usados y en la tabla los diferentes usos.

A continuación se describen las comunicaciones principales entre sistemas:

- Sistema de monitoreo y control de clima: las comunicaciones desde y hasta este sistema son con la aplicación central. El módulo sensor envía las mediciones realizadas por medio de MQTT. En el caso que las variables del clima requieran una acción, la aplicación central comanda el encendido de los ventiladores por medio de un mensaje enviado por RPC sobre MQTT.
- Sistema de control de riego: las comunicaciones desde y hasta este sistemas son con la aplicación central. El módulo sensor realiza dos conexiones, una para el envío de las mediciones, y otra para recibir variables de configuración, como por ejemplo: el período de *deep sleep*. Debido a limitaciones en la configuración de la persistencia de los mensajes en las colas de MQTT, se optó por utilizar llamadas HTTP POST y HTTP GET para realizar estas comunicaciones. Al igual que en el control de clima, la aplicación central iniciará el riego por medio de mensajes RCP sobre MQTT hacia el controlador de la bomba y de las válvulas.

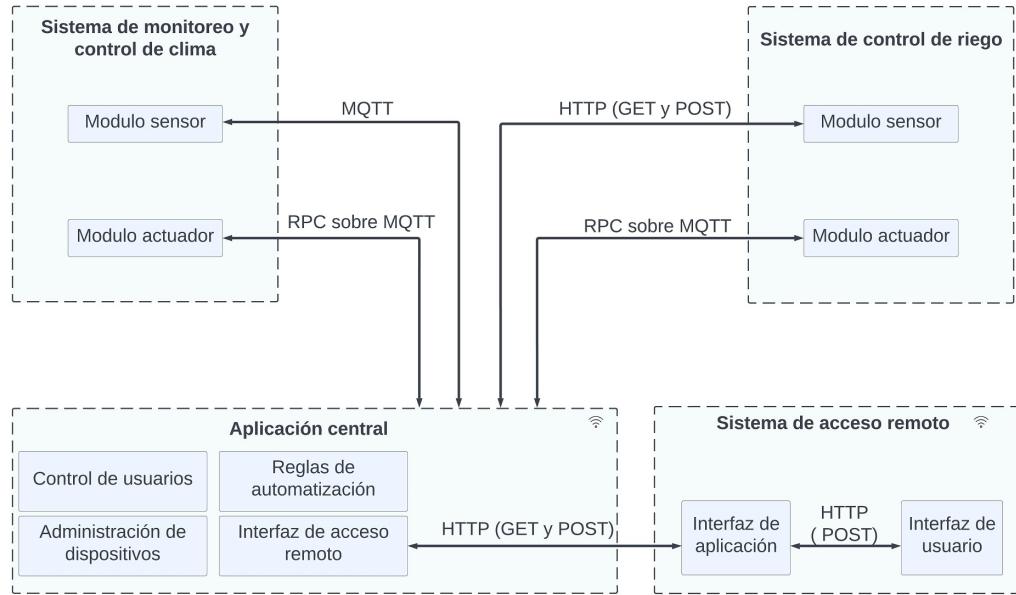


FIGURA 3.2. Protocolos de comunicación entre módulos.

- Sistema de acceso remoto: la interfaz se comunica con la aplicación por medio de pedidos de HTTP GET y POST para solicitar el reporte de estado de los diferentes componentes. Luego, estos son enviado hacia la interfaz de usuario por medio de un pedido HTTP POST.

3.2. Detalle de los módulos de hardware

3.2.1. Módulos sensores de humedad del suelo

Están compuestos por un ESP8266 y uno o dos sensores capacitivos de humedad del suelo lo que permite una mayor libertad a la hora de configurar los circuitos de riego.

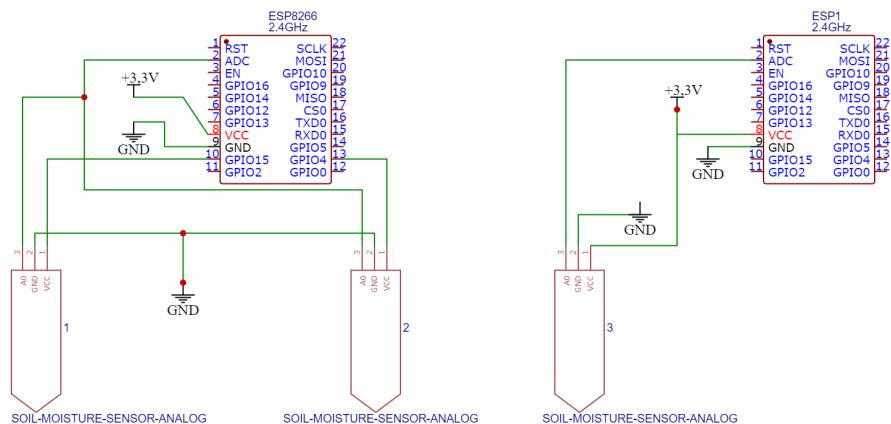


FIGURA 3.3. Conexión del sensor de humedad del suelo.

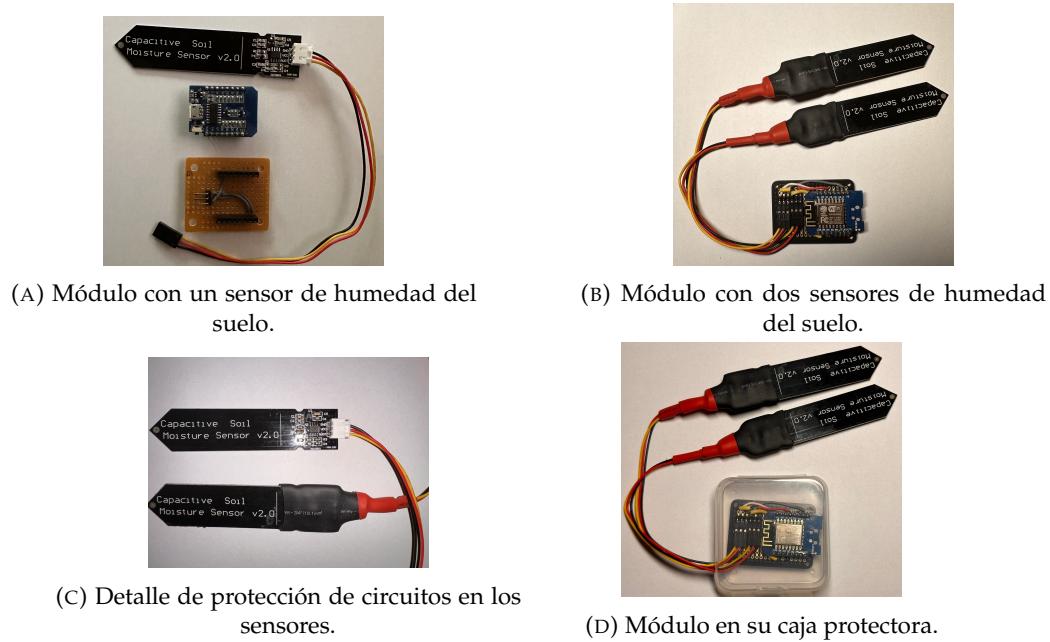


FIGURA 3.4. Módulo de sensores de humedad de suelo empleados en el proyecto.

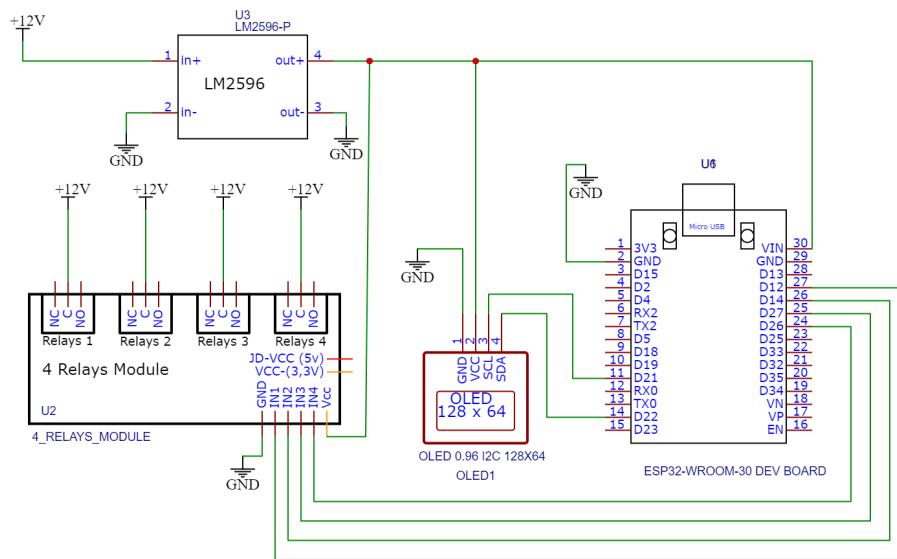


FIGURA 3.5. Conexión del modulo de control de riego.

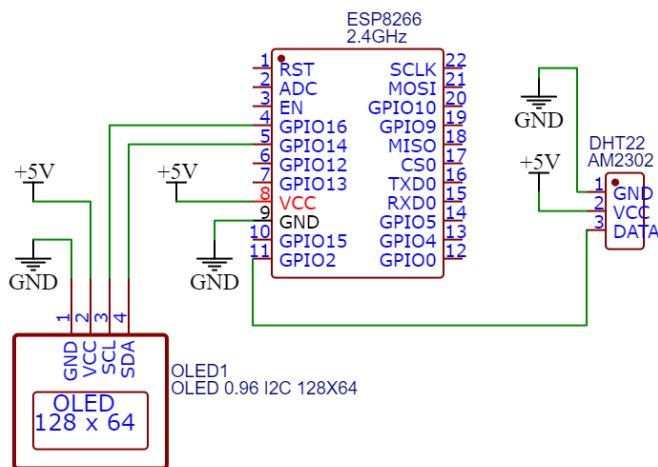


FIGURA 3.6. Conexión del sensor de temperatura y humedad .



FIGURA 3.7. Modulo completo en su caja protectora.

3.2.2. Módulos controladores de riego

3.2.3. Módulos sensores de temperatura y humedad

3.2.4. Módulos controladores de clima

3.3. Detalle del firmware desarrollado

3.3.1. Programación del microcontrolador de medición de clima

3.4. Detalle del firmware desarrollado

3.5. Selección y configuración del software

3.6. Ciberseguridad del sistema

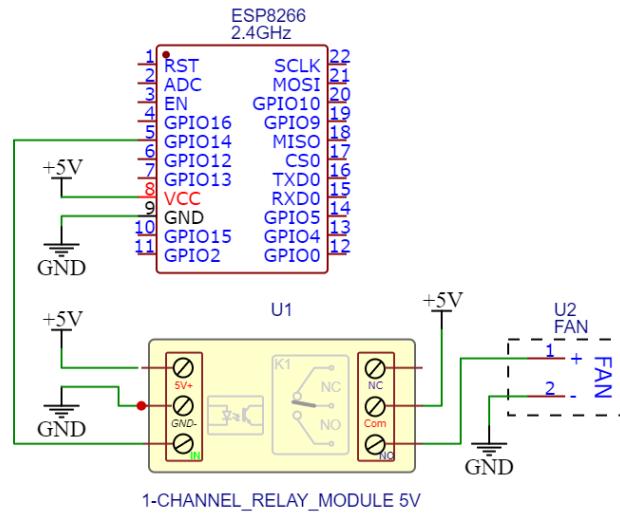
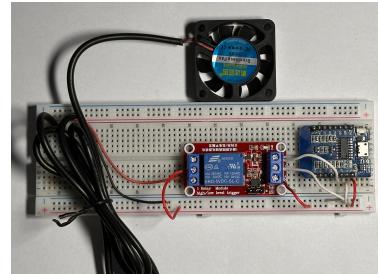


FIGURA 3.8. Conexión del modulo de control de clima.



(A) Detalle de los componentes.



(B) Configuración del módulo.



(C) Módulo finalizado en su caja protectora.

FIGURA 3.9. Módulo de control del clima.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

En este capítulo se explica la metodología de pruebas aplicada tanto a los componentes individuales como al sistema implementado, finalizando con una comparativa con el estado del arte.

- 4.1. Banco de pruebas**
- 4.2. Pruebas unitarias**
- 4.3. Pruebas de sistema**
- 4.4. Comparativa con el estado de arte**

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se muestran las conclusiones sobre el trabajo realizado. A su vez se presentan algunas modificaciones o mejoras como posible trabajo futuro

5.1. Resultados obtenidos

5.2. Trabajo futuro

Acá se indica cómo se podría continuar el trabajo más adelante.

Bibliografía

- [1] Scott Eldridge y Lyman Chapin Karen Rose. «The Internet of Things: An Overview». En: (2015).
- [2] Krishna Nemali. «History of Controlled Environment Horticulture: Greenhouses». En: *HortScience* 57.2 (2022), págs. 239 -246. DOI: [10.21273/HORTSCI16160-21](https://doi.org/10.21273/HORTSCI16160-21). URL: <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/57/2/article-p239.xml>.
- [3] Chrysanthos Maraveas y Thomas Bartzanas. «Aplicación de internet de las cosas (IoT) para entornos de invernadero optimizados». En: *Magna Scientia UCEVA* 2 (dic. de 2022), págs. 253-268. DOI: [10.54502/msuceva.v2n2a11](https://doi.org/10.54502/msuceva.v2n2a11).
- [4] John W. Bartok. *Greenhouses for Homeowners and Gardeners*. Natural Resource, Agriculture, y Engineering Service (NRAES), 2000-06.
- [5] Intel. *¿Qué son los invernaderos inteligentes?* <https://agrofacto.com/invernaderos-inteligentes/m>. 2022. (Visitado 20-03-2023).
- [6] Rakiba Rayhana, Gaozhi Xiao y Zheng Liu. «Internet of Things Empowered Smart Greenhouse Farming». En: *IEEE Journal of Radio Frequency Identification* 4.3 (2020), págs. 195-211. DOI: [10.1109/JRFID.2020.2984391](https://doi.org/10.1109/JRFID.2020.2984391).
- [7] Argus Controls. <https://arguscontrols.com/>. (Visitado 20-03-2023).
- [8] Grodan. <https://www.grodan.com/>. (Visitado 20-03-2023).
- [9] Growlink. <https://www.growlink.com/>. (Visitado 20-03-2023).
- [10] Chet Udell y Alan Dennis Lloyd Nackley. <https://diggermagazine.com/the-smart-greenhouse/>. 2020. (Visitado 20-03-2023).
- [11] Arduino. <https://www.arduino.cc/>. (Visitado 20-03-2023).
- [12] OASIS. *MQTT Version 5.0*. Oasis Standard. URL: [\\url{https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html}](https://url{https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html}) (visitado 20-03-2023).
- [13] Inc. Sun Microsystems. *RPC: Remote Procedure Call Protocol Specification Version 2*. RFC 1057. RFC Editor, 1988. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1057>.
- [14] E. Rescorla T. Dierks. *The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.2*. RFC. 2008. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5280>.
- [15] C. Shao et al. *IEEE 802.11 Medium Access Control (MAC) Profile for Control and Provisioning of Wireless Access Points (CAPWAP)*. RFC. URL: [\\url{https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7494.html}](https://url{https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7494.html}) (visitado 20-03-2023).
- [16] T. Socolofsky et al. *A TCP/IP Tutorial*. RFC 1180. RFC Editor, 1991. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1180>.
- [17] Nitin Naik. «Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP». En: *2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*. 2017, págs. 1-7. DOI: [10.1109/SysEng.2017.8088251](https://doi.org/10.1109/SysEng.2017.8088251).

- [18] www.survivingwithandroid.com.
<https://www.survivingwithandroid.com/mqtt-protocol-tutorial/>. (Visitado 20-03-2023).
- [19] The Internet Society. *Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1*. RFC. URL: \url{https://www.ietf.org/rfc/rfc2616.txt} (visitado 20-03-2023).
- [20] <https://www.oreilly.com/library/view/javaserver-pages-3rd/0596005636/ch02s01.html>. (Visitado 20-03-2023).
- [21] Roy Thomas Fielding. *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures*. Inf. téc. 2000. Cap. Chapter 5: Representational State Transfer (REST).
- [22] Jasenka Dizdarević et al. «A Survey of Communication Protocols for Internet of Things and Related Challenges of Fog and Cloud Computing Integration». En: *ACM Comput. Surv.* 51.6 (ene. de 2019). ISSN: 0360-0300. DOI: [10.1145/3292674](https://doi.org/10.1145/3292674). URL: <https://doi.org/10.1145/3292674>.
- [23] Dimitrios Glaroudis, Athanasios Iossifides y Periklis Chatzimisios. «Survey, comparison and research challenges of IoT application protocols for smart farming». En: *Computer Networks* 168 (2020), pág. 107037. ISSN: 1389-1286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.107037>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128619306942>.
- [24] J. Postel. *Transmission Control Protocol*. RFC 793. Internet Engineering Task Force, 1981, pág. 85. URL: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc793.txt>.
- [25] Internet Society. «TLS Basics». En: (). URL: <https://www.internetsociety.org/deploy360/tls/basics/>.
- [26] D. Cooper et. al. *Internet X.509 Public Key Infrastructure Certificate and Certificate Revocation List (CRL) Profile*. RFC. 2008. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5280>.
- [27] Shanna L. «Comparative Analysis of Infrastructure and Ad-Hoc Wireless Networks». En: *ITM Web of Conferences* 25, 01009 (2019).
- [28] https://es.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi. (Visitado 20-03-2023).
- [29] <https://opensource.com/resources/raspberry-pi>. (Visitado 20-03-2023).
- [30] *Raspberry Pi Computer Model B*. Datasheet. Raspberry Pi. Ene. de 2021. URL: \url{https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf}.
- [31] *ESP32 Series*. Datasheet. V4.2. Espressif. Ene. de 2023.
- [32] *ESP8266EX*. Datasheet. V6.9. Espressif. Feb. de 2023.
- [33] *Digital output relative humidity and temperature sensor/module*. DHT22. Aosong Electronics Co.,Ltd. URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>.
- [34] <https://smartbitbn.com/product/soil-humidity-sensor/>. (Visitado 20-03-2023).
- [35] <https://www.amazon.com/dp/B07BW21Z5M/>. (Visitado 20-03-2023).
- [36] <https://es.wikipedia.org/wiki/Rel%C3%A1y>. (Visitado 20-03-2023).
- [37] <https://thingsboard.io/docs/getting-started-guides/what-is-thingsboard/>. (Visitado 20-03-2023).
- [38] *Soporte de Arduino IDE para hardware de terceros*. URL: <https://github.com/per1234/ino-hardware-package-list/blob/master/ino-hardware-package-list.tsv>.
- [39] *Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1*. URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics>.
- [40] *What is arduino software (IDE), and how use it ?* URL: <https://andprof.com/tools/what-is-arduino-software-ide-and-how-use-it/>.

- [41] *Telegram - Preguntas Frecuentes*. URL: <https://telegram.org/faq?setln=es#p-que-es-telegram-que-puedo-hacer-aqui>.
- [42] <https://www.iec.ch/ip-ratings>. (Visitado 20-03-2023).