

**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	9
2.2.1. Raspberry Pi	9
2.2.2. Módulos ESP	10
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. Componentes del sistema	15
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	18
3.2.2. Módulo controlador del riego	19
3.2.3. Módulo sensor de temperatura y humedad	20
3.2.4. Módulo controlador de clima	21
3.3. Desarrollo del firmware	23
3.3.1. Firmware de los módulos sensores de humedad del suelo	23
3.3.2. Firmware del módulo controlador del riego	25
3.3.3. Firmware de los módulos sensores de temperatura y humedad	26
3.3.4. Firmware del módulo de control de clima	27
3.4. Selección y configuración del software	28
3.4.1. Servidor de la aplicación	29
3.4.2. Configuración de la aplicación	29

3.4.3. Manejos de dispositivos	29
3.4.4. Reglas de automatización	29
3.5. Ciberseguridad del sistema	30
4. Ensayos y resultados	31
4.1. Banco de pruebas	31
4.2. Pruebas unitarias	31
4.3. Pruebas de sistema	31
4.4. Comparativa con el estado de arte	31
5. Conclusiones	33
5.1. Resultados obtenidos	33
5.2. Trabajo futuro	33
Bibliografía	35

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. Módulos de desarrollo ESP empleados en el proyecto	11
2.6. Principales sensores y actuadores empleados en el invernadero	12
3.1. Arquitectura del sistema.	16
3.2. Protocolos de comunicación entre módulos.	17
3.3. Esquema de conexión de módulos sensores de humedad del suelo	18
3.4. Módulos de sensores de humedad del suelo empleados en el pro- yecto	19
3.5. Conexión del módulo de control de riego	20
3.6. Módulo de control de riego	20
3.7. Conexión del sensor de temperatura y humedad	21
3.8. Módulo completo en su caja protectora	21
3.9. Conexión del módulo de control de clima	22
3.10. Módulo de control del clima	22
3.11. Diagrama de flujo del firmware de los módulos sensores de hume- dad del suelo	24
3.12. Diagrama de flujo del firmware del módulo de control de riego	26
3.13. Diagrama de flujo del firmware del módulo de control de riego - Control de válvulas	26
3.14. Diagrama de flujo del firmware del módulo de control de riego - Control de bomba	27
3.15. Diagrama de flujo del firmware del módulos sensores de tempera- tura y humedad	28
3.16. Diagrama de flujo del firmware del módulo de control de clima	28
3.17. Regla de automatización para el control de riego	30

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. Esto se esquematiza en la figura 2.1.

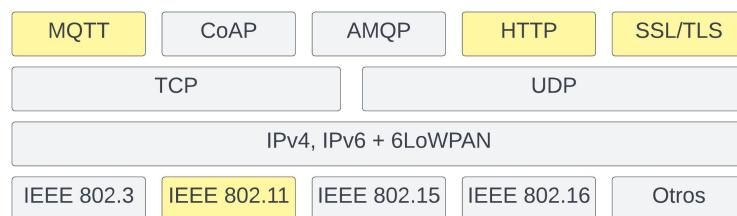


FIGURA 2.1. Ubicación de los protocolos de IoT en la pila TCP/IP.

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 [17].

Su funcionamiento se basa en el paradigma de publicación-suscripción [18], el cual 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 [17].

En la figura 2.2 se observa la arquitectura del protocolo.

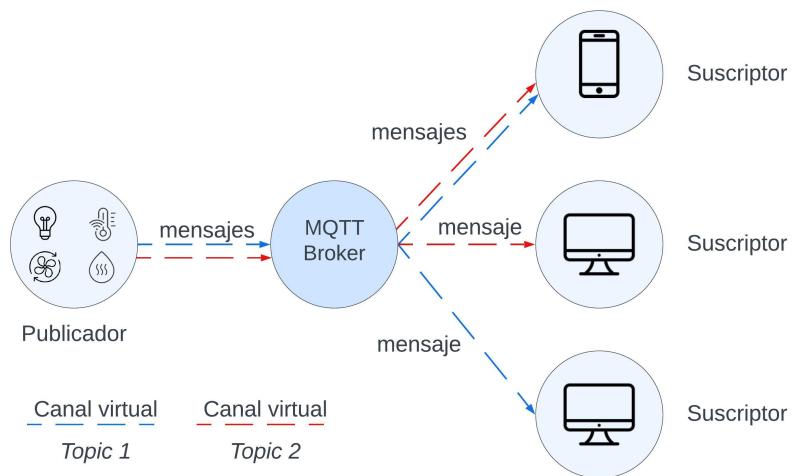


FIGURA 2.2. Arquitectura del protocolo MQTT.

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.

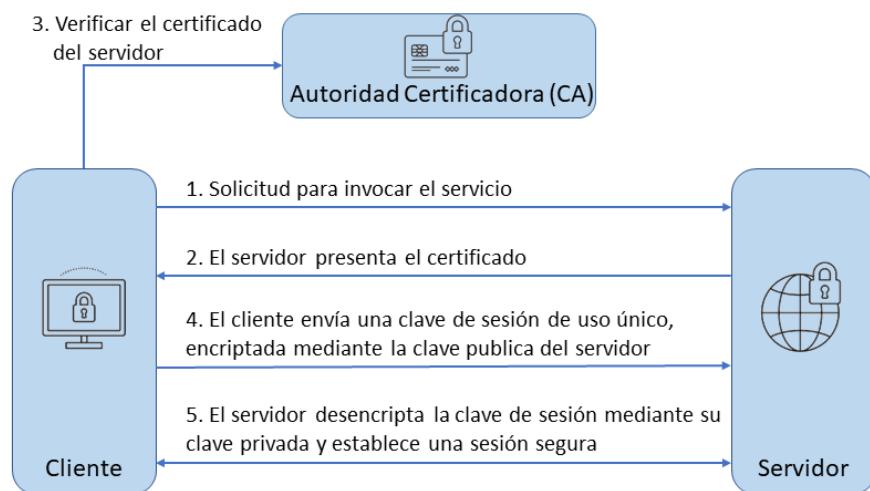


FIGURA 2.3. Proceso de autenticación de TLS¹.

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.

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

¹Gráfico creado en base a una imagen tomada de <http://www.herongyang.com/PKI/HTTPS-Communication-Data-Encryption.html>

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 Pi².

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

²Imagen tomada de <https://datasheets.raspberrypi.com/>.

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. 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. Módulos de desarrollo ESP empleados en el proyecto.

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 capacitancia observada. Opera con una alimentación de 3,3 a 5,5 VDC y entrega un valor de tensión que varía entre 0 V 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: se encuentra bajo licencia Apache 2.0 [38] y es 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 [39] 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 [40].

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 [41].

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 tienen licencias abiertas, 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 [42].

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 [43].
- 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 del software seleccionado.

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. Cada uno de ellos opera en forma independiente del resto y se comunican con una aplicación central mediante una red inalámbrica. Para garantizar el acceso de los usuarios desde Internet se desarrolló una interfaz de acceso remoto.

3.1.1. Componentes del sistema

En la figura 3.1 se observa el diagrama en bloques de la arquitectura diseñada, que está compuesta por los siguientes elementos:

- Sistema de monitoreo y control de clima, formado por dos módulos:
 - Sensores de temperatura y humedad con sus correspondientes microcontroladores.
 - Unidad de control de temperatura y humedad comprendida por un microcontrolador, relé y ventiladores.

Los sensores miden la temperatura y humedad ambiente en el invernadero y envían estos valores a la aplicación central por medio del microcontrolador. De acuerdo con los datos recibidos, la aplicación determina si es necesario emitir una señal para que la unidad de control encienda los ventiladores.

- Sistema de control de riego, dividido en dos partes:
 - Conjunto de sensores de humedad de suelo con sus respectivos microcontroladores.
 - Unidad de control de riego constituida por un microcontrolador, relés, bomba de agua y válvulas.

Los sensores envían las mediciones a la aplicación central que se encarga de procesarlas. En caso de ser necesario, se disparan las señales de encendido a través de la unidad de control. Primero se activa la válvula que corresponda

y luego se enciende la bomba de agua para comenzar el riego. El orden de estas actividades es importante para evitar daños en la bomba o las cañerías.

- 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 a los usuarios obtener reportes del sistema en forma segura desde Internet.

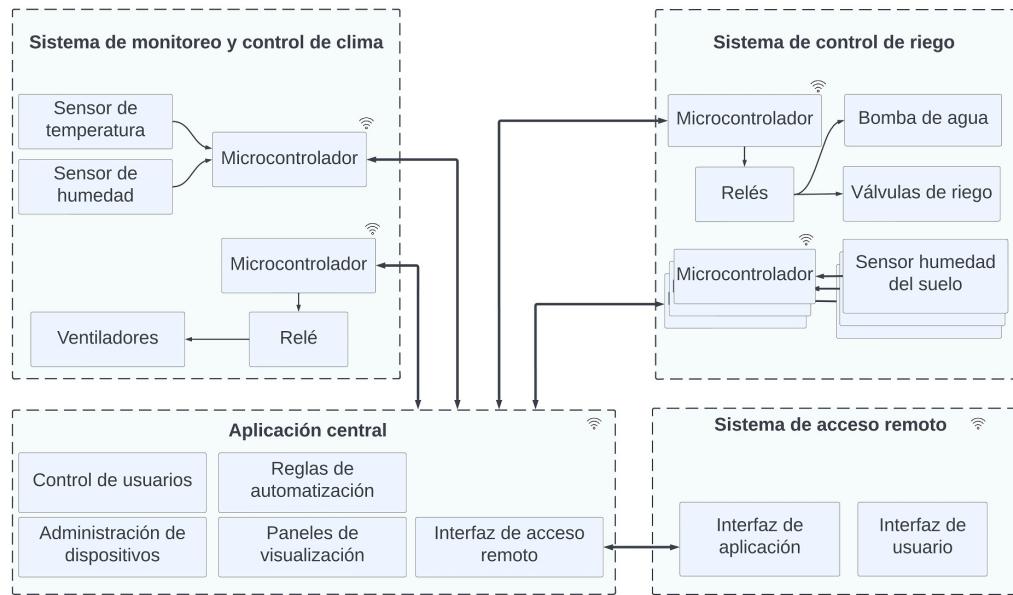


FIGURA 3.1. Arquitectura del sistema.

3.1.2. Protocolos de comunicación

En esta sección se describe cómo se comunican los sistemas con la aplicación central y los protocolos usados en cada caso. En la figura 3.2 se aprecia un esquema simplificado que ilustra dichas interacciones.

Si bien los módulos de hardware y el software soportan una gran variedad de protocolos, se implementó MQTT en la mayoría de los casos conforme a los requerimientos. En algunas situaciones donde esto no fue técnicamente posible, se utilizó HTTP. Adicionalmente, para garantizar la seguridad de las comunicaciones, se incorporó un certificado autofirmado TLS en el servidor.

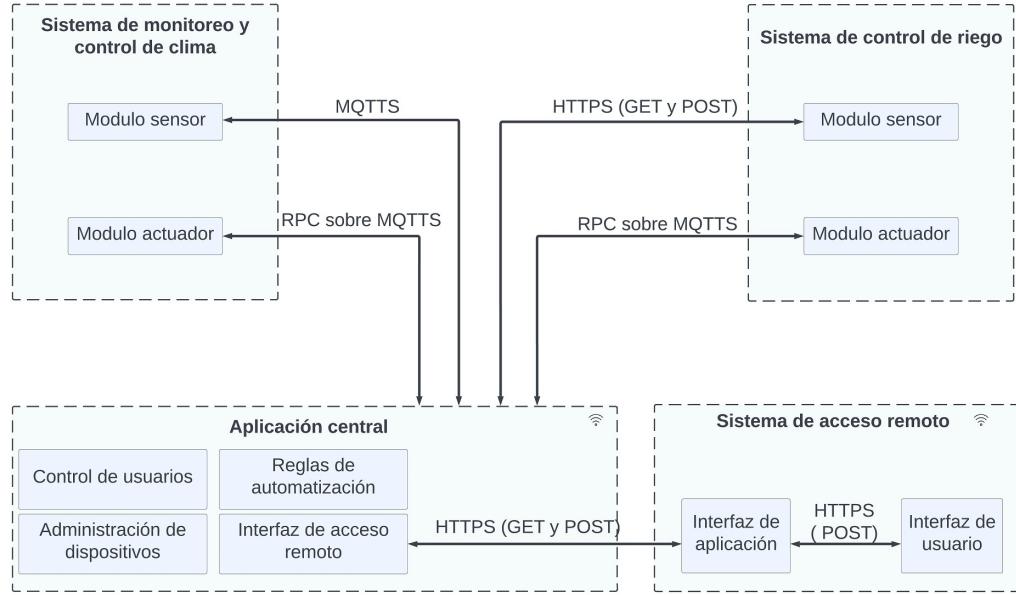


FIGURA 3.2. Protocolos de comunicación entre módulos.

Las interacciones principales entre los bloques componentes son:

- Sistema de monitoreo y control de clima: las comunicaciones se realizan exclusivamente con aplicación central. El módulo sensor envía las mediciones realizadas por medio de MQTT y en caso de requerir una acción, la aplicación central comanda el encendido de los ventiladores por medio de un mensaje enviado por RPC [13] sobre MQTT.
- Sistema de control de riego: las comunicaciones se realizan con la aplicación central de manera bidireccional. El módulo sensor efectúa dos conexiones, una para el envío de las mediciones y otra para recibir valores de atributos tales como la duración del tiempo de riego. Debido a limitaciones en la configuración de la persistencia de los mensajes en las colas de MQTT, se optó por utilizar llamadas HTTP (GET y POST) para realizarlas. Al igual que en el control de clima, la aplicación central inicia el riego por medio de mensajes RPC sobre MQTT hacia el controlador de la bomba y de las válvulas.
- Sistema de acceso remoto: la interfaz se comunica con la aplicación por medio de pedidos HTTP GET y POST para consultar el reporte de estado de los diferentes componentes. A continuación este se envía hacia la interfaz de usuario por medio de una solicitud HTTP POST.

3.2. Detalle de los módulos de hardware

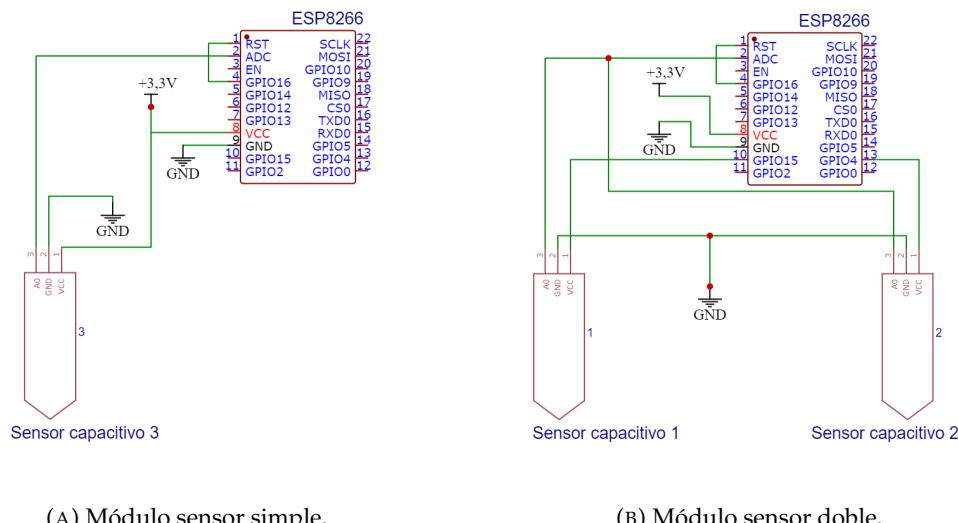
En esta sección se describen en detalle los esquemas de conexión de los distintos módulos y las consideraciones de diseño y construcción empleadas.

3.2.1. Módulos sensores de humedad del suelo

En el proyecto se desarrollaron dos configuraciones diferentes de módulos para medir la humedad del suelo en macetas de diverso tipo y tamaño. Ambas opciones utilizan el microcontrolador ESP8266 pero incorporan distinta cantidad de sensores. En la figura 3.3a se muestra el esquema de conexión para la versión simple (con un único sensor) y en la figura 3.3b se ilustra la configuración doble.

Si bien en el prototipo los sensores se conectaron a una fuente de alimentación, la configuración y conexión del sistema está optimizada para el uso de baterías. Esto se debe a que las sondas pueden estar desplegadas en múltiples ubicaciones dentro del invernadero y no siempre es posible conectarlas a la red eléctrica.

El ahorro de energía necesario para permitir el uso de baterías se logra a través de ciclos de apagado en los períodos donde no se realizan lecturas. A este mecanismo se lo conoce como *deep sleep* y una vez que el microcontrolador se encuentra en este estado se requiere un pulso eléctrico en el pin de *reset* para que retorne al modo activo. Para habilitar la reactivación se interconectaron los pines D0 (GPIO16) y RST del chip ESP8266. Se logra así una reducción del consumo de energía a valores muy pequeños que rondan los 0,3 mA durante el período de inactividad.



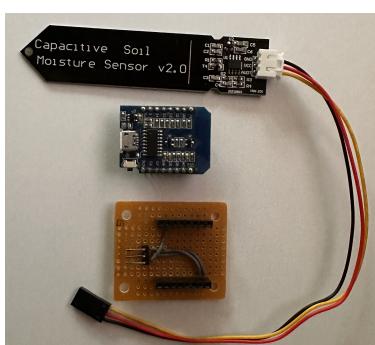
(A) Módulo sensor simple.

(B) Módulo sensor doble.

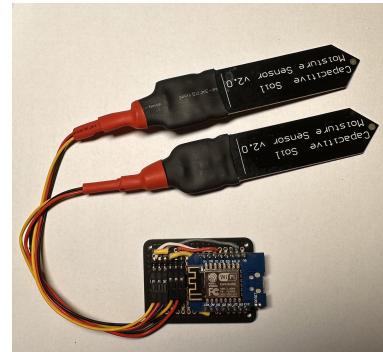
FIGURA 3.3. Esquema de conexión de módulos sensores de humedad del suelo.

La integración de los componentes de los sensores se realizó en forma manual por medio de placas de circuitos impresos (PCB) experimentales. En las figuras 3.4a y 3.4b se muestran los componentes empleados y un módulo ensamblado.

Dado que los sensores están expuestos a salpicaduras, se los recubrió con tubos adhesivos termocontraíbles que, al aplicarles calor, generan una protección a prueba de agua. Para el resguardo del chip ESP8266 se utilizó una caja de polipropileno transparente sellada. En las figuras 3.4c y 3.4d se muestran los componentes y sus protecciones.



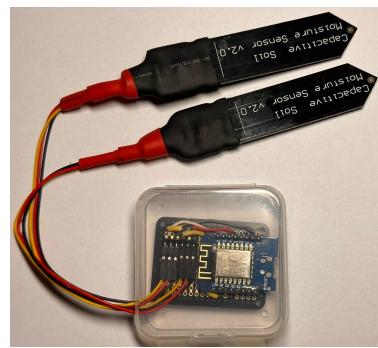
(A) Módulo con un sensor de humedad del suelo.



(B) Módulo con dos sensores de humedad del suelo.



(C) Detalle de protección de circuitos en los sensores.



(D) Módulo en su caja protectora.

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

3.2.2. Módulo controlador del riego

Se compone de un microcontrolador ESP32, una placa de interfaz de relé de cuatro canales, una pantalla LCD/OLED SSH1106 y un regulador de voltaje DC-DC *step down* LM2596. El esquema de conexiones entre estos componentes se detalla en la figura 3.5.

El módulo se alimenta con una fuente de 12 VDC y para energizar a los circuitos electrónicos el regulador LM2596 reduce la tensión a 5 VDC.

Para la construcción del prototipo se realizó la integración del microcontrolador con la pantalla LCD mediante una placa PCB experimental. Tanto para el módulo regulador de tensión como para el conjunto de relés se emplearon circuitos preensamblados. En la figura 3.6 se muestran los componentes, su conexionado y la versión final de la unidad dentro de una caja protectora.

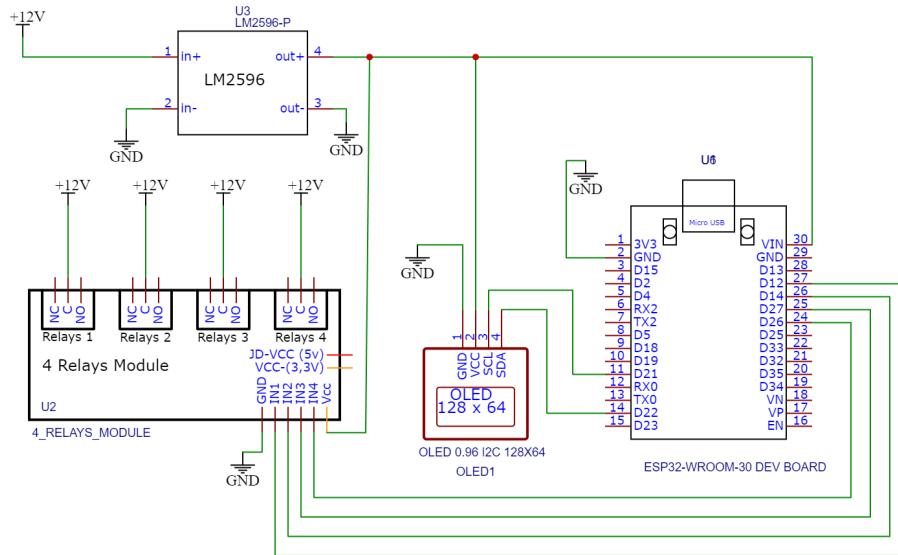
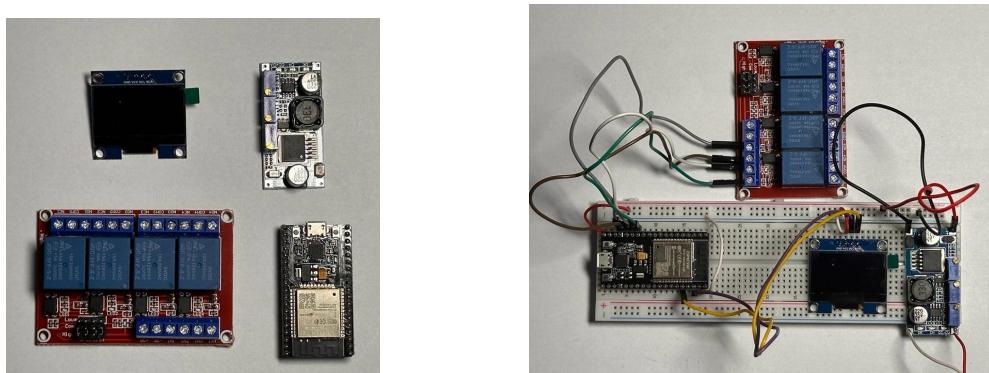
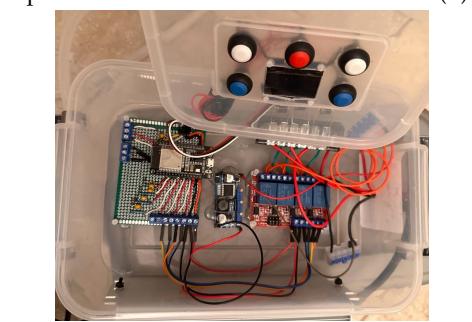


FIGURA 3.5. Conexión del módulo de control de riego.



(A) Detalle de los componentes.

(B) Conexionado.



(C) Módulo finalizado en su caja protectora.

FIGURA 3.6. Módulo de control de riego.

3.2.3. Módulo sensor de temperatura y humedad

Está compuesto por un microcontrolador ESP8266, un sensor DHT22 y una pantalla LCD/OLED SSH1106 para visualizar los valores de temperatura y humedad *in situ* en tiempo real. El esquema de conexión de los componentes se puede ver en la figura 3.7.

A diferencia de las sondas de humedad del suelo, el sensor de temperatura y humedad está pensado para instalarse en una ubicación fija con acceso a la red

eléctrica. Por este motivo no se consideró configurarlo para soportar *deep sleep*.

La construcción del módulo se realizó sobre placa PCB experimental en forma similar a los demás sistemas. Para proteger los componentes se utilizó una caja de polipropileno transparente. El sensor DHT22 quedó expuesto para medir las condiciones ambientales como muestra la figura 3.8.

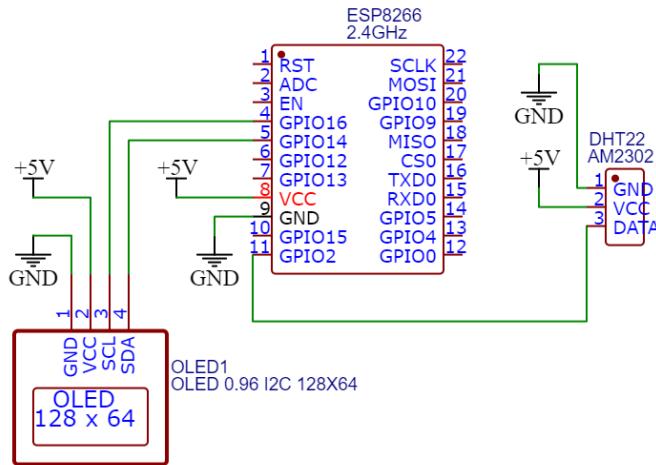


FIGURA 3.7. Conexión del sensor de temperatura y humedad.



FIGURA 3.8. Módulo completo en su caja protectora.

3.2.4. Módulo controlador de clima

Es el responsable de accionar los ventiladores en el invernadero. Para el diseño se utilizó un chip ESP8266 conectado a un relé de una vía como se muestra en la figura 3.9.

Dado que la salida del microcontrolador es de 3,3 V para el prototipo se seleccionó un relé que pueda ser accionado con ese valor de tensión, para evitar el uso de componentes adicionales tales como convertidores de tensión DC-DC *step up*.

En la figura 3.10 se ilustra el proceso de construcción del módulo.

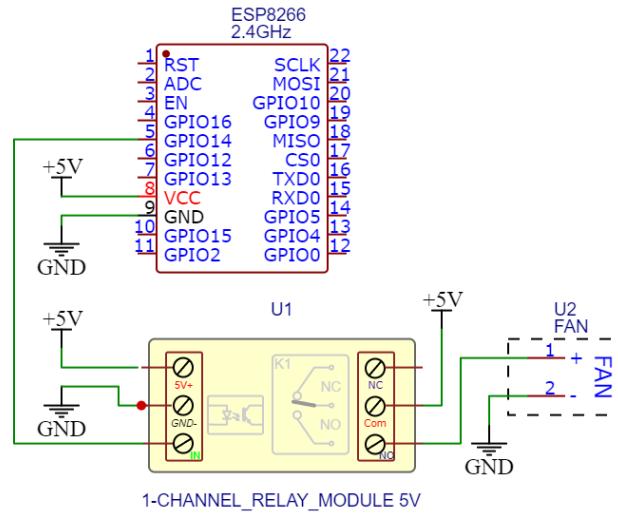


FIGURA 3.9. Conexión del módulo de control de clima.

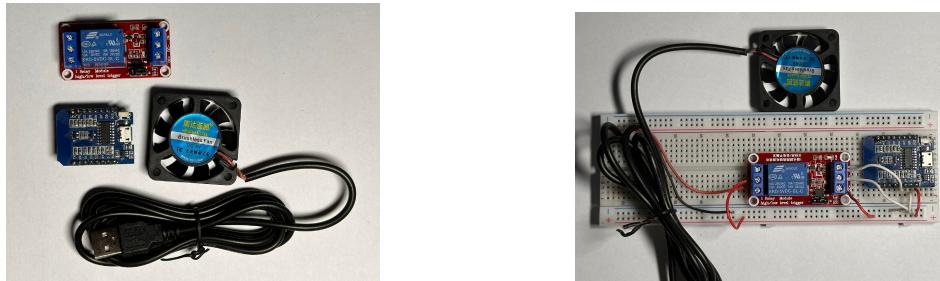


FIGURA 3.10. Módulo de control del clima.

3.3. Desarrollo del firmware

Para la realización del proyecto se optó por desarrollar el firmware de todos los módulos en C++ por medio de la aplicación Arduino IDE. Los criterios utilizados para esta selección se basaron en la baja curva de aprendizaje de la herramienta, la amplia disponibilidad de librerías y ejemplos para el uso de componentes y la vasta comunidad de soporte para entusiastas de IoT existente en Internet. Estos factores resultaron fundamentales para la elección debido a que el soporte y extensión del sistema quedará a cargo del cliente.

En líneas generales, el firmware de todos los módulos sigue el mismo patrón:

1. Comienzo: se corresponde al encendido del chip.
2. Setup: Es una función especial que se ejecuta una única vez al inicio del programa y se utiliza para inicializar cualquier variable, configurar los pines de entrada y salida y establecer cualquier comunicación que se precise.
3. Loop : Es una función que se ejecuta continuamente en un bucle que por lo general, solo se interrumpe al apagar al dispositivo. En esta sección se coloca el código principal del firmware.

Adicionalmente, el código puede contener variables, funciones y bibliotecas.

Para facilitar la conexión a la aplicación Thingsboard, se hizo uso de la Arduino Thingsboard SDK [44], que provee mecanismos para el manejo de MQTT, RPC y provee la opción de realizar actualizaciones de firmware de forma inalámbrica (OTA de *over the air*).

3.3.1. Firmware de los módulos sensores de humedad del suelo

Este es el único módulo que utiliza HTTP para la comunicación con la aplicación central debido a limitaciones en la aplicación Thignsboard, al no permitir configurar los períodos de retención de mensajes en las colas de MQTT para soportar configuraciones prolongadas de *deep sleep*.

El proceso de ejecución es similar al resto, con la diferencia que luego del inicio, el programa realiza una llamada HTTP para obtener el tiempo de configuración de hibernación. La lectura de los sensores se realiza a continuación y varía de acuerdo a si es una configuración simple o doble. Esto es debido a que el ESP8266 posee un solo pin de conversión analógica a digital (ADC) al que todos los sondas deberán compartir. Para resolver este problema se procede a conectar la alimentación (VCC) de cada una de las sondas un pin GPIO diferente. De esta manera, al encender o apagar estos pines en forma secuencial, se energiza al sensor correspondiente y se procede a leer el valor en el pin ADC, para finalmente apagarlo y repetir el ciclo para el próximo sensor.

Para que el módulo pueda reportar un valor que represente la humedad del suelo, es necesario realizar una conversión del voltaje leído en el pin ADC. Se decidió seguir el método descripto en [45] que consiste en realizar mediciones en suelo seco para luego ir agregando cantidades precisas de agua sobre las que se evalúa la diferencia de potencial observada en cada caso. Del proceso resulta una fórmula lineal que calcula el contenido volumétrico de agua presente en la tierra.

Una vez obtenido el o los valores se los reporta a la aplicación por medio una llamada HTTP POST, luego de lo cual el sensor comienza el período de *deep sleep* por la cantidad de tiempo definida en el atributo leído en primera instancia.

En la figura 3.11 se diagrama la ejecución del módulo.

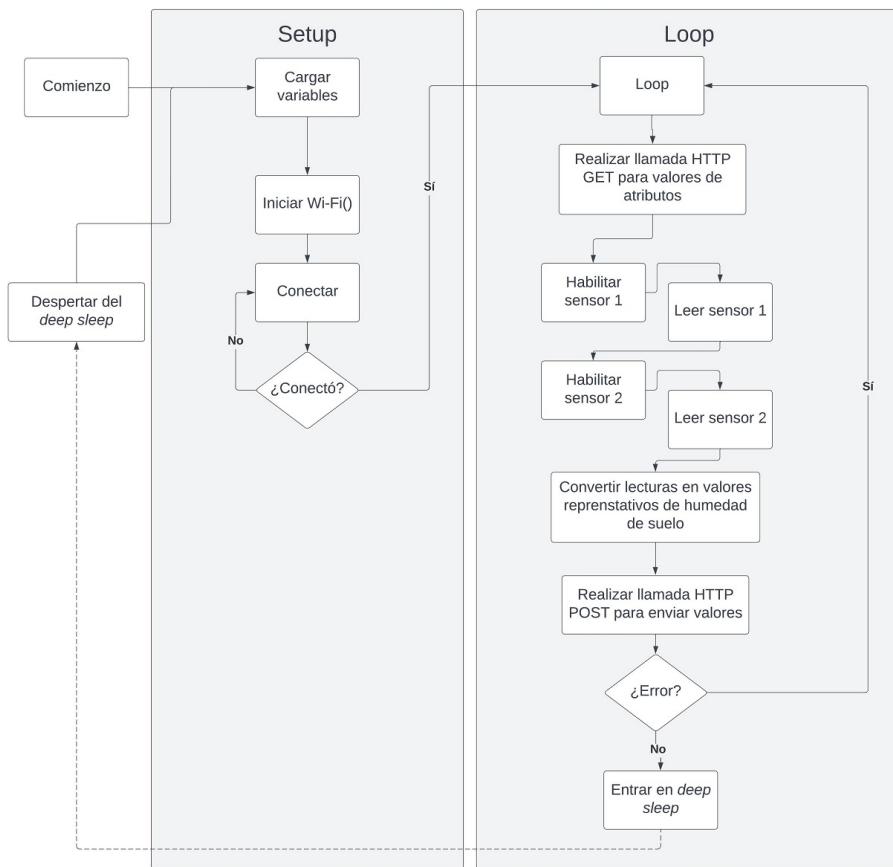


FIGURA 3.11. Diagrama de flujo del firmware de los módulos sensores de humedad del suelo.

3.3.2. Firmware del módulo controlador del riego

Este es el módulo de mayor complejidad lo que puede verse reflejado en las figuras 3.12, 3.13 y 3.14.

La ejecución se inicializa con el proceso estándar de carga de variables, entre las que se incluye un valor por defecto para la duración del riego, y el estado de la bomba y cada válvula presente. Luego de la conexión a la red Wi-Fi, el programa se registra a la aplicación y se suscribe a los *getter topics* y a los *setter topics*, que se corresponden a los canales para reportar los estados a la aplicación o recibir comandos para prender o apagar dispositivos respectivamente.

En el caso de recibir un mensaje para informar el estado de los pines de GPIO, asociados con las válvulas o la bomba, o de la variable de duración de riego, el código reporta sobre el *topic* de respuesta el estado requerido. En cambio, si el mensaje recibido para realizar un cambio, puede suceder una de las siguientes situaciones: es para comenzar el riego, el programa realiza una serie de verificaciones para asegurar la integridad de la bomba y cañerías del sistema de riego:

- Pedido de reconfigurar el tiempo de riego: el código actualiza la variable y retorna la comienzo del bucle.
- Pedido de apertura o cierre de válvula:
 - Apertura: Se procede a abrir la válvula seleccionada y se comprueba si la bomba está en estado de pedido de encendido (bomba lista), en cuyo caso se ordena el encendido de la bomba.
 - Cierre: se realiza una comprobación si hay otras válvulas abiertas, de ser así se procede con el cierre. En caso de ser la última, se ordena el apagado de la bomba y por último se procede al cierre de válvula.
- Pedido de prendido o apagado de la bomba:
 - Prendido: En el caso de haber una válvula abierta, se procede a encender la bomba por el tiempo que marque la variable de duración de riego, luego de lo cual se procede al apagado de la bomba y cierre de las válvulas, en ese orden. De no haber válvulas abiertas, se configura la variable de bomba lista en positivo, indicando que el riego fue pedido pero aún no están dadas las condiciones.
 - Apagado: En el caso de pedir una interrupción en el riego, se ordena el apagado de la bomba y el cierre de las válvula.

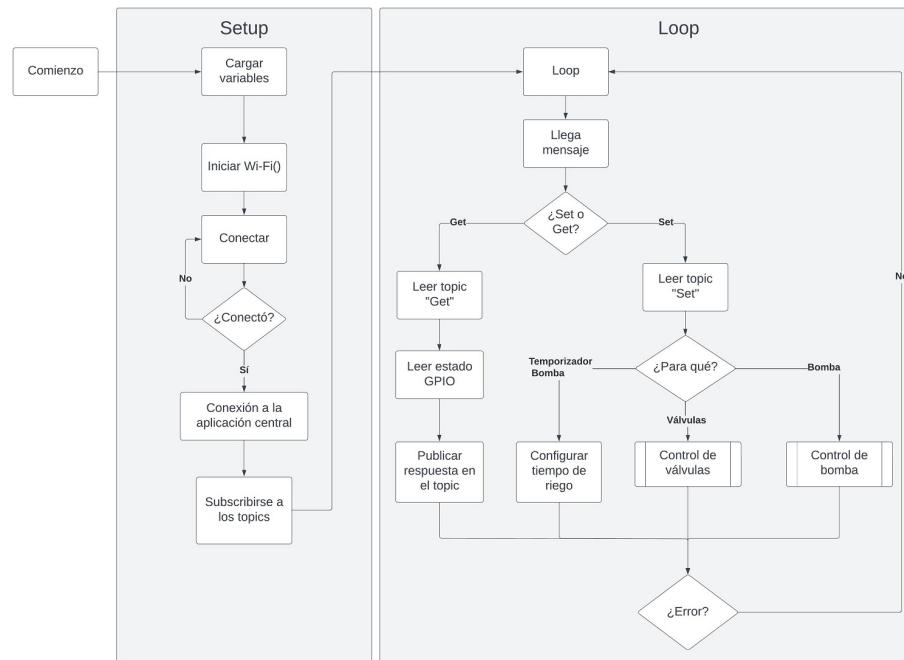


FIGURA 3.12. Diagrama de flujo del firmware del módulo de control de riego.

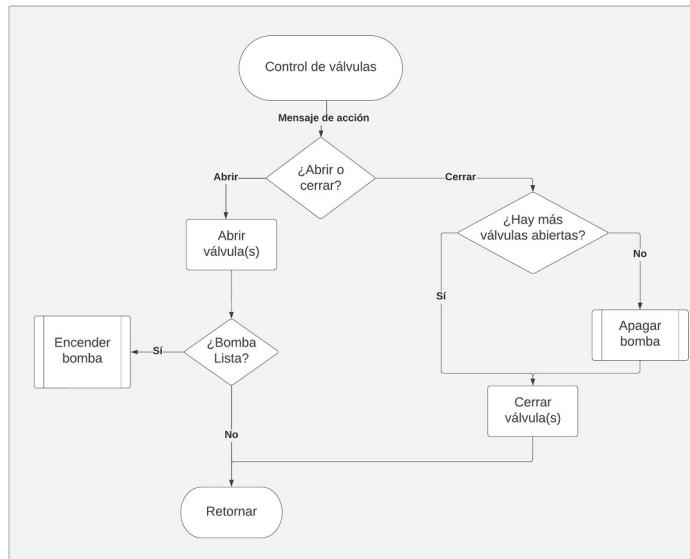


FIGURA 3.13. Diagrama de flujo del firmware del módulo de control de riego - Control de válvulas.

3.3.3. Firmware de los módulos sensores de temperatura y humedad

Se encarga de obtener las medidas de temperatura y humedad y reportarlas a la aplicación al mismo tiempo que imprime los valores en la pantalla LCD. Para reducir la cantidad de mensajes enviados, se incorpora un contador que indica cuántas iteraciones del ciclo son necesarias por cada envío de datos. Esto no se contempla para el reporte en la pantalla.

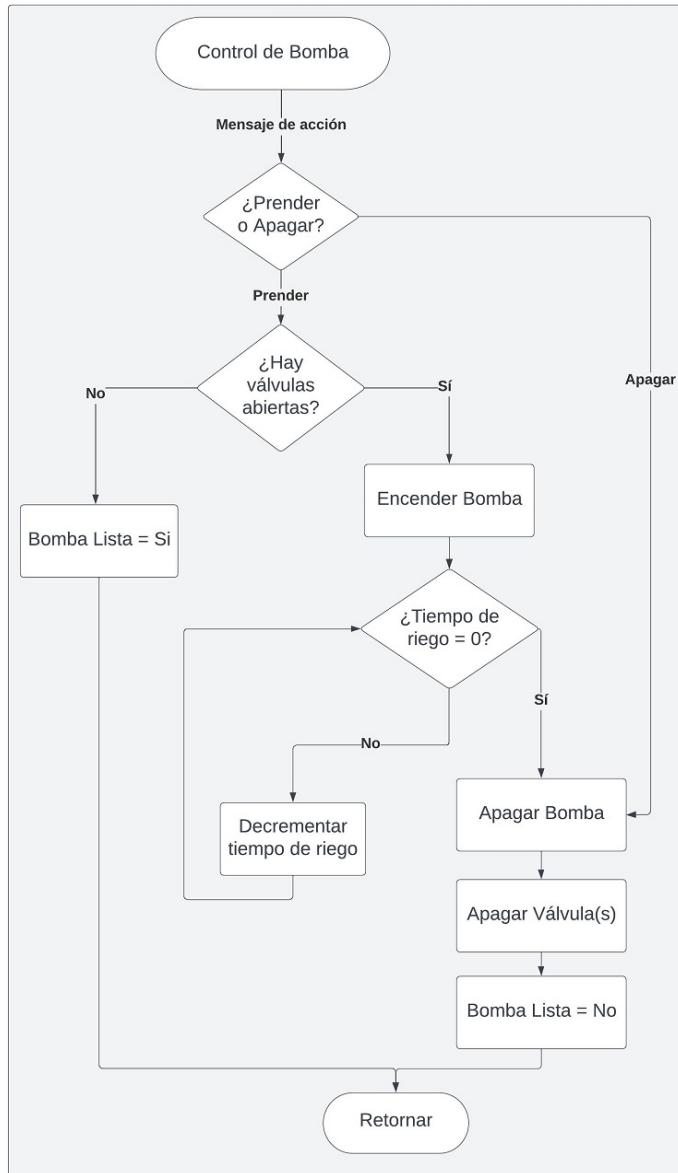


FIGURA 3.14. Diagrama de flujo del firmware del módulo de control de riego - Control de bomba.

3.3.4. Firmware del módulo de control de clima

Es el que se encarga del encendido y apagado de los ventiladores para el control de clima. Luego de la comienzo, el programa se conecta a la red, se subscribe en los *topics* correspondientes, y queda a la espera de los mensajes. En el caso de recibir un pedido de reporte, responde con el estado del pin GPIO asociado con el ventilador. Si recibe un pedido de prendido o apagado, realiza la acción correspondiente y retorna al inicio del bucle.

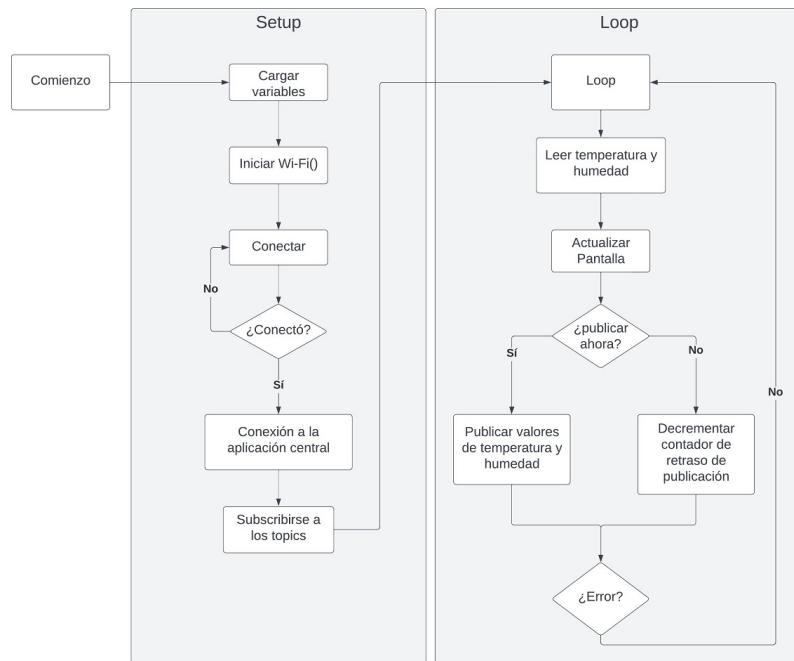


FIGURA 3.15. Diagrama de flujo del firmware del módulos sensores de temperatura y humedad.

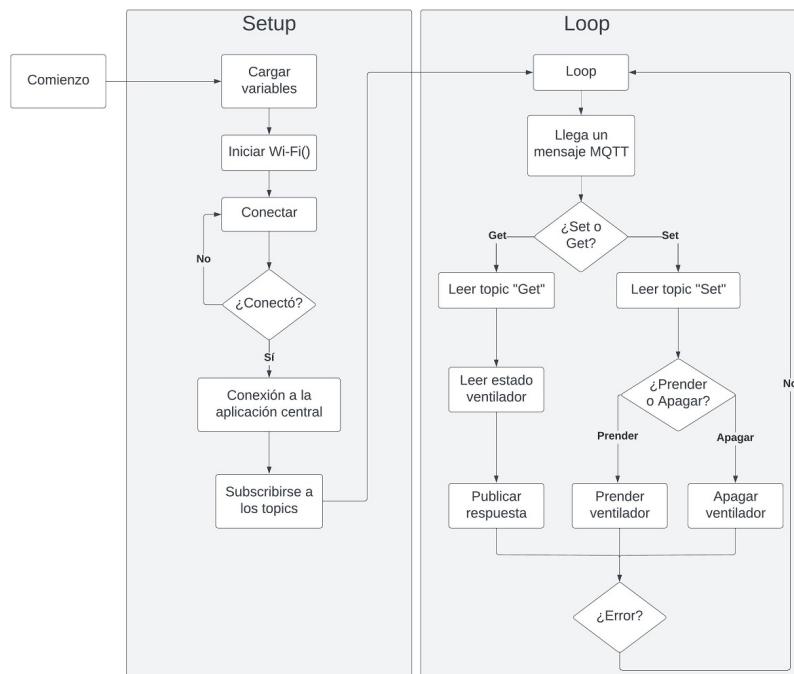


FIGURA 3.16. Diagrama de flujo del firmware del módulo de control de clima.

3.4. Selección y configuración del software

A desarrollar: en esta sección explicaré los criterios de selección y configuración del software central como así también el diseño de la interfaz de acceso remoto vía Telegram.

Para la realización del trabajo se eligió como plataforma para la aplicación central a Thingsboard CE dado que cumplía con los requerimientos de licencia, funcionalidades y documentación de soporte. Adicionalmente es una plataforma de bajos requerimientos de sistema, buen diseño de seguridad y posibilidad de expansión a nuevos sistemas comerciales o de desarrollo propio. *quiero decir aca cosas do it yourself.*

3.4.1. Servidor de la aplicación

Para la instalación de la aplicación se utilizó una Raspberry Pi 4B de 8 GB de memoria RAM. Se seleccionó el sistema operativo Linux Raspbian versión 11 instalado sobre una tarjeta de memoria SD de 64 GB de capacidad. Para simplicidad del prototipo, se empleó la misma red Wi-Fi existente en área de desarrollo, pero es la intención del modelo final emplear la red cableada para el acceso a internet y emplear la placa inalámbrica de la Raspberry para una red de tipo Ad-hoc con los sensores.

3.4.2. Configuración de la aplicación

Para la instalación de la aplicación Thingsboard, se utilizaron las instrucciones provistas por el desarrollador en su página oficial [46]. Thingsboard requiere de una base de datos para almacenar los valores de las telemetrías y atributos. Para sistemas con una carga de hasta 5000 mensajes por segundo se recomienda el uso de PostgreSQL como base de datos para capa de persistencia. Dado que en este proyecto la cantidad de mensajes enviados es de aproximadamente 4 por minuto, una única base de datos en el mismo servidor fue suficiente.

3.4.3. Manejos de dispositivos

3.4.4. Reglas de automatización

Una de las principales ventajas de la aplicación es la capacidad de crear reglas de automatización por medio de un desarrollo *low-code/no-code*[47]. Thingsboard posee un motor de reglas utilizando para crear flujos de trabajo basados en eventos. Posee 3 componentes principales:

- Mensaje: cualquier evento que ingrese, pueden ser datos provenientes de un dispositivo, un pedido por medio de la API REST (HTTP), RPC, etc.
- Nodo de regla: es una función que se ejecuta sobre un mensaje entrante. Los nodos pueden ser para filtrar, transformar o ejecutar alguna acción sobre el mensaje.
- Cadena de reglas: los nodos se conectan entre sí por medio de relaciones de forma tal que la salida de un nodo es enviada a los próximos nodos conectados.

Para el proyecto se desarrollaron una o más reglas por módulo, para dispar. La figura 3.17 muestra a manera de ejemplo la regla creada para el control de riego en función de los mensajes recibidos por parte de los sensores de humedad del suelo.

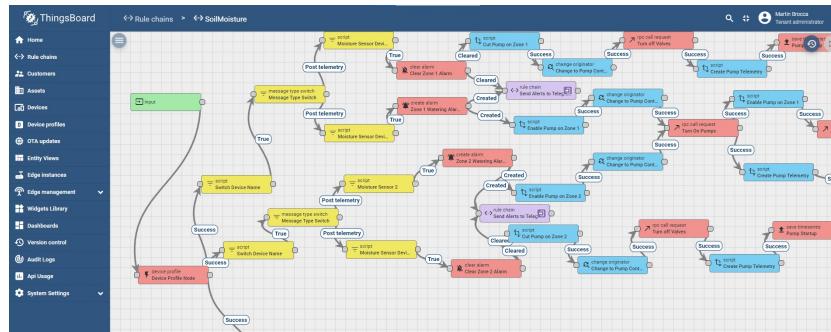


FIGURA 3.17. Regla de automatización para el control de riego.

3.5. Ciberseguridad del sistema

A desarrollar: en esta sección explicaré el uso de TLS en las comunicaciones, las limitaciones encontradas y los riesgos residuales.

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] www.survivingwithandroid.com. <https://www.survivingwithandroid.com/mqtt-protocol-tutorial/>. (Visitado 20-03-2023).

- [18] Patrick Th. Eugster et al. «The Many Faces of Publish/Subscribe». En: *ACM Comput. Surv.* 35.2 (2003), 114–131. ISSN: 0360-0300. DOI: [10.1145/857076.857078](https://doi.org/10.1145/857076.857078). URL: <https://doi.org/10.1145/857076.857078>.
- [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] Apache Software Foundation. *Apache License 2.0*. Contract. Apache Software Foundation, 2004. URL: <https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0>.
- [39] *Soporte de Arduino IDE para hardware de terceros*. URL: <https://github.com/per1234/ino-hardware-package-list/blob/master/ino-hardware-package-list.tsv>.

- [40] *Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1.* URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics>.
- [41] *What is arduino software (IDE), and how use it ?* URL: <https://andprof.com/tools/what-is-arduino-software-ide-and-how-use-it/>.
- [42] *Telegram - Preguntas Frecuentes.* URL: <https://telegram.org/faq?setln=es#p-que-es-telegram-que-puedo-hacer-aqui>.
- [43] <https://www.iec.ch/ip-ratings>. (Visitado 20-03-2023).
- [44] Thingsboard. *Thingsboard Arduino SDK.* Visitado el 2023-03-20. 2023. URL: <https://github.com/thingsboard/thingsboard-arduino-sdk>.
- [45] Joshua Hrisko. <https://makersportal.com/blog/2020/5/26/capacitive-soil-moisture-calibration-with-arduino>. 2020. (Visitado 20-03-2023).
- [46] Thingsboard. *Thingsboard Arduino SDK.* Visitado el 2023-04-09. URL: <https://thingsboard.io/docs/user-guide/install/rpi/>.
- [47] Chris Johannessen y Tom Davenport. *When Low-Code/No-Code Development Works — and When It Doesn't.* Visitado el 2023-04-09. URL: <https://hbr.org/2021/06/when-low-code-no-code-development-works-and-when-it-doesnt>.